

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13805

研究課題名（和文）電流-磁区経路分離型磁壁移動スピンロジックによる不揮発性論理回路の開発

研究課題名（英文）Investigation of spin logic using current-domain separated current-induced domain wall motion

研究代表者

黒川 雄一郎（Kurokawa, Yuichiro）

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：20749535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は磁壁を利用したロジック回路を作製し、動作を検証することである。これに対し、まず、Y字型の回路を作製し、研究を行った。その結果、Y字型細線の合流部の太さを変更することにより、合流部での磁壁の動きが変化することが分かった。また、磁壁を動かす駆動トルクの効果的利用の検討として、希土類フェリ磁性体をベースにした様々な磁性材料の駆動トルクを測定した。その結果、希土類磁性体は小さな飽和磁化を持つがために効率的な駆動トルクの活用ができることを発見した。これらの成果は9件の学会発表として公表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、クラウドコンピューティングを代表とした情報技術の発展により、コンピュータは社会の中でさらに重要性を増してきている。一方で、全世界のIT機器の消費電力量は2015年の時点で約1500TWh/年であり、2025年には約三倍になると予想されている。したがって、その省電力化は急務である。本研究で作製した不揮発性を有するロジック回路は将来的にこれらのIT機器に搭載されることにより、低消費電力を有し同時に優れた演算性能を発揮することが可能である。また、その駆動トルクに関する成果は希土類フェリ磁性体の磁気物理特性を明らかにするものである。

研究成果の概要（英文）：We investigated logic circuit based on current-induced domain wall motion. In this study, we fabricated Y-shape magnetic wire circuit. As a result, we found that the domain wall motion in the intersection on Y-shape wire can be changed by changing wire width of output section. We also investigated the driving force of domain wall using rare earth-transition metal magnetic materials. We found that the large driving force exists in the above materials because those have small saturation magnetization.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：電流誘起磁壁移動 スピンオービットトルク 希土類フェリ磁性体

1. 研究開始当初の背景

近年、クラウドコンピューティングを代表とした情報技術の発展により、コンピュータは社会の中でさらに重要性を増してきている。一方で、全世界のIT機器の消費電力量は2015年の時点で約1500TWh/年であり、2025年には約三倍になると予想されている。したがって、その省電力化は急務である。しかしながら、現在のコンピュータは電界効果トランジスタ(FET)を用いた揮発性の素子で構成されており、近年の急激なFETの微細化によりリーク電流が無視できない大きさになっている。これは演算していなくても電源を入れているだけで電力を消費していつてしまうことを意味する。一方で、もし情報の保持に電力を必要としない不揮発性の素子を演算に用いることができれば、不必要時には随時電源を切って不要な電力の消費を防ぐコンピュータ、ノーマリーオフコンピュータが実現する。これが現実になれば、今後の情報化社会中で大幅な電力の効率化を実現することが可能となる。

このような不揮発性素子の要請に対し、われわれの研究グループは磁性細線を用いた論理回路、磁壁移動型スピロジックを提案している。これは、1、0に対応する磁区を磁性細線上に配置し、磁区を電流を用いて移動させることで論理演算を行うものである。細線上に書き込んだ磁区は電源を切っても揮発せず、このようなスピロジックはノーマリーオフコンピュータに搭載可能な素子の有力な候補である。磁区の移動速度は100m/sを超えることが報告されており、磁区のサイズを最小磁区径程度の100nmとすると演算速度は1GHz程度に到達し、動作速度も良好であると予想される。

図1に磁壁移動型スピロジックのAND、OR、NOTの回路を示す。AND、ORでは同じY字型の細線を用いて、合流後の細線の幅を変更することで二つの入力1-0のときに磁区が消滅するか、通り抜けるのかを決定している。

しかしながら、これまでの素子では細線そのものに電流を流すために電流密度が細線の幅によって変化してしまい、電流密度に依存する磁区が速度が場所によって変化するという問題があった。また、NOT回路は構造が非常に複雑である。

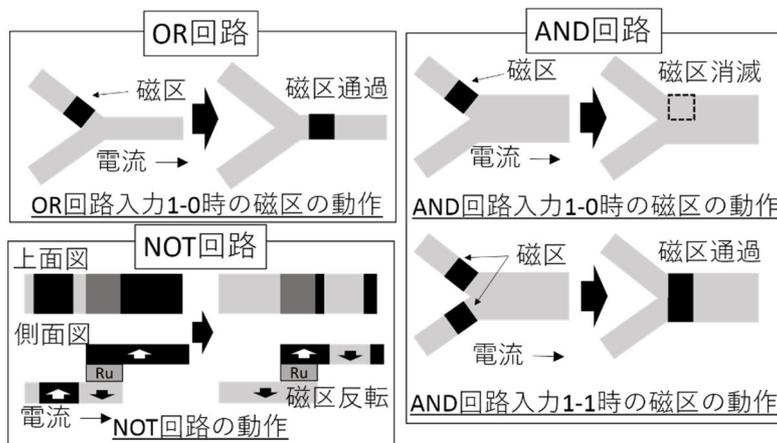


図1 従来型磁壁移動型スピロジックにおけるロジック動作

Ruなどの反強磁性結合が可能な中間層を導入することで上部細線と下部細線を反

強磁性結合させ、図1に示すようなNOT回路を実現するが、磁性細線の厚みは数原子層から数nmであるのでこの構造を実現することは難しく、歩留まりの悪化や誤動作の原因になりかねない。磁壁移動型スピロジックの実現にはこれらの問題の解決が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究計画では、電流-磁区経路分離型磁壁移動スピロジックを提案する。近年、磁区・磁壁を電流で動かすための要素技術として、電流が流れている非磁性重金属中においてスピンの流れを誘起する「スピンホール効果」と電子スピンの配列に一定のカイラリティを与える「ジャロ

「シンスキー・守谷相互作用」を利用したスピンオービットトルク (SOT) による磁壁移動技術が盛んに研究されている。この二つの効果はともに、磁性体とスピン軌道相互作用の大きい重金属を積層した場合の界面に現れる。磁区を動かすには重金属層のみに電流を流せばよく、また、重金属層の形状と磁性体の形状が異なっても積層さえしてあれば磁区を動かすことができる。したがって、面積の大きい重金属細線の上にY字型の磁性細線を積層することにより、ロジック動作させることができる。この時、磁性層は重金属層に比べ薄く、電流のほとんどは重金属層に流れるため、細線の幅を変更しても電流密度は変化することなく一定であり、磁壁速度は変化しない。また、面積の大きい重金属層の上に多数の磁性細線論理素子を並列に配置することで配線を大幅に簡略化することも可能である。NOT回路については、一度磁区の情報を磁気抵抗素子で読み取り、逆向きの磁区を次の細線に書き込むことで実現する新たなNOT回路を作製する。この構造では中間層を必要とせず、NOT回路を簡単に実現できると考えられる。

また、磁壁を搬送するのに必要なエネルギーを低減させることも素子の低消費電力化には重要である。磁壁の移動に必要なエネルギーは素子の飽和磁化によって決定され、小さければ小さいほど小さな電流で磁壁を動かすことが可能になる。そこで、我々は飽和磁化の小さい希土類フェリ磁性体に注目し、そのSOTを測定することで低消費電力化が可能な磁性材料の選定も行った。

### 3. 研究の方法

試料の作製は以下のように行った。まず、熱酸化 Si 基板上にレジストをスピンコーティングにより塗布し、電子線描画装置 (EB)、またはフォトリソグラフィーにより細線パターンを描く。その後、スパッタリング装置を用いて、Gd-Fe 合金または CoFeB/MgO 多層垂直磁化膜を製膜した。Gd-Fe 合金および CoFeB/MgO 下にそれぞれ 6-7nm の Ta を重金属として重ねた。製膜後、リフトオフ法により Y 字状の細線に加工し、2 入力 1 出力のロジック回路を作製した。これらの Y 字細線にパルス電流を印加することで磁壁を動かし、磁壁移動を Kerr 効果顕微鏡で観察してロジック動作を検証した。観察の際、磁区の導入は外部磁場を制御することで導入した。

また、低消費電力化が可能な磁性膜の選定として、Gd-Fe 合金、Tb-Gd-Fe 合金の SOT を測定した。これらの合金の 4 端子のホールクロスをフォトリソグラフィーにより作製し、異常ホール効果を用いて SOT を測定した。

### 4. 研究成果

#### 4.1 重金属層と磁性層で同じ構造を持つ Y 字回路の磁壁移動特性<sup>[1]</sup>

まず、Y 字型細線のロジック動作を調べるために、下部層と磁性層で形状の同じ Y 字型細線を用いて実験を行った。図 2 に Y 字型細線の模式図を示す。最初に、AND 型の回路として、input 部と output 部で細線の幅が 1:2 になるように設計して Y 字型細線を作製した。結果として、input 部の一方に磁壁を入れて電流によって磁壁を移動させる場合、つまり入力が 1-0 あるいは 0-1 の場合は Y 字の結合部で磁壁がピン止めされ、output 部に進まなくなることがわかった。一方で、input 部の両方に磁壁を入れて磁壁を移動させる場合、つまり、入力が 1-1 の場合は結合部を通り抜けて output 部まで通り抜けることが分かった。これにより、0-0、0-1、1-0 を入力すると出力が 0 となり、

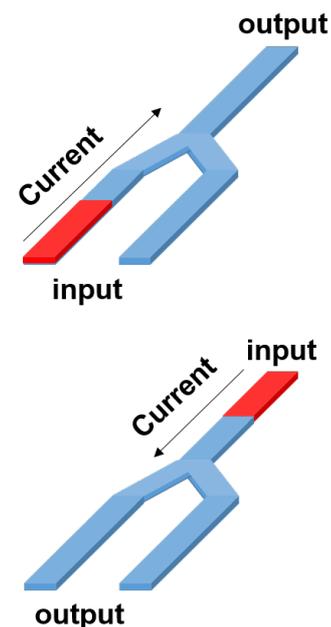


図 2 Y 字型細線の模式図  
上 : AND, OR 回路  
下 : FANOUT 回路

1-1を入力すると出力が1となるAND回路として動作していることがわかった。

AND型Y字回路において、一方のinput部だけに磁壁を入れた時に結合部において磁壁がピン止めされるのは、磁壁の幅が結合部において広がるためにその分の磁壁エネルギーが高くなるためと考えられる。input部の両方に磁壁を入れた時は、2つの磁壁が結合して磁壁の幅が広がらないためにピン止めされずに進むのであると考えられた。このことから、input部とoutput部の細線幅を1:1にすることにより、一方のinput部に入力する時でも磁壁が結合部を通り抜けるOR回路ができると予想できる。そこで、input部入力とoutput部出力の細線幅の比が1:1になっているY字型細線の磁壁移動を観察した。しかしながら、予想に反して磁壁がinput部から動かないことが分かった。

また、最後にY字型細線のinputとoutputを反転させて1入力から同じ信号を2つ出力するFANOUT回路の動作も確認した。図1下のような構成で磁区を導入し、電流を流すことで磁壁がどのように動作するかを確認した。結果のKerr効果顕微鏡差分像を図3に示す。図の黒い部分が磁壁が移動した距離を示している。図より、1入力から2つの出力が得られ、FANOUTとして動作していることが分かる。

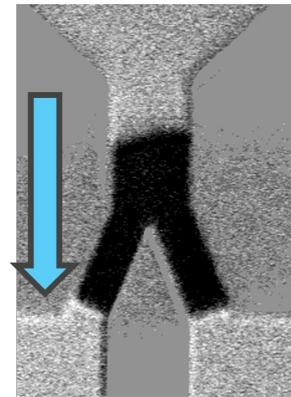


図3 FANOUT回路のKerr効果顕微鏡差分画像

次に、AND回路とOR回路の動作について考察する。電気抵抗率と膜厚は細線のいたるところで一定であるとする幅比が1:1のものでは、output部がinput部に直列に接続しているため、output部はinput部に対して電流密度が2倍になることが分かる。このため、幅比が1:1の細線では磁壁を導入してもinput部ではoutput部に対し電流密度が半減するため、磁壁を動かすことができなかったと予想できる。この結果は、AND回路やOR回路を作製するために細線の幅を制御すると、電流密度が形状に依存して変化し、電流密度に依存する磁壁動作が場所によって異なることを示す。したがって、これらの回路を集積した場合にはロジック回路として不安定になることが予想され、本研究の背景で述べたように磁性層と重金属層で形状を変化させることに優位性があることが証明された。

#### 4.2 磁壁移動ロジックのための材料探索

磁壁移動ロジックのための磁性材料として、より小さな電力で磁壁移動が可能になるような材料の探索を行った。具体的には、SOTが飽和磁化に反比例することを利用し、飽和磁化の小さなフェリ磁性体であるGd-Fe及びTb-Gd-Fe三元合金のSOTを調べた。具体的にはSOTを用いた磁化反転の特性からSOTを求め、より適した材料を調べた。Gd-Fe合金では下部層にTaを用いることにより、SOTを導入した。図4は、面内磁場

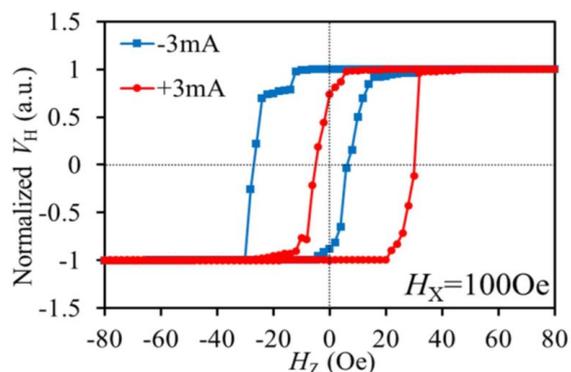


図4 SOT注入層にPtを用いた場合のGd-Fe合金の異常ホール電圧 $V_H$ に対する電流方向、磁場依存性

$H_x$ 下で電流を印可することにより、SOT有効磁場が発生し、垂直磁場 $H_z$ 下でのヒステリシスループが電流の向きに従いシフトしている結果である。このシフト量からSOTの電流に対する効率を求めることができる。その結果、SOTから発生する磁場が $3.94 \text{ Oe}/(10^{10}\text{A}/\text{m}^2)$ となることがわ

かった。一方で SOT 注入層として Pt を用いたものでは  $20 \text{ Oe}/(10^{10}\text{A}/\text{m}^2)$  となり、より大きな有効磁場を発生させることが分かった。この結果から、SOT を注入する層としては Ta よりも Pt を用いたほうがより効率的であることが分かった。また、面内磁場  $800 \text{ Oe}$  印可した状態で電流での磁化反転を観察したところ、Pt を SOT 注入層として用いたものは  $1 \times 10^{10}\text{A}/\text{m}^2$  と小さな電流密度で磁化反転することが分かった。

Gd-Fe 合金を用いた実験では、小さな閾電流密度を得られたものの、異方性が小さく、不揮発性を維持するためには熱的安定性に乏しいという問題が見えた。そこで、Gd-Fe 合金に Tb をドーピングすることにより、異方性の改善と小さな閾電流密度の維持を試みた。その結果、SOT 注入層として Pt 層を有する Tb-Gd-Fe 合金は磁気異方性が Gd-Fe 合金の 3 倍程度の値を有する一方で、閾電流密度が  $8 \times 10^{10}\text{A}/\text{m}^2$  と  $1 \times 10^{11}\text{A}/\text{m}^2$  以下に抑えることに成功した。これらの結果は、希土類フェリ磁性体が不揮発性ロジックのための磁性材料として有望であることを示す。

#### 4.3 磁区-電流経路分離型回路の作製

最後に磁区-電流経路分離型回路を作製した結果を示す。素子の作製にはフォトリソグラフィを用いた。今回の素子作製では磁性層に CoFeB/MgO 多層膜、重金属層に Ta を用いた。まず、フォトリソグラフィで下部重金属層を作製し、その後重ね描画により CoFeB/MgO を堆積した。磁性層まで堆積したのち、焼鈍炉用いて  $250$  度で加熱することで CoFeB 層に垂直磁気異方性を付与した。Y 字型 AND ロジック素子の光学顕微鏡像を図 5 に示す。今後はこの素子を用いて不揮発性磁気ロジックの研究を行っていく予定である。

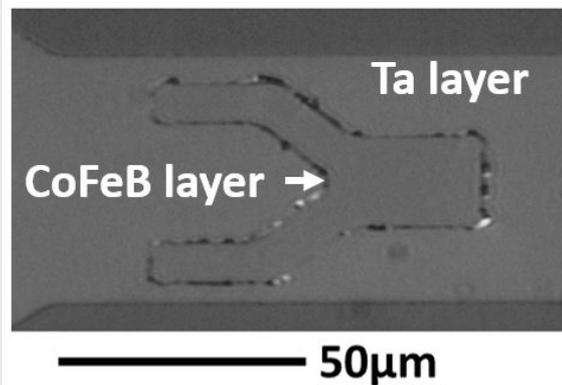


図 5 重金属下部層に Ta を用いた CoFeB 垂直磁化細線 AND 回路の光学顕微鏡像

[1] 黒川雄一郎, 若江将和, 伊藤正裕, 木村圭伸, 鷲見 聡, 栗野博之, 大西紘平, 湯浅裕美, 電流誘起磁壁移動現象を用いたロジック回路の作製, 信学技報 119 pp. 33-37 (2019).

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 黒川雄一郎, 若江将和, 伊藤正裕, 木村圭伸, 鷲見 聡, 栗野博之, 大西紘平, 湯浅裕美	4. 巻 119
2. 論文標題 電流誘起磁壁移動現象を用いたロジック回路の作製	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 33-37
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 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伊藤 正裕, 若江 将和, 黒川 雄一郎, 湯浅 裕美
2. 発表標題 Tb-Gd-Fe細線におけるTb組成と重金属下地が及ぼすスピンオービットトルクへの影響
3. 学会等名 2019年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川雄一郎, 若江将和, 伊藤正裕, 木村圭伸, 鷲見 聡, 栗野博之, 大西紘平, 湯浅裕美
2. 発表標題 電流誘起磁壁移動現象を用いたロジック回路の作製
3. 学会等名 MRIS研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本 真大, 若江 将和, 伊藤 正裕, 黒川 雄一郎, 湯浅 裕美
2. 発表標題 Tb-Fe細線を用いた電流誘起磁化反転の観察とスピンオービットトルクの測定
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 Yuichiro Kurokawa, Masakazu Wakae, Masahiro Fujimoto, Masahiro Itoh, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Observation of spin orbit torque magnetization switching without external magnetic field in wire fabricated by magnetic field applied sputtering method
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 伊藤 正裕, 若江 将和, 黒川 雄一郎, 大西 紘平, 湯浅 裕美
2. 発表標題 Tb-Gd-Fe細線におけるスピノービットトルクのTb組成依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masakazu Wakae, Masahiro Itoh, Yuichiro Kurokawa, Kohei Ohnishi, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Observation of spin-orbit torque magnetization switching in Gd-Fe perpendicular magnetized wire with IrMn cap layer
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichiro Kurokawa, Masakazu Wakae, Masahiro Itoh, Satoshi Sumi, Hiroyuki Awano, Kohei Ohnishi, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Investigation of Y-shaped magnetic wire logic device by current-induced domain wall motion
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichiro Kurokawa, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Emerging memories by using magnetic materials
3. 学会等名 Seoul National University -Kyushu University Joint Symposium on Materials Chemistry and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒川 雄一郎, 若江 将和, 藤本 真大, 伊藤 正裕, 湯浅 裕美
2. 発表標題 希土類フェリ垂直磁化細線を用いた無磁場中スピン軌道トルク磁化反転実現の試み
3. 学会等名 Spin-RNJ若手オンライン研究発表会
4. 発表年 2020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