

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656219

研究課題名(和文)電流駆動スピロジック原理実証および高速駆動磁区スピン観察への挑戦

研究課題名(英文)Proposal and demonstration of current driven SPIN LOGIC

研究代表者

粟野 博之 (Awano, Hiroyuki)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40571675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：電流駆動型スピロジックの基本概念的検証実験を行い、AND、OR、NOTの動作確認に成功した。また、ANDの出力部にNOTを設ければNAND動作が可能、OR回路の出力部にNOT機能を付加するとNOR機能が可能であることを確認した。更に、これらを組み合わせて複雑な演算を行うためには、出力信号を分割するFUNOUT機能も必要だが、これについても原理確認実験を行い、分割信号の大きな遅延もないことを検証した。このほか、ホール信号により磁壁移動速度を求め、それが数10m/secと高速であることも確認した。

研究成果の概要(英文)：Low current driven "SPIN LOGIC" has been proposed. We have already succeeded to reduce current density for driving domain wall on TbFeCo magnetic wire. Using the TbFeCo magnetic wire, 2 input ports and 1 output port logic circuit was fabricated. When the width of output port is wider than that of input port, the logic works for "AND" operation. In case of narrow width of output port, it works for "OR" logic. These were successfully demonstrated. Moreover, "NOT" and "FUNPOUT" demonstrations were also succeeded. The spin logic circuit and memory can be integrated in the same substrate and operated with low current. Thus, current driven spin logic and memory is very attractive for "LOGIC in MEMORY".

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気・電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：磁壁 磁壁電流駆動 スピロジック 反強磁性結合 磁壁エネルギー 静磁エネルギー ピンニング コラップス

1. 研究開始当初の背景

現在のコンピュータでは、メモリやロジックが揮発性であるためデータ保持に大量の電力を必要とする。しかし、新興国の経済成長やクラウドコンピューティングやビッグデータ等のアプリケーション興隆で扱うデータ量が急増しており、深刻な電力問題を引き起こしている。この抜本的解決策として期待されているのがメモリとロジックの不揮発化である。現在データの保存には電荷を利用しているが、電荷には揮発性があるため電力を供給してデータを維持する必要がある。そこで、電荷を不揮発性のスピンの置き換えた MRAM(Magnetic RAM)の製品化が急がれている。しかし、この構造は非常に複雑で、コストも高価であり電力問題の抜本的解決には至らない。そこで、我々は安価で単純構造の不揮発メモリと不揮発ロジックを思いついた。これはハードディスク(HDD)のデータトラックを磁性細線に置き換えたものである。HDDでは、磁気ディスクをモータで回転して所望のデータを記録再生ヘッドの位置まで移動する。しかも磁気ディスクとヘッド間の空隙は10nm以下と非常に狭いため、わずかな変動が生ずると磁気ヘッドは磁気ディスクに衝突し、記録したデータを破壊する。そのためにアクセスがない状態でもモータを回転し続ける必要があり、大量に無駄な待機電力を消費する。しかしこのデータトラックに見立てた磁性細線に電流を印加すると伝導電子のスピントルク効果でデータ列を記録再生ヘッドの位置まで移動する事ができる。これはアクセス時のみ電力を使うのでHDDよりもはるかに省電力化できる。従来、このデータ磁区列移動には大きな電流密度が必要であったが、我々は飽和磁化の小さなTbFeCoアモルファス合金を使って磁壁移動の電流密度を大幅に低減することに成功した。これにより不揮発メモリが実現できる。そこで、本提案ではこの電流による磁区移動を利用した不揮発ロジックを提案し、その基本演算であるAND, OR, NOT動作を当初目標通り達成できたので、その結果を報告する。これらの組み合わせでNAND, NOR, XORなどの演算も可能になる。また、当初目標には書かなかったが、演算結果を次の演算に送るためには、演算結果の複数排出(FUNOUT)が必要であるため、このFUNOUTについても試作し、動作検証できたのでその結果も報告する。

2. 研究の目的

本研究では、低電流駆動磁性細線メモリと全く同じ動作原理で磁壁を移送するだけでロジック演算も可能にする、全く新しい不揮発スピンロジックの原理を提案し、試作を行ってロジックの基本であるAND, OR, NOT演算を実証する事を目的とする。また、高速移動する磁壁移動の観察にも挑戦する。更に、当初目標にはなかったが、演算結果の複数排

出(FUNOUT)についても検証を行う。

3. 研究の実験方法

試料の作製方法を説明する。まず初めに表面を強制酸化したSi基板を作成し、この上にレジストを塗布して、所望の演算パターンを電子線露光する。これを現像して細線パターンのレジストを除去し、超高真空マグネトロンスパッタ装置のロードロック室の基板ホルダーにセットする。真空排気が所望の真空度に達したところでゲートバルブを開いて基板をスパッタ室に移動しTbFeCoをArガス1mTorrの条件下でスパッタパワー50Wで所望の膜厚になるまでスパッタする。更に、この上に表面保護のためPtを2nm成膜する。これを取り出してリフトオフしてから電極をつけてロジック演算の原理確認を行う。この確認には、偏光顕微鏡を用いた。また、この演算出力部にはホールバーも設けてあるため演算結果は異常ホール信号としても検出できる。これはAND, OR, FUNOUT試料の作成方法であるが、NOTの場合には、一旦作成したロジックに再びレジストを塗布し、出力部だけを電子線露光して現像、リフトオフする。演算回路出力部だけむき出しになった試料を再びスパッタ装置にセットし、逆スパッタで表面クリーニングで表面Pt層2nmを除去し、そこにRhを0.4nm(わずか1~2原子層)製膜し、更にTbFeCo層を設け、表面保護にPtを2nm成膜した。

4. 研究成果

(電流駆動型不揮発ロジックの動作原理説明と実験結果)

電流駆動磁壁移動型スピンロジックAND回路の駆動原理説明図を図1に示す。磁性細線には、磁壁駆動電流密度が世界一低いTbFeCoアモルファス合金を用いた。初めに試作回路にTbFeCo膜の保磁力よりも大きな外部磁界を全体に印加することで初期化を行う。次に、AND演算(1, 1)入力を説明する。(1, 1)入力を実現するため入力部INPUT 1および2にそれぞれ一つずつ磁区を形成する。ここで、電流をOUTPUT側からINPUT側に印加すると、伝導電子のスピントルクにより2つの記録磁区は右に移動し、同時に合流部で合体する。一つに合体した磁区はOUTPUT側に移動し、出力1を得る。入力(1, 0)の場合には、INPUT 1にのみ磁区を記録する。次に、電流をOUTPUT側からINPUT側に流すとINPUT 1の磁区は右側に移動し、合流部に差し掛かる。しかし、OUTPUT側の細線幅が広いために記録磁区はOUTPUT側に移動できず消滅する。これはAND演算(1, 0)の出力が"0"であることに対応する。AND入力(0, 1)もこれと同様である。入力(0, 0)については記録磁区が入力部に存在しないため、電流を印加しても何の変化もなく出力は"0"となる。

入力部1、2に記録磁区を設けることで入力信号とする。上段の図では2つの入力部に

Current driven AND LOGIC operations

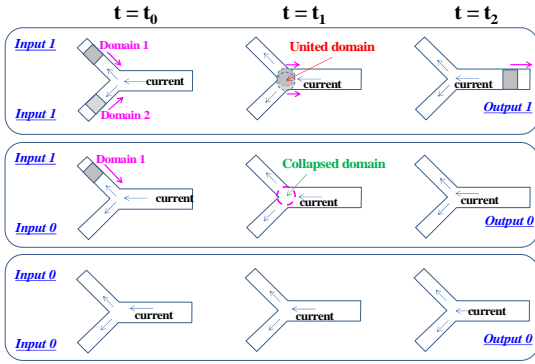


図1 電流で磁壁を駆動するタイプの AND 演算原理説明図

一つずつ磁区を形成している。この状態で右の出力側から入力側に電流を印加すると伝導電子は左から右に動くため、このスピントルクの影響で2つの磁区は右側に同じ移動量で変位し、合流部で一つの磁区に合体する。その後、出力部に移動する。これは(1, 1)入力の結果が、出力(1)であることに対応する。中段は(1, 0)入力、下段は(0, 0)入力の説明図である。

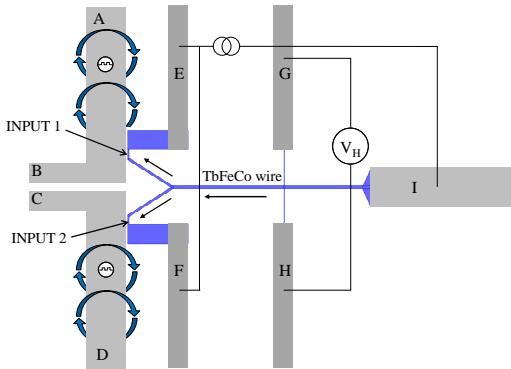


図2 入力部1への信号入力には電極 AB を用い、入力部2の場合には電極 DC を用いる。出力信号はホールバーGH間に生ずる異常ホール電圧で検出する。

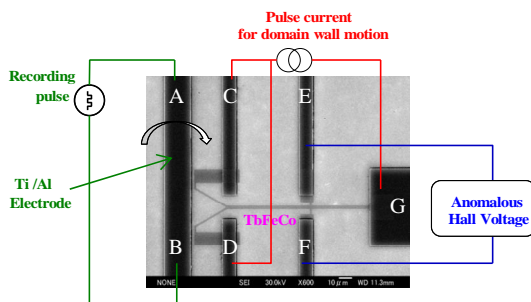
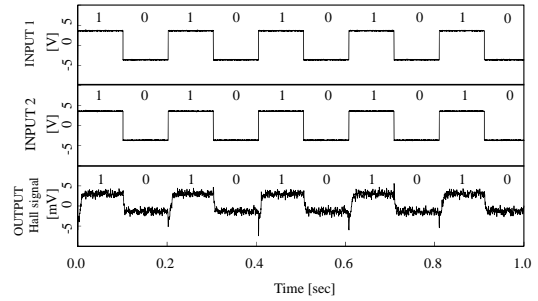


図3 AND 演算用回路の SEM 写真

(a) INPUT (1, 1) OUTPUT (1), INPUT (0, 0) OUTPUT (0)



(b) INPUT (1, 0) OUTPUT (0), INPUT (0, 0) OUTPUT (0)

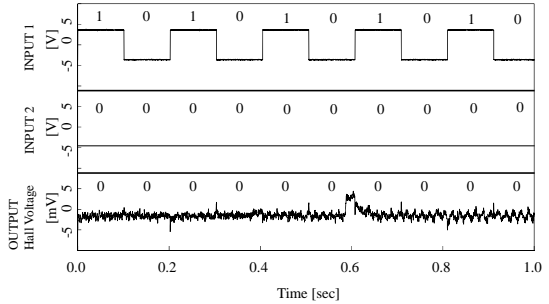


図4 (a)AND 回路において(1, 1)および(0, 0)の繰り返し入力(上段:入力、中断:入力)に対する演算結果(下段:異常ホール信号)

(b) AND 回路において(1, 0)および(0, 0)の繰り返し入力(上段:入力、中断:入力)に対する演算結果(下段:異常ホール信号)

図2には、このAND回路を実際に駆動するための電極を配した説明図を示す。入力には電流によるエルステッド磁界を用いる。例えば、入力部1への入力には電極 AB を用い、入力部2への入力には電極 DC を用いる。出力結果はホール電圧 GH で検出する。試作したANDロジック回路のSEM写真を図3に示す。出力部の細線太さは入力部の2倍とした。電流密度は入出力部ともに同じとなる。

入力部に(1, 1)と(0, 0)を繰り返し記録し、電流印加でこれらを右側に移動し、合流部で合体させ、出力部のホールバーで異常ホール効果を調べた結果を図4(a)に示す。入力信号に対応した出力結果が確認できた。

入力部に(1, 1)と(0, 0)を繰り返し記録し、電流印加でこれらを右側に移動し、合流部で合体させ、出力部のホールバーで異常ホール効果を調べた結果を図4(b)に示す。入力信号に対応した出力結果が確認できた。

したがって、同様のメカニズムで“OR演算”を行うためには、図5に示すようにOUTPUT部の細線幅を狭くしておけばよい。すなわち、INPUT1に記録した一つの磁区が電流で合流部に到達すると記録磁区はバブル状になってOUTPUT側に移動でき、出力部の信号は“1”となる。入力部の入力磁区1個が合流部で消滅する条件は細線幅以外に磁

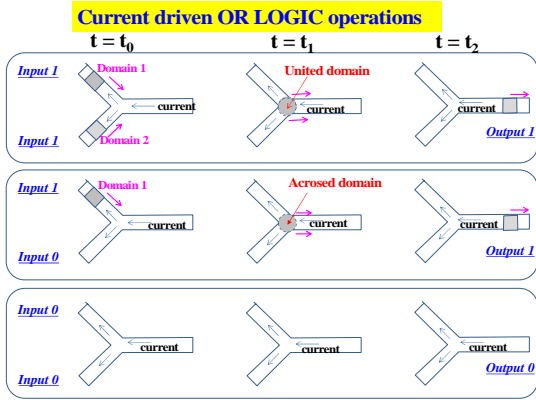


図5 電流で磁壁を駆動するタイプにおける OR 演算回路の動作原理説明図

壁エネルギーと静磁エネルギーのバランスで決まる。NAND または NOR を実現するためには、図6のように上記 AND 回路の出力部の磁区を人工的に反強磁性結合させればよい。

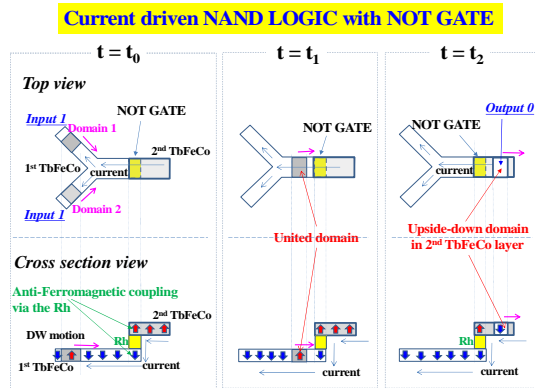


図6 電流で磁壁を駆動するタイプにおける NOT 演算原理説明図。上段は試料を上から見た図、下段は試料を横から見た図になる。演算結果(磁区)が電流により左から右に流れてくると磁区は上の磁性細線に磁気転写されるが、その磁気転写はスピンを逆向きにする。

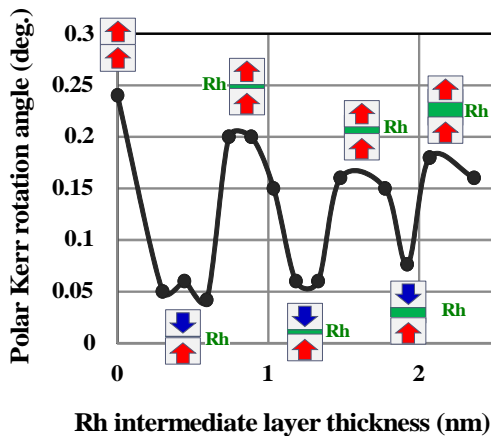


図7 磁性層/非磁性Rh層/磁性層構造における磁気光学Kerr回転角のRh層厚依存性。Rhが0.4nm付近のとき上下磁性層は反強磁性的結合を示す。

この条件を見出すための実験を行った。図7には、TbFeCo(10nm)/Rh(x nm)/TbFeCo(10nm) 3層膜における磁気光学Kerr効果のRh膜厚依存性を示す。用いたレーザー波長は690nmであり、光の侵入長は100nm程度なので2つのTbFeCo層両方の磁気光学効果を示す。Rh層がゼロの場合には、上のTbFeCo層と下のTbFeCo層が互いの交換結合力により強磁性結合するために磁気光学効果は強め合い、大きな磁気光学Kerr回転角を示す。しかし、Rh層を0.4nm(1~2原子層)にすると上下層のTbFeCoは互いに反強磁性結合を示すため磁気光学Kerr回転角は互いにキャンセルするため小さな値になる。更に、Rh層を0.8nm程度に厚くすると2つのTbFeCo層は再び強磁性結合に戻るため大きなKerr回転角を示すようになる。このようにRh中間層の厚みを厚くすると2つのTbFeCo層の結合は強磁性結合、反強磁性結合を繰り返し、Kerr回転角は振動する。

したがって、AND回路出力部のTbFeCo層一部にRhをわずかに2原子層製膜し、更にもう一層のTbFeCoを製膜すると、AND出力された磁区を反転転写して出力できることがわかる。この検証実験用試料を作成した。試作では、第1層目のTbFeCo磁性細線の出力部に完全に一致させて2番目のTbFeCo層を形成する事が難しく、少し斜めになって磁性細線を結合させた。この複雑な作成法のため磁気コントラストを明瞭にした磁区観察を行う事が困難だったため、初期イメージをメモリに蓄え、電流で磁壁が移動した磁気イメージをメモリに蓄え、両者に減算を施すことで磁壁の移動を確認した。

このように、AND, OR, NOT回路の原理検証に成功した。また、この駆動に必要な電流密度は世界一低い値であり、異常ホール効果の信号から磁壁移動速度は数10m/secと高速であることも検証できた。更に、本研究の目的を全てクリアできたので、その先の複雑な論理演算に必要なFUNOUT機能の検証も行った。実験には、図5に示したOR回路の左右逆パターンを用い、一つの出力磁区を2つに分割して次の演算回路に送り出すことに成功した。分割磁区の移動速度に差が生ずると、FUNOUTの誤動作となることが心配されたが、誤動作起こすことはなかった。このように、本提案で磁壁移動型メモリ&ロジックが実現できる可能性を示すことができた。これは、現在計算速度が頭打ちになっている状態をブレークできる可能性を示すものであり、この不揮発性から演算の消費電力を大幅に低減できる可能性も示すものである。

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 6件)

(1) Do Bang, Hiroyuki Awano, "Domain Wall

Motion in Tb/Co multilayer wires with a large domain wall depinning field”, *J. Appl. Phys.* 115, 17D512 (2014)

- (2) Do Bang, Hiroyuki Awano, “Reversal of Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co wires : Size Dependence”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 123001 (2013)
- (3) Do Bang, and Hiroyuki Awano, “Size effect of domain wall magneto resistance in ultrathin TbFeCo wires”, *Korean Phys. Soc.* 62, 1933 (2013)
- (4) Do Bang, Hiroyuki Awano, “Current-Induced Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co wire in presence of Rashba field”, *IEEE. Trans. Mag.* 49, 4390 (2013)
- (5) Do Bang, Hiroyuki Awano, “Current-Induced Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co Wire with Different Interface Structures”, *Appl. Phys. Express* 5, 125201 (2012).
- (6) Masamichi Sakai, Koichi Kakizaki, Shigehiko Hasegawa, Akira Kitajima, Akihiro Oshima, and Hiroyuki Awano, “Design of Spin Polarization Analyzer using Transverse-Longitudinal Correlation in Resistivities Induced by Spin-Orbit Interaction”, *Jpn.J. Appl. Phys.* 52, 013004 (2012).

[学会発表](計 18件)

- (1) “Investigation of current driven domain wall split for FUNOUT function of the new type SPIN LOGIC. (HB-4)” Tatsuyuki Maeda, and H. Awano, The International Magnetism Conference 2014, Dresden, Germany (2014).
- (2) 「電流駆動型磁性細線メモリ & ロジッ

クの基礎検討」 栗野博之, 第 48 回スピネレクトロニクス専門研究会, 中央大学、2014 年 3 月 (招待講演)

- (3) 「Domain Wall motion study for TbFeCo magnetic wire memory」 Hiroyuki Awano, and Do Bang, 第 37 回日本応用磁気学会学術講演会シンポジウム 3pB-2, 北海道大学、2013 年 9 月 (招待講演)
- (4) “Investigation of current driven domain wall motion for RE-TM magnetic wire device. (C18)” Hiroyuki Awano, and Do. Bang, Energy Materials Nanotechnology Fall 2013, Orland, USA, p124 (2013) (Invited).
- (5) “Studies on a current driven domain wall split at the branching path of the TbFeCo magnetic wire” Tatsuyuki Maeda, and Hiroyuki Awano, Magnetism and Optics Research International Symposium MORIS’ 2013, Omiya, Japan, Tu-P-10, p42 (2013).
- (6) “Manipulation of domain wall motion in TbFeCo wires by spin-orbit induced Rashba and Spin Hall Effects” Do Bang, and Hiroyuki Awano, Magnetism and Optics Research International Symposium MORIS’ 2013, Omiya, Japan, Tu-P-12, p46 (2013).
- (7) “Investigation of NOT function for current driven SPIN LOGIC with TbFeCo magnetic wire” Toma Kanehira, and Hiroyuki Awano, Magnetism and Optics Research International Symposium MORIS’ 2013, Omiya, Japan, Tu-P-30, p82 (2013).
- (8) “Temperature estimation of TbFeCo

- magnetic nanowire by using Hall effect measurement” Masaya Kawamoto, and Hiroyuki Awano, Magnetics and Optics Research International Symposium MORIS’ 2013, Omiya, Japan, We-P-09, p114 (2013).
- (9) “Basic study of ferromagnetic /antiferromagnetic transformation in RE-TM multilayer for all optical recording” Hiroaki Ono, Yuji Suzuki, and Hiroyuki Awano, Magnetics and Optics Research International Symposium MORIS’ 2013, Omiya, Japan, Tu-P-15, p126 (2013).
- (10) “Study on current driven domain wall motion of TbFeCo magnetic wire with larger wall coercive force.” Hiroyuki Awano, International Japanese French Workshop on Spintronics, Paris, France (2013). (Invited)
- (11) “Current driven domain wall study of amorphous RE-TM magnetic wire (M6)” Hiroyuki Awano, and Do Bang, Asia Pacific Data Storage Conference APDSC’ 2013, (2013).(Invited)
- (12) “Current-induced domain wall motion in Tb/Co-based multilayer wires : Effect of layerd structure (AU-12)” Do Bang, and Hiroyuki Awano, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials MMM’2013, Denver, USA (2013).
- (13) “Reversal of Domain Wall Motion in Perpendicularly Magnetized TbFeCo Wires : Size Dependence. (RB-02)” D. Bang, and H. Awano, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013, Taichung, Taiwan(2013)).
- (14) “Study on Pt buffer-improved perpendicular magnetic anisotropy of TbFeCo nanowires by extraordinary Hall effect. (BQ-13)” H. Awano, and D. Bang, Joint MMM-INTERMAG 2013, Chicago, USA (2013).
- (15) “Current-induced domain wall motion in perpendicular magnetized Tb-Fe-Co wire in presence of Rashba field. (DC-01)” D. Bang, and H. Awano, Joint MMM-INTERMAG 2013, Chicago, USA (2013)).
- (16) “Basic Research for drastic power saving memory & logic using TbFeCo nanowire (B8)” H. Awano, Energy Materials Nanotechnology Fall 2012, Las Vegas, USA (2012).
- (17) “Study of low current driven spin logic in PMA TbFeCo wire (4aD-9)” T. Kanehira and H. Awano, The 2nd International Conference of Asian Union of Magneics Societies , Nara, JAPAN (2012)).
- (18) “TbFeCo/Rh/TbFeCo planer patterned media with ferromagnetic transition from antimagnetic media by Kr ion irradiation (4aA-4)” H. Ono and H. Awano, The 2nd International Conference of Asian Union of Magneics Society, Nara, JAPAN (2012)).
- 6 . 研究組織
- (1)研究代表者 栗野博之 (Hiroyuki Awano)
豊田工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 40571675
- (2)研究分担者 バン ド (Do Bang)
豊田工業大学・大学院工学研究科・研究員
研究者番号 : 40624804