

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560318

研究課題名（和文）フェリ磁性積層構造を利用した高密度ナノワイヤメモリの基礎研究

研究課題名（英文）Basic study of high-density nanowire memories by using ferrimagnetic multilayers

研究代表者

小峰 啓史 (KOMINE Takashi)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90361287

研究成果の概要（和文）：本研究では、電流誘起磁壁移動を利用したナノワイヤメモリにおいて、磁壁移動のための閾値電流密度低減、及び、高密度化を検討するために、物性値及び素子構造を検討した。物性値が閾値電流密度に及ぼす影響を検討したところ、飽和磁化低減が閾値電流密度低減に有効な手段であることを明らかにし、補償組成近傍のフェリ磁性体はその有力な候補であることを提案した。また、高密度化を実現するための構造として、グラニューラ磁性膜、連続磁性膜を積層した二層ナノワイヤを提案し、高密度化見通しを示した。

研究成果の概要（英文）：In order to reduce a critical current density in nanowire memories based on spin-transfer torque effect, the effect of material parameters on the critical current density has been investigated. In order to realize high-density bit, the effect of nanowire structure on recording density has also been studied. As a result, the reduction of the saturation magnetization is an effective way to reduce the critical current density, and we have proposed that a ferrimagnetic material near the compensation composition is a strong candidate for the low current operation. Moreover, we have proposed the bilayer nanowire consisting of a granular layer and a continuous layer to achieve high-density bit further than that of single-layered nanowires.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気メモリ、ナノワイヤ、スピントランスファートルク、磁壁移動

## 1. 研究開始当初の背景

近年、スピン注入あるいはスピントランスファートルク効果によるスピン制御デバイスが盛んに研究されている。スピントランスファートルク効果は、Slonczewski や Berger

らによって理論的に提案され、近年では、スピン注入書き込み MRAM や磁壁移動型デバイスの実験が盛んに行われている。スピントランスファートルクによる磁壁移動型デバイスとしては、Parkin によって提案され

たシーケンシャルアクセスメモリである **Magnetic Race-Track Memory** が挙げられる。磁壁移動型メモリである **Magnetic Race-Track Memory** は、電流による磁壁駆動を用いた逐次アクセス型メモリであり、磁壁の電流駆動およびナノワイヤによる 3 次元集積のアイデアは実用上興味深いばかりではなく、構造の工夫によっては新しい論理素子などの可能性も秘めている。しかし、磁壁移動型メモリは、情報安定保持のための工夫が十分でないこと、磁壁を移動するのに必要な閾値電流密度が高いという問題がある。

閾値電流は磁壁幅などに関係していることが知られている。低温ではあるが **GaMnAs** において、従来金属強磁性ナノワイヤで報告されている閾値電流よりも極端に低い電流密度で磁壁移動が起こることが報告されており、材料設計による磁壁幅の低減などによって閾値電流を下げる事が可能であると期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、電流誘起磁壁移動を利用したナノワイヤメモリにおいて、磁壁移動のための閾値電流密度低減、及び、高密度化を検討するために、物性値及び素子構造を検討した。

材料としては、希土類-遷移金属フェリ磁性体の垂直磁化膜が候補材料として考えられるため、フェリ磁性体を重点的に調べる。

## 3. 研究の方法

ナノワイヤメモリを高密度にするためには、

(1) 磁壁間相互作用の低減

(2) 短ビット安定化のための構造上の工夫が必要である。

(1)を実現するためには、低飽和磁化材料による静磁気相互作用の低減及び磁壁幅の低減が考えられる。(2)については、垂直磁気記録で実用されている積層構造の検討が挙げられる。

本研究では、低飽和磁化かつ垂直磁気異方性を有する希土類-遷移金属(**RE-TM**)フェリ磁性体に着目し、磁壁間相互作用の低減を図る。**RE-TM** は希土類添加量に応じて、飽和磁化、キュリー点、磁気異方性を変化させることが出来る。また、ジャイロ磁気定数やスピン分極率も同時に変化すると期待される。したがって、組成依存性を中心に材料を検討して、磁壁間相互作用が小さく、磁壁幅の狭い材料を提案する。第一原理計算によるスピン分極率の見積り、及び、マイクロマグネティックシミュレーションを行い、フェリ磁性体の組成が磁壁電流駆動に及ぼす影響を明らかにする。さらに、最適組成での材料作製を通じて、本提案を実験的にも検証する。垂直磁気記録ハードディスクで実用化され

た **Continuous-Granular Coupled (CGC)** 媒体構造を参考に、積層構造による高密度化及び磁壁の安定駆動の可能性も検討する。ハードディスクと同様、ナノワイヤメモリを高密度化するためには、磁性粒子が磁氣的に分離した構造が望まれる。一方で、磁壁を動かすためには、磁性粒子間に流れる高効率スピン流が必要であり、高密度化と高効率磁壁駆動は相反する要求である。提案者は、以前の検討結果から、ナノワイヤメモリを高密度にするための磁氣的分離層としてグラニューラ磁性膜との積層構造が望ましいと考えている。非磁性酸化物を用いたグラニューラ磁性膜は、磁氣的及び電氣的にも分離しているため、磁壁駆動のためのスピン流は磁壁移動層にのみ作用する。一方、グラニューラ層とフェリ磁性連続層(磁壁移動層)の間に働く交換結合により、磁壁移動層の磁化を高密度に記録・保持することが可能である。基本構造は、**Sonobe**らが報告した **CGC** 媒体と同様であり、高密度化が期待できる。本研究では、上記積層構造の基本原理及び磁壁電流駆動を、計算機シミュレーション及び実験により検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 閾値電流密度の低減

ナノワイヤに用いる材料を探索するために、物性値が閾値電流密度に及ぼす影響をマイクロマグネティックシミュレーションにより調べた。物性値として、磁壁幅に影響を及ぼす交換ステイフネス定数、磁気異方性定数を変えて、閾値電流を調べたところほとんど閾値電流密度に影響を及ぼさないことが分かった。次に、飽和磁化を変えて同様に閾値電流密度を調べたところ、飽和磁化の二乗に比例して、閾値電流密度が減少することを明らかにした。しかし、一般的な垂直磁化膜の場合、飽和磁化を減少させると、ほぼそれに比例して磁気異方性も劣化してしまうた

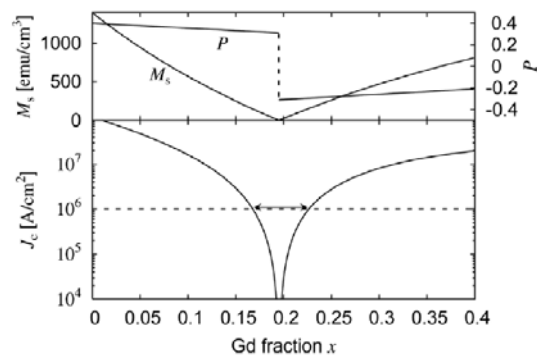


図1 フェリ磁性体における閾値電流密度

め、垂直磁化ナノワイヤに出来ない。一方、補償組成近傍のフェリ磁性体では、希土類-

遷移金属サイトで反平行に配列する磁気モーメントがあるため、平均の飽和磁化が減少しても、磁気異方性は劣化しない。

上記思想に基づいて、フェリ磁性体 GdCo の組成が閾値電流密度に及ぼす影響を調べた。閾値電流密度の組成依存性を図 1 に示す。ただし、閾値電流密度を算出するためには、スピン分極率が必要であり、先行研究で示されたスピン分極率を仮定した。これについては、今後議論の余地があるものとする。図 1 を見ると、補償組成近傍で飽和磁化が 0 に近づくにつれて、閾値電流密度が劇的に減少していることが分かる。従来検討されてきた Co/Ni ナノワイヤに比べて、組成調整により、2 桁以上閾値電流密度を低減出来る可能性を示している。

前述のように、材料が本来持つ閾値電流密度に最も支配的な物性値は飽和磁化であることを明らかにした。しかし、ナノワイヤを作製する際に、薄膜の物性値分散及び加工によるエッジラフネスが発生する。このような物性値分散やエッジラフネスは磁壁の運動を妨げる磁壁ピン止めになる可能性があり、閾値電流密度の増大が懸念される。本研究では、磁壁ピン止めが閾値電流密度に及ぼす影響も調べた。ピン止めの強さを変えて計算した閾値電流密度を図 2 に示す。Tatara らが報告しているように、閾値電流はピン止めの強さに応じて、3 つの領域に分類出来る。閾値電流密度はピン止めの強さに対して単調に増加する傾向にある。しかし、非常に強いピン止めがあった場合でも、飽和磁化による閾値電流密度の低減は有効であり、低飽和磁化・垂直磁化を有するフェリ磁性体の優位性は失われないことがわかる。

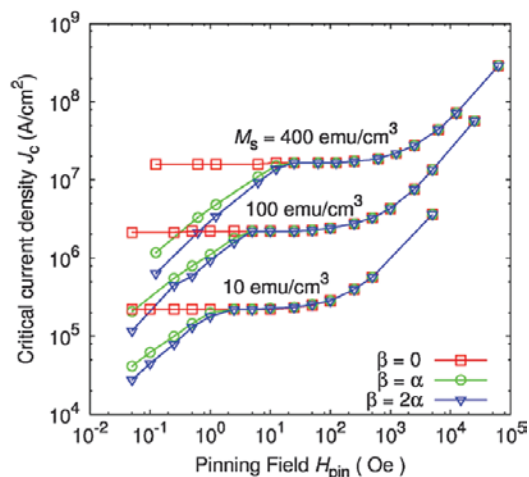


図 2 ピン止めがある系における  
閾値電流密度

## (2) 積層構造による高密度化

ナノワイヤメモリを実用化するためには、

低消費電力動作とともに、高密度化の可能性も検討する必要がある。Magnetic race-track memory はトランジスタ当りの情報量を原理的に多く出来るものの、短ビット化の可能性については未だ調べられていない。研究当初、多ビットの情報を転送するシミュレーションを行ったところ、転送中に磁壁が消失することが懸念され、情報の安定保持の構造が必要であることがわかった。一般には、ナノワイヤエッジに切り込みを入れて、安定化を図る方法が提案されているが、密度の向上とともに厳しい加工精度が要求されるため、現実的ではない。本研究では、ハードディスクの積層構造にヒントを得て、積層ナノワイヤ構造を提案し、その動作を調べた。

多層ナノワイヤの構造を図 3 に示す。電流誘起磁壁移動によってデータを転送する連続磁性膜で構成されたデータ転送層に加えて、情報を保持するためのデータ安定層を付与した。データ安定層はグラニューラ磁性層を想定している。通常グラニューラ磁性層は SiO<sub>2</sub> や TiO<sub>2</sub> のような非磁性絶縁体で磁性粒子が分断されており、抵抗は非常に大きいいため、そこでは電流誘起磁壁移動は起こらない。

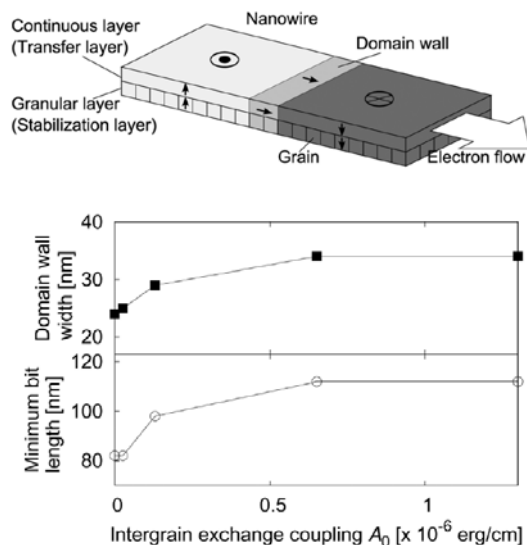


図 3 積層構造ナノワイヤによる高密度化

図 3 に示すように、短ビット化について、従来の単層ナノワイヤと最短ビット長を比較したところ、30nm 以上も短ビットに出来ることがわかった。電流誘起磁壁移動を調べたところ、閾値電流密度は同じ磁壁幅を持つ単層ナノワイヤとほとんど変わらないことも明らかとなった。今後、材料・膜厚比・界面の交換結合などを最適化して、高密度化・高転送速度の可能性についても、実験による原理実証と併せて明らかにする予定である。

## 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 12 件)

- ① 大庭綾香, 藤村勇馬, 小峰啓史, 杉田龍二, ピン止めを有するナノワイヤにおける電流誘起磁壁移動のシミュレーション, *J. Magn. Soc. Jpn.* Vol. 36, No. 3, pp.223-228, 2012. DOI: 10.3379/msjmag.1204R007 (査読有)
- ② A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita, "Influence of interlayer coupling on domain wall motion in multilayered nanowires for achieving high density bit", *IEEE Trans. Magn.* Vol. 48(11), pp.3947-3950, 2012. DOI: 10.1109/TMAG.2012.2201451 (査読有)
- ③ A. Ooba, Y. Fujimura, K. Takahashi, T. Komine, and R. Sugita, "Effect of the pinning field on critical current density for current-induced domain wall motion in perpendicular magnetic anisotropy nanowires", *J. Nanosci. Nanotech.*, Vol. 12, pp. 7411-7415, 2012. DOI: 10.1166/jnn.2012.6544 (査読有)
- ④ T. Komine, A. Ooba, and R. Sugita, "Current-induced domain wall motion in a multilayered nanowire for achieving high density bit", *J. Appl. Phys.* Vol. 111, 07D314/pp.1-3, 2012. DOI: 10.1063/1.3679760 (査読有)
- ⑤ 高橋光太, 大庭綾香, 小峰啓史, 杉田龍二, 低飽和磁化垂直磁気異方性細線における電流誘起磁壁移動の マイクロマグネティックシミュレーション, *J. Magn. Soc. Jpn.* Vol. 35, No. 4, pp.366-369, 2011. DOI: 10.3379/msjmag.1106R007 (査読有)
- ⑥ T. Matsumoto, Y. Ichige, T. Komine, R. Sugita, T. Aono Y. Hasegawa, M. Murata, and D. Nakamura, "Numerical study of effect of surface potential on transport properties in Bi nanowires", *J. Elec. Mater.* Vol. 40(5), pp.1260-1265, 2011. DOI: 10.1007/s11664-010-1406-y (査読有)
- ⑦ Y. Ichige, T. Matsumoto, T. Komine, R. Sugita, T. Aono Y. Hasegawa, M. Murata, and D. Nakamura, "Numerical Analysis of Effect of Scattering Process on Transport Properties in Bi Nanowires", *J. Elec. Mater.* Vol. 40(5), pp.523-528, 2011. DOI: 10.1007/s11664-010-1426-7 (査読有)
- ⑧ T. Komine, K. Takahashi, A. Ooba and R. Sugita, "Reduction of intrinsic critical current density for current-induced domain wall motion by

- using a ferrimagnetic nanowire with perpendicular magnetic anisotropy", *J. Appl. Phys.* Vol. 109, 07D503/pp.1-3, 2011. DOI: 10.1063/1.3545797 (査読有)
- ⑨ 高橋光太, 村上宏, 小峰啓史, 杉田龍二, 磁性細線における電流誘起磁壁移動の交換スティフネス定数依存性, *J. Magn. Soc. Jpn.* Vol. 34, No. 3, pp.259-262, 2010. DOI: 10.3379/msjmag.1003R022 (査読有)
- ⑩ 村上宏, 高橋光太, 小峰啓史, 杉田龍二, 垂直磁気異方性ナノワイヤにおける multi-wall の磁壁移動, *J. Magn. Soc. Jpn.* Vol. 34, No. 3, pp.254-258, 2010. DOI: 10.3379/msjmag.1003R022 (査読有)
- ⑪ T. Komine, M. Kuraishi, T. Teramoto, R. Sugita, Y. Hasegawa, M. Murata, and D. Nakamura, "Numerical analysis of effective thermal conductivity in microwire array element", *J. Elec. Mater.* Vol. 39(9), pp.1606-1610, 2010. DOI: 10.1007/s11664-010-1266-5 (査読有)
- ⑫ T. Komine, K. Takahashi, H. Murakami and R. Sugita, "Influence of exchange coupling on current-driven domain wall motion in a nanowire", *J. Magn. Mater.* Vol. 322, pp.2969-2972, 2010. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.05.015 (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① M. Itoh, A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita, "Dependence of hard-axis anisotropy field on domain wall width for current-induced domain wall motion in nanowires" , 4pPS-48, The 2nd International Conference of the Asia Union of Magnetism Societies (ICAUMS2012), Nara, Japan, Oct. 2-5, 2012
- ② A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita, "Magnetostatic interaction between continuous and granular layers in multilayered nanowires for current-induced domain wall motion", 4pPS-47, ICAUMS2012, Nara, Japan, Oct. 2-5, 2012
- ③ A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita, "Magnetostatic interaction between continuous and granular layers in multilayered nanowires for current-induced domain wall motion", Joint European Magnetic Symposia (JEMS), Parma, Italy Sept. 9-14, 2012
- ④ A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita,

- "Influence of interlayer coupling on domain wall motion in multilayered nanowires for achieving high density bit", FR-01, International Magnetism Conference INTERMAG 2012, Vancouver, B.C., Canada, May 7-11, 2012
- ⑤ T. Komine, A. Ooba, and R. Sugita, "Current-induced domain wall motion in a multilayered nanowire for achieving high density bit", FW-07, 56th Conference on Magnetism and Magnetic Materials(MMM), Scottsdale, Arizona, Oct. 30- Nov. 3, 2011.
- ⑥ 大庭, 藤村, 小峰, 杉田, 「磁壁ピン止めを有するナノワイヤにおける電流誘起磁壁移動のシミュレーション」, 28pE-1, 第35回日本磁気学会学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, 2011年9月27-30日
- ⑦ A. Ooba, Y. Fujimura, K. Takahashi, T. Komine, and R. Sugita, "Effect of the pinning field on critical current density for current-induced domain wall motion in perpendicular magnetic anisotropy nanowires", Recent Trends in Nanomagnetism, Spintronics and their Applications, Ordizia, Spain, June 1-4, 2011
- ⑧ T. Komine, K. Takahashi, A. Ooba, and R. Sugita, "Reduction of intrinsic critical current density on current-induced domain wall motion by using a ferrimagnetic nanowire", GP-08, 55th Conference on Magnetism and Magnetic Materials(MMM), Atlanta, Georgia, Nov. 14-18, 2010.
- ⑨ 高橋, 大庭, 村上, 小峰, 杉田, 「低飽和磁化垂直磁気異方性細線における電流誘起磁壁移動のマイクロマグネティックシミュレーション」, 6aE-6, 日本磁気学会学術講演会, つくば国際会議場, 2010年9月4-7日
- ⑩ T. Matsumoto, Y. Ichige, T. Komine, R. Sugita, T. Aono Y. Hasegawa, M. Murata, and D. Nakamura, "Numerical Study of Effect of Surface Potential on Transport Properties in Bi Nanowires", The 29th International Conference on Thermoelectrics (ICT), Shanghai, China, May 30-June 3, 2010
- ⑪ Y. Ichige, T. Matsumoto, T. Komine, R. Sugita, T. Aono Y. Hasegawa, M. Murata, and D. Nakamura, "Numerical Analysis of Effect of Scattering Process on Transport Properties in Bi Nanowires", The 29th ICT, Shanghai, China, May 30-June 3, 2010

[その他]  
ホームページ等  
<http://storagelab.dmt.ibaraki.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小峰 啓史 (KOMINE TAKASHI)  
茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 90361287

### (2)研究分担者

杉田 龍二 (SUGITA RYUJI)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号 : 20292477

### (3)連携研究者

長谷川 靖洋 (HASEGAWA YASUHIRO)  
埼玉大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 60334158