

ナノピラー型磁性細線を利用した大容量三次元磁壁移動型 細線メモリの実現の試み

Investigation of high density magnetic wire memory using nano-pillar structure

研究代表者 九州大学大学院システム情報科学研究院 助教 黒川 雄一郎

Yuichiro Kurokawa

We investigated three-dimensional race-track memory using horizontal structure and perpendicular structure, and explored wire materials for race-track memory. We found that saturation magnetization should be suppressed for horizontal three-dimensional race-track memory because strong stray field can break magnetic domain structure. The critical current density for race-track memory in Gd-Fe alloy wire is very low. That value is one order of magnitude smaller than that in conventional materials. Micromagnetic simulation showed that the magnetic domain in the magnetic nano-pillar can be controlled by current. This result indicate that we can use magnetic nano-pillar as three-dimensional race-track memory.

要旨

この研究では横型三次元構造、および縦型(ナノピラー型)三次元構造を持つレーストラックメモリについて素子作製、計算機実験などを行った。また、記録に用いる細線材料に関しても希土類磁性体を中心に検討した。結果として、横型レーストラックメモリに関しては、細線材料の飽和磁化を抑えることが重要であることを示した。また、細線材料に関しては、Gd-Fe 合金を用いることで、従来材料よりも動作閾電流密度を 1/10 まで下げることに成功した。ナノピラー型三次元構造では、計算機を用いた実験において、磁区の電流を用いた制御が可能であることを示した。

1. まえがき

近年、スマートフォンなどに代表される小型端末の発展や、モノのインターネット(Internet of Things:IoT)による各種センシングデバイスの展開など、情報化社会の急激な発展により、世界全体で生み出される情報量は爆発的に増大している。したがって、これらの情報を保存しておける低消費電力、高速動作可能な新規メモリの開発が望まれている。現在主流のストレージデバイスはハードディスクドライブ(Hard Disk Drive:HDD)や半導体メモリであるソリッドステートドライブ(Solid State Drive:SSD)

である。HDD は安価で大容量である一方で、動作するためにはディスクの回転を必要とするため低速であり、SSD は機械動作部分がないために高速でかつ大容量であるが、書き込み動作が破壊的であり、寿命が比較的短いという欠点がある。また、高速な半導体メモリであるダイナミックランダムアクセスメモリ(Dynamic Random Access Memory:DRAM)はHDDやSSDに比べさらに高速であるが揮発性であり、常に通電していなければ情報を保存することが不可能である。また、近年の高度な微細化により情報担体である電荷のリークが無視できなくなっており、1秒に数十回も書き込み動作を行わなければ情報が保存できない。従って、今後の新規メモリには、機械的動作部分がなく、寿命が長く、不揮発であるという特徴を持つことが必要である。

磁気ランダムアクセスメモリ(Magnetic Random Access Memory:MRAM)は上記の要求を満たすメモリとして期待されている新規メモリである。MRAMは機械的動作部分がなく、情報担体が磁性体の磁化の向きであるために不揮発性を持ち、また寿命も理論上はほぼ無限である。しかしながら、通常のMRAMは製造工程が複雑であり、また、磁性体の熱安定性の問題から微細化が困難である。このため、MRAMはビット当たりのコストが非常に高くなってしまふ。これらの問題を解決するためにIBMのParkinらはレ

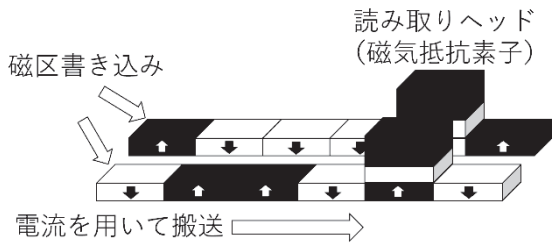


図1 レーストラックメモリの概要図

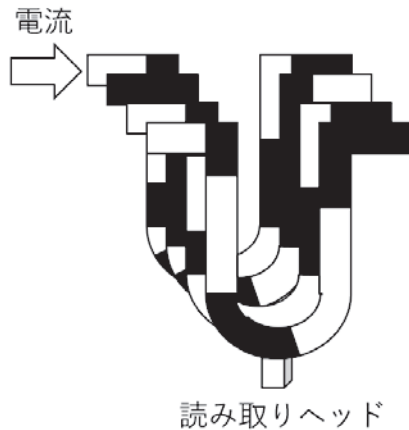


図2 従来型三次元レーストラックメモリの概要図

ーストラックメモリと呼ばれる新たなメモリを発表した。⁽¹⁾ 図1に概要図を示すが、レーストラックメモリは磁性細線の磁区を情報担体とし、その磁区を電流によって搬送することで、メモリの書き込みと読み込みをものである。通常のMRAMが読み取りヘッドである磁気抵抗素子を一つのビットにそれぞれ割り当てることにに対し、レーストラックメモリでは、図に示すように、一つの磁気抵抗素子に対して、多数のビットを割り当てる事が可能である。したがって、ビット当たりのコストを大きく下げることが可能である。一方で、図1に示すような細線を横に寝かせる二次元配置では実用化に十分なデータ密度を得ることができない。この問題を克服するために、図2に示すような三次元構造が提案されている。これはシリコン基板上にトレンチ構造を作製し、その側壁及び底面に細線を製膜するというものである。しかしながら、アスペクト比の大きいトレンチ構造を作製することは難しく、また、その側面に均一な磁性細線を作製することも簡単ではない。そこで、本研究では比較的容易に作製可能な三次元構造を提案する。具体的には図3に示すような横型

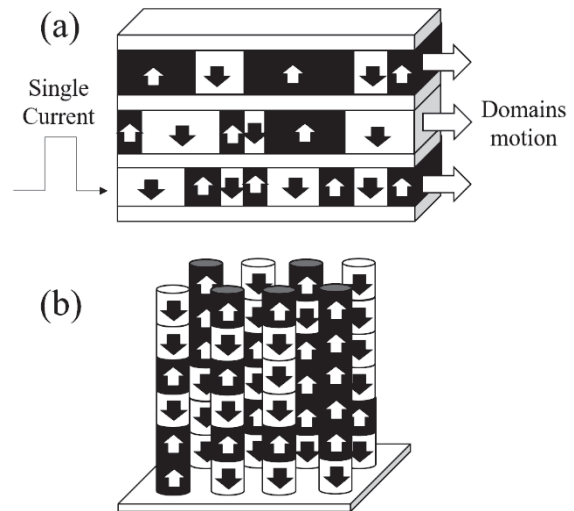


図3 提案する三次元レーストラックメモリの概要図

- (a) 横型三次元レーストラックメモリ
- (b) 縦型三次元レーストラックメモリ

の三次元構造と縦型（ナノピラー型）の三次元構造の二種類である。本研究ではこれらの構造の磁性細線の基本的な動作現象について検証した。

2. 横型三次元構造^[5]

横型の三次元構造は図3 (a)に示すように、磁性細線をスペーサ層を挟んで多層化したものである。このような構造は、二次元構造を作製する手順で多層化するだけであるので、素子の作製は比較的簡単に行えると予想される。これまでの研究において、我々の研究グループではTb-Co磁性細線をもちいて、このような多層化した磁性細線のレーストラックメモリとしての動作検証を行っている。その結果、Pt/Tb-Co/Ta/Tb-Co/Pt多層膜を使用することにより、記録層であるTb-Coにそれぞれ異なる磁区列を記録しても、それぞれ電流で磁区を搬送できることを証明した。⁽²⁾ 一方で、レーストラックメモリの読み取りヘッドは磁気抵抗素子であるために、記録層の材料は、大きな磁気抵抗率を示すCoFeBを用いることでより実用的になることが考えられた。この節では、CoFeBを記録層として用いた横型三次元レーストラックメモリの結果について述べる。

2.1 試料作製

磁区は電流によって発生するトルクによって動かされるが、この電流誘起磁壁移動現象を発生させる

TaO _x
MgO
CoFeB
Ta
MgO
CoFeB
Ta
Si/SiO ₂ sub.

図4 CoFeB 多層膜の構造

ためには、磁性層にスピン軌道相互作用の大きい重金属層が隣接している必要がある。⁽³⁾ この理由の一つが、重金属と磁性体の界面で発生するジャロシンスキー守谷相互作用 (dzyaloshinskii-moriya interaction:DMI) が、磁区と磁区の境目である磁壁を動かすために必要であることである。重金属-磁性体界面で発生する DMI は重金属層の持つ強いスピン軌道相互作用によって、磁性体中の隣り合った磁化が 90 度の傾きで整列した場合に最も安定になるような相互作用を付与する。そのため、磁区と磁区の境目である磁壁の構造が、カイラリティを持ったネール磁壁に変化する。また、もう一つの理由が、重金属層で発生するスピンホール効果 (Spin Hall Effect:SHE) が必要なことである。SHE は電流に対して直行する方向へスピンの流れであるスピン流を発生させる。これは、重金属層と磁性体層がそれぞれ隣接している場合に、重金属層で発生したスピン流が磁性体層に流れ込むことを意味している。この SHE から発生したスピン流が磁性体の磁化にトルクを与え、磁化の構造に変化を与える。この SHE と DMI がともに存在している場合に、電流によって磁壁を動かすことが可能となる。具体的には、磁性体のカイラリティを持ったネール磁壁にスピン流が流れ込むと、ネール磁壁内の磁化に Slonczewski torque を与え、垂直方向に有効磁場を発生させる。ネール磁壁はカイラリティを持つため、この有効磁

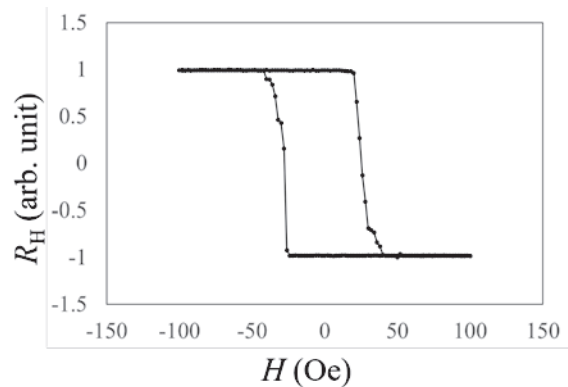


図5 CoFeB 多層膜のホール効果測定結果

場は隣り合った磁壁でそれぞれ逆方向になり、すべての磁壁を電流の向きに沿った方向へ動かすことが可能となる。これにより、磁壁を電流によって動かすことができる。この項では磁性体に CoFeB また、重金属層には Ta を用いた結果を示す。

磁性体である CoFeB 及び Ta は DC スパッタリングによって堆積した。また、磁壁を動かすためには磁性体の磁化が基板に対して垂直を向いている必要がある。この垂直磁気異方性を CoFeB に与えるために界面磁気異方性を与えることが可能な MgO を CoFeB の上に堆積した。本研究ではこの Ta/CoFeB/MgO 多層膜を二層重ねたものを作製した。具体的な試料構造を図 4 に示す。試料作製後に CoFeB に垂直磁気異方性を与えるために、250 度一時間で熱処理を行った。

2. 2 結果

図 5 に試料のホール効果測定の結果を示す。図にみられるように、ホール効果の結果は明確な角型のヒステリシスを示し、試料が垂直磁気異方性を持つことがわかる。一方で、ホール効果のループは磁化反転の際にステップを持たず、以前の Pt/Tb-Co-Ta/Tb-Co/Pt の結果と異なることが分かった。このステップは磁化反転が二度起きていることを示しており、Tb-Co の例では、上の Tb-Co 層と下の Tb-Co 層が磁氣的に結合しておらず、かつ上の Tb-Co 層と下の Tb-Co 層で保磁力が異なるために、それぞれの層で異なる磁場で磁化反転が起きていることを示している。したがって、CoFeB を用いた結果では、上の CoFeB 層と下の CoFeB 層が磁氣的に結合している可能性が考えられた。これは、それぞれ

の層で異なる磁区列を持つこ

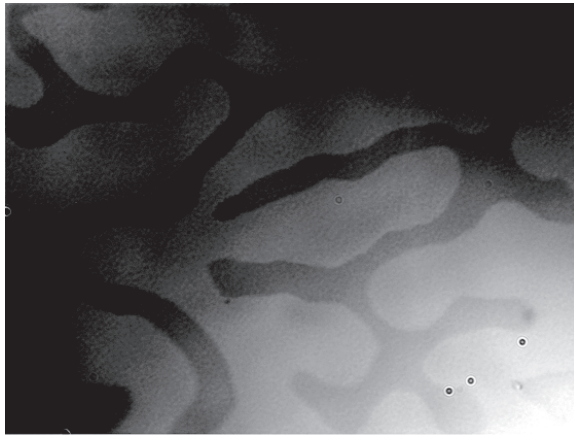


図6 CoFeB多層膜のKerr効果顕微鏡像

とが許されず、横型3次元構造のレーストラックメモリとして使用できないことを示している。次に、CoFeB試料のKerr効果顕微鏡による磁区の直接観察の結果を図6示す。図から、試料はメイズ型の磁区を持つことが分かる。試料の飽和磁化が大きいために静磁的な安定構造を取ろうとするために、このような磁区構造になっていることが考えられる。Tb-Coの飽和磁化が50emu/cc程度であることに対してCoFeBは1000emu/cc以上の飽和磁化を持つ。この大きな飽和磁化が漏れ磁界となり、上の層と下の層の磁気的な結合を引き起こしたと考えられる。したがって、CoFeBを横型三次元構造のレーストラックメモリとして用いるためには、この大きな飽和磁化を打ち消す必要があると考えられる。具体的には、層間反強磁性(synthetic anti-ferromagnetic:SAF)結合を持つ構造に変えるなどして、漏れ磁界を減らす必要があると考えられる。

3. 希土類磁性細線^{[1-4], [6-8]}

レーストラックメモリのヘッドには磁気抵抗素子が用いられるため、細線材料としてはCoFeBが良いと考えられる一方で、電流誘起磁壁移動を引き起こす最小の電流密度である閾電流密度がCoFeBは大きいという欠点が存在する。閾電流密度が飽和磁化に比例するために、大きな飽和磁化を持つCoFeBでは大きくなる考えられる。一方、Gd-FeやTb-Feといった希土類垂直磁化膜はGdなどの希土類元素とFeなどの遷移金属元素の磁化が反平行にそろって

り磁性を持ち、飽和磁化が小さいという特徴を持

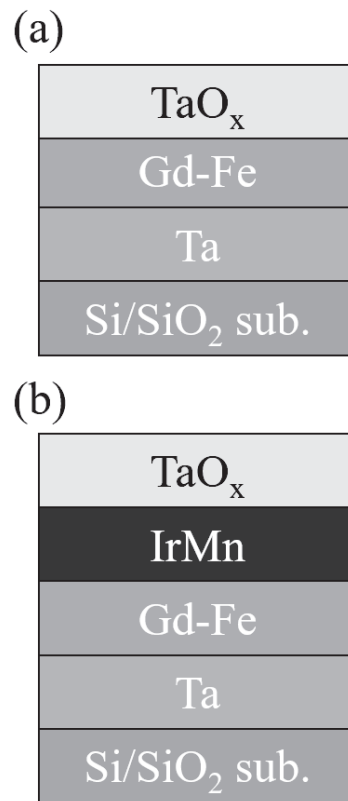


図7 Gd-Fe磁性細線の構造

(a)磁壁移動観察試料

(b)IrMn挿入試料

つ。したがって、希土類垂直磁化膜を細線材料として用いることで電流誘起磁壁移動の閾電流密度を低減させることができると予想される。この項では、三次元レーストラックメモリに用いる候補材料として希土類垂直磁化膜において電流誘起磁壁移動を観察した結果を述べる。

3.1 試料作成

希土類垂直磁化膜として、DCスパッタリングを用いて、GdとFeのターゲットをコスパッタすることによってGd-Fe合金薄膜を作製した。また、スピントルクを導入するための重金属層としてはTaおよびIrMnを用いた。試料の構造を図7に示す。また、Gd-Fe合金膜にTbをドーブした試料も作製した。Gd-Feに比べTb-Feは一桁大きな磁気異方性を持ち、したがってTbをドーブすることにより、データの熱安定性を上げることができると考えられる。

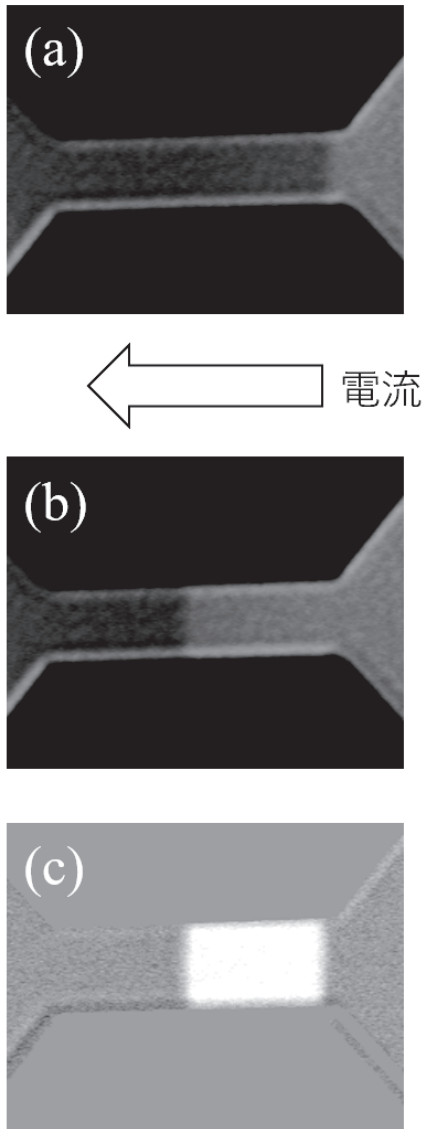


図8 Gd-Fe 細線の Kerr 効果顕微鏡像

- (a)パルス電流印可前
- (b)パルス電流印可後
- (c)差分画像

3.2 結果

図8にGd-Fe磁性細線の磁壁移動を観察したKerr効果顕微鏡の観察結果を示す。図に示されるように、電流を印可することによって、磁壁は明確に電流方向へ移動していることが分かる。磁壁移動の電流密度依存性を測定し、閾電流密度を見積もった結果、 $3 \times 10^{10} \text{A/m}^2$ 程度の値となった。これは、よく研究されているCo/NiやCoFeBなどの磁性膜の約1/10程度の値である。^(4,5)したがって、Gd-Fe磁性細線はレーストラックメモリの有望な材料であると考えられる。

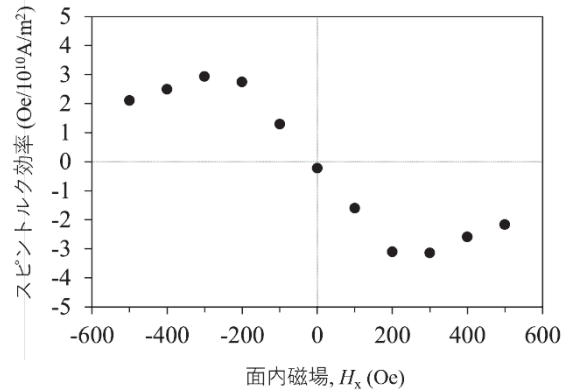


図9 IrMnを有するGd-Fe細線のスピントルク効率測定結果

次に、重金属層としてTaを下部層にIrMn上部層に使用し、Gd-Fe合金を重金属層で挟み込んだ試料を作製し、磁壁の駆動力であるスピントルクの大きさを見積もった。スピントルクの大きさの見積もりは、一定面内磁場を印可しながら電流を流し、ホール効果を観察することで行った。^[2]一定面内磁場下では電流によって有効磁界が発生するため、ホールループがシフトする。このシフト量を見積もることによってスピントルクの大きさを見積もることができる。図9にその面内磁場に対するトルクの効率を示す。この飽和したトルクの値からSHEからトルクへの変換効率である、実効スピンホール角を見積もることができる。実効スピンホール角はTaのみの場合が0.009であり、IrMnを用いることで0.021になり、IrMnを用いることで約二倍の値になることが分かった。

次に、TbをGd-Feにドーピングした場合のスピントルクを見積もった。Tbをドーピングしていくと、全体に占めるTbの元素比が4, 8, 11 at.%と変化した場合に実効スピンホール角は、0.019, 0.0022, 0.00045と変化した。つまり、Tbをドーピングすることにより一時的に実効スピンホール角が大きくなり、その後減少に転じることが分かった。これは、磁性層とTaとの間のスピン流の通り抜けやすさであるスピンミキシングコンダクタンスが、Tbのドーピングにより変化するためであると考えられる。このことから、閾電流密度が低くかつ熱安定性の良い細線を作製するためには、スピンミキシングコンダクタンスを適切に制御する必要があることが分かった。

4. 縦型(ナノピラー型)三次元構造

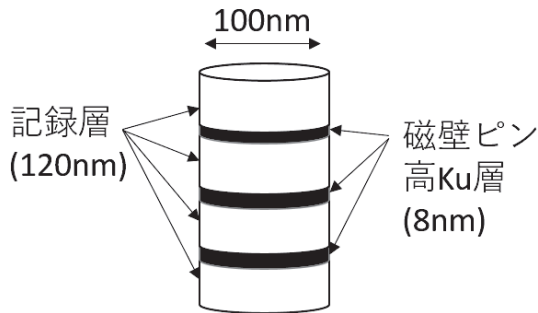


図10 計算に使用した素子構造

縦型三次元構造は図 3(b)に示すように、ナノピラー型の垂直細線を配列したものである。このような細線は、シリコンのトレンチ穴に細線を配列するよりも加工が容易であると考えられるため、実現可能性が高いと考えられる。この項では、実際に素子を作製する前段階として、ナノピラー型細線の動作について、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて計算機実験を行った結果を述べる。

4.1 マイクロマグネティックシミュレーション

マイクロマグネティックシミュレーションは LLG 方程式:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}) + \frac{\alpha}{M} \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \quad (1).$$

を解くことで行う。ここで、 M は磁化、 H は磁場、 γ はジャイロ磁気定数、 α はダンピング定数である。ナノピラー型の磁性細線では、原理的に重金属層を隣接させられないために、スピントルクを重金属層から注入することは難しい。従って、この計算機実験ではスピントルク (spin-transfer torque:STT) を使用して、磁壁を動かした。STT は伝導電子のスピンの角運動量を局在スピンの受け渡すことで発生するトルクである。このようなトルクによる磁壁の移動は Co/Ni などの実験で実際に確かめられている。⁽⁴⁾ 今回はこのトルクを計算上で導入することで磁壁を動かした。

実際のマイクロマグネティックシミュレーション

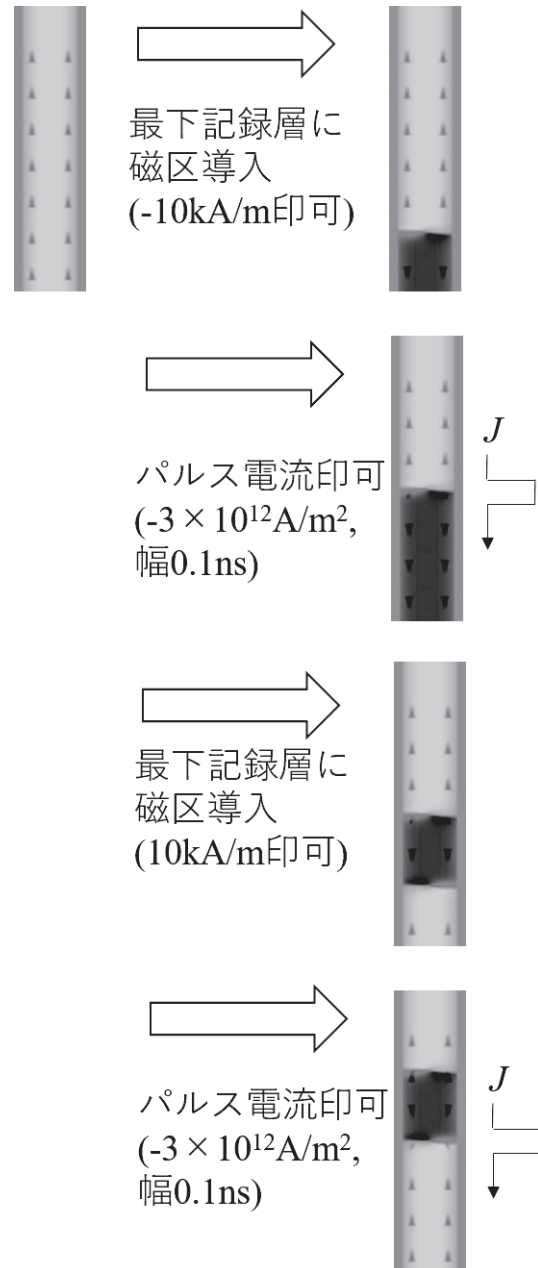


図11 シミュレーションの結果

は mumax³ というマイクロマグネティックシミュレータを使用して行った。⁽⁶⁾ mumax³ は GPU を使用したマイクロマグネティックシミュレータで、GPU による並列計算により CPU のみの場合と比べ、100 倍近い計算速度で計算することが可能である。

計算を行った素子構造を図 10 に示す。素子は、記録層である高さ 120nm 直径 100nm の層で構成され、記録層と記録層の間には磁壁をピン止めするための高い磁気異方性 Ku を持つ層を 8nm 挿入している。

4.2 結果

まず初めに、素子全体の磁化を垂直方向に向けた。その後、図 11 に示すように最下記録層に -10kA/m の磁場を印可することで、磁区を導入、すなわちデータの書き込みを行った。図 11 は磁場を印可したのちに緩和を行った結果を示している。図に示されるように、書き込んだ磁区は消滅したり拡大したりせずに磁壁ピン止め層によって磁壁がピン止めされ、データが安定に存在していることが分かる。その後、細線上から下に向けてパルス電流を印可した。図に示されるように STT によって、磁壁が電流と逆方向に進んでいることが分かる。次に、最下記録層に 10kA/m の磁場を印可し、データの書き込みを行った。次にもう一度電流を印可し、磁壁を移動させた。図に示されるように、磁壁は電流によって動かされ、孤立磁区が安定に移動していることが分かる。また、磁壁はピン止め層によってピン止めされ、一つのデータビットが安定に存在できることが分かる。

5. まとめ

横型三次元構造、および縦型(ナノピラー型)三次元構造を持つレーストラックメモリについて素子作製、計算機実験などを行った。細線材料についても検討を行った。

1. 横型三次元構造においては、細線材料として磁気抵抗率の大きい CoFeB を用いることを検討したが、飽和磁化が大きく、上下層で磁氣的に結合し、三次元的に磁区を記録することが困難であることが分かった。これを解決するためには層間反強磁性結合などの技術を用いて漏れ磁界を小さくすることが重要であると考えられた。
2. 細線材料に関しては、 Gd-Fe 合金をベースに検討を行ったが、飽和磁化の小さいフェリ磁性体である Gd-Fe を用いることによって、従来よりも動作閾電流密度を $1/10$ 程度まで低減させることが可能であることを示した。また、 IrMn をスピントルク注入層として用いることで、発生するスピントルクが増大することが分かった。さらに、磁区の熱的安定性を増大させるために Tb を Gd-Fe にドーブしたところ、重金属層から

発生するスピントルクが急激に減少することを示した。これは、重金属層で発生したスピントルクが強磁性体層に注入される際の透過率を示すスピントルクミキシングコンダクタンスが Tb をドーブしたときに低下することが考えられた。したがって、界面でのスピントルクミキシングコンダクタンスを適切に制御することが良い細線材料を作製する際に重要になると考えられる

3. ナノピラー型の三次元構造に関しては、素子を設計し、計算機によって、シミュレーションを行った。その結果、磁壁をピン止めする層を記録層と記録層の間に導入することで、磁壁の位置を制御可能であることを示した。今後はシミュレーション結果をもとに実際に素子を作製し、磁壁の移動を観察する予定である。

発表論文

- [1] Y. Kurokawa, M. Wakae, S. Sumi, H. Awano, K. Ohnishi, and H. Yuasa, Spin-orbit torque-driven current-induced domain wall motion in Gd-Fe magnetic wires, *JJAP*, 58, 030905 (2019).
- [2] M. Wakae, Y. Kurokawa, and H. Yuasa, Observation of spin-orbit torque-induced magnetization switching in Gd-Fe perpendicular magnetized wire with in-plane exchange bias field, *JJAP* 58, SBBI02 (2019).
- [3] Y. Kurokawa, M. Wakae, R. Yoshimura, H. Kondo, S. Sumi, H. Awano, and H. Yuasa, Investigation of current-induced domain wall motion in Gd-Fe alloy wire with low domain wall propagation field, 第65回応用物理学会 春季学術講演会, 17p-P10-88, 早稲田大学 (2018/03).
- [4] M. Wakae, Y. Kurokawa, and H. Yuasa, Observation of spin-orbit torque-induced magnetization switching in Gd-Fe perpendicular magnetized wire with in-plane exchange bias field, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials, A-8-04, Tokyo, Japan (2018/09).
- [5] Y. Kurokawa, S. Sumi, H. Awano, and H. Yuasa, Multilayered current-induced domain wall motion for high density magnetic memory, 9th Joint European Magnetic Symposia, P-C.034, Mainz, Germany. (2018/09)
- [6] 黒川雄一郎、若江将和、鷲見聡、栗野博之、大西紘平、湯浅裕美、“希土類合金磁性細線を用いた電流誘起磁壁移動の

温度依存性の測定” マグネティックス/電子材料合同研究会,
MAG-19-022, 名古屋大学 (2019/03)

- [7] M. Wakae, M. Itoh, Y. Kurokawa, K. Ohnishi and H. Yuasa,
Observation of spin-orbit torque magnetization
switching in Gd-Fe perpendicular magnetized wire with
IrMn cap layer, 第66回応用物理学会 春季学術講演会,
9p-PB1-70, 東京工業大学 (2019/03).
- [8] 伊藤正裕, 若江将和, 黒川雄一郎, 大西紘平, 湯浅裕美
“Tb-Gd-Fe 細線におけるスピノービットトルクのTb濃
度依存性” 日本物理学会第74回年次大会, 14pS-PS-18,
九州大学 (2019/03).

参考文献

- (1) S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas: “Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory”, *Science* Vol. 320, No. 5873 pp.190–194 (2008).
- (2) Y. Kurokawa and H. Awano: “Multilayered current-induced domain wall motion in Pt/Tb-Co/Ta/Tb-Co/Pt magnetic wire”, *AIP Advance* Vol. 8 p. 025309 (2018).
- (3) S. Emori, U. Bauer, S. M. Ahn, E. Martinez, and G. S. D. Beach, “Current-driven dynamics of chiral ferromagnetic domain walls”, *Nat. Mater.* Vol. 12, No. 7 pp. 611–616 (2013).
- (4) T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono: “Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire”, *Nat. Mater.* Vol. 10, No. 3 pp. 194–197 (2011).
- (5) J. Torrejon, J. Kim, J. Sinha, S. Mitani, M. Hayashi, M. Yamanouchi, and H. Ohno, “Interface control of the magnetic chirality in CoFeB/MgO heterostructures with heavy-metal underlayers” *Nat. Commun.* Vol. 5, pp. 4655 (2014).
- (6) A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. Van Waeyenberge: “The design and verification of MuMax3”, *AIP Advance*, Vol 4, p.107133 (2014).