

機関番号：14301

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2007～2010

課題番号：19671002

研究課題名（和文） 電流誘起スピンドYNAMIXとスピン能動素子への展開

研究課題名（英文）Current-induced spin dynamics and its application to spintronic devices

研究代表者

小野 輝男（ONO TERUO）

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：90296749

研究成果の概要（和文）：

本研究では、微細加工を用いて作り出した磁壁や磁気渦などのモデル系における電流誘起スピンドYNAMIXの物理を明らかにするとともに、これらの知見をいかして電流によるスピンの動的制御を利用したスピントロニクス素子創製を目指して研究を行い、電流誘起磁気コア共鳴運動を利用した3端子素子、磁気コアメモリーの動作実証などの成果を得た。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we aimed to develop the novel spintronic devices utilizing current-induced spin dynamics, and succeeded in demonstrating device operations, such as the three-terminal devices utilizing current-induced resonant vortex core motion and the vortex core memory cell.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	17,200,000	5,160,000	22,360,000
2008年度	22,500,000	6,750,000	29,250,000
2009年度	23,900,000	7,170,000	31,070,000
2010年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
総計	75,300,000	22,590,000	97,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造機能材料

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

金属人工格子における巨大磁気抵抗効果の発見は、電気伝導における電子スピンの重要性を認識させ、電子の二つの自由度である電荷とスピンの両方を利用するスピントロニクスと呼ばれる分野へと発展してきた。巨大磁気抵抗効果は磁化状態変化による電気伝導の劇的変化であるが、研究開始当初は、この逆効果である電流による磁化状態制御が盛んに研究されていた。

電流による磁化状態制御に関する先駆的研究として、スピン注入磁化反転（コーネル大学、*Science*, 285 (1999) 867）、磁壁の電流駆動（研究代表者ら、*Phys. Rev. Lett.*, 92 (2004) 077205）が挙げられる。これらの現象によって外部磁場を使わない磁化制御が可能となり、磁気メモリーや磁気ストレージへの応用研究が国内外で盛んに行われるようになった。

上述したように、研究代表者らはナノ磁性

細線における磁壁の電流駆動の直接観察に世界に先駆けて成功した。この磁壁の電流駆動現象は、磁壁を通過する際に電子のスピン方向が磁壁内の磁気モーメントに沿って回転するため、電子から磁壁にスピン角運動量が受け渡された結果（スピントランスファー効果）である。つまり、この現象は強磁性体中のナノスピン構造である磁壁が電流によって励起された結果と解釈することができる。

研究代表者は、この非一様磁気構造の電流による励起という概念の普遍性を検証するために、強磁性体中の典型的非一様磁気構造である強磁性ナノドット中に出現する磁気渦の電流励起についての研究を行った。強磁性体を円盤状に加工すると、スピンの試料面内で渦のように回転方向に整列する磁気渦構造が安定化され、その中心には直径数ナノメートルの磁気コアが存在することを、応募者らは以前に報告している (*Science*, **289** (2000) 930)。この磁気渦状態に適切な周波数を持つ交流電流を印加すると、電流と磁気コアの相互作用によって磁気コアがドットの中で回り始めることをシミュレーションによって見出し、強磁性円盤の電気抵抗の交流電流周波数依存性測定を行うことで、この磁気コアの共鳴励起現象を実験的に捉える事に成功した (*Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 107204)。さらに、励起電流を大きくすると磁気コアの向きが反転する現象を見出し、磁気力顕微鏡による直接観察で確認した (*Nature Materials*, **6** (2007) 269)。

2. 研究の目的

以上の研究成果は、磁壁や磁気コアのようなナノスピン構造をもつ強磁性体に電流を流すだけで、固有のスピンダイナミクスを誘起することが可能であることを示している。研究代表者は、これらの研究を通して、電流誘起スピンダイナミクスを利用したスピン能動素子創製の着想に至った。

これまでの研究から、磁性ナノドット中に閉じこめられた磁気コアの運動は、電流駆動磁壁移動に比べて試料端の影響が少ないために、電流誘起スピンダイナミクスの物理を研究するための良いモデル系であることがわかってきた。そこで、磁気コアの電流誘起共鳴現象を定量的に研究することで電流誘起スピンダイナミクスの物理を明らかにすることを目的の一つとした。磁気コア反転が起こる閾電流密度がわかれば、試料の強磁性体中を流れる電流のスピン分極率を求めることができる。励起電流とコアの回転運動の位相関係から、磁壁の電流駆動の理論で提案されているベータ項の大きさを決定できる。スピン分極率やベータ項の大きさは磁壁移

動の効率などを決定する電流誘起スピンダイナミクスにおける基本的材料定数であるが、これまで測定されたことがなかった。本研究はスピン分極率とベータ項の大きさを定量的に与える手法となる。

さらに、これらの電流誘起スピンダイナミクスの知見に基づき、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンダイナミクスを利用したスピン能動素子を作製し基本動作を確認することを本研究の最終目的とした。

本研究を遂行することで、強磁性体のスピン分極率やベータ項の大きさが求まるとともに、電流誘起スピンダイナミクスの物理が明らかとなる。スピン分極率やベータ項は磁壁移動の効率などを決定するスピンエレクトロニクスにおける重要な基本的材料定数であるにも関わらず、これまで測定手法が存在しなかった。これを可能とする本研究は、スピントロニクス材料探索のための有力な手法となる。本研究で提案する増幅機能を持つスピン能動素子の基本動作が確認されれば、既存デバイスを超える省電力・高効率・低価格なスピンエレクトロニクスデバイス創製への道が拓かれる。

3. 研究の方法

研究体制として、実験家である研究代表者が、理論家（河野浩：阪大）とシミュレーションの専門家（仲谷栄伸：電通大）と緊密な関係を持って研究を推進した。河野は応募者が見いだした磁壁の電流駆動現象の理論構築を行った実績を持ち、仲谷はNEDO不揮発性機能プロジェクトで研究代表者とともに電流駆動現象を利用した磁気メモリー開発を行っていた。本応募研究課題の立案に密接に関連した磁気コアの電流励起や電流駆動磁気コア反転の研究成果も、この研究体制によって得られた。

本研究では、おもに以下の二つの観点からの研究を行った。

(1) 電流誘起スピンダイナミクスの物理
電流誘起スピンダイナミクスの物理を明らかにするとともに、スピン分極率やベータ項などの磁壁移動の効率などを決定する電流誘起スピンダイナミクスにおける基本的材料定数を求める。

(2) 電流誘起スピンダイナミクスを利用した能動素子
電流誘起スピンダイナミクスを利用した能動素子として、磁気渦ダイナミクスを利用した能動素子と磁壁ダイナミクスを利用した能動素子の二種類の能動素子の研究を行った。

(2-1) 磁気渦ダイナミクスを利用した能動素子
これまでの研究で明らかになったように、磁

性ドットに適切な周波数を持つ交流電流を印加すると、磁気コアの回転運動を共鳴励起できる。この際、磁性ドットの中心の磁化方向が回転する。この回転運動をトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子によって検出することで動作する、図 1 のような能動素子を作製し基本動作を確認する。 V_{in} からの入力電圧が磁性ドットの共鳴周波数に一致すると磁気渦の運動が起こり、TMR 素子の抵抗が共鳴周波数で振動することで V_1 に出力が得られる。この素子は、磁性ドットの共鳴周波数において電圧を増幅させることが可能なトランジスタとして働く。増幅率は TMR 変化率に依存するが本研究では基本動作の確認を行うことを目的とする。

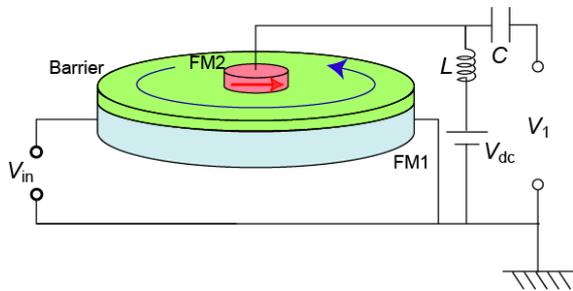


図 1 磁気渦ダイナミクスを利用した能動素子

(2-2) 磁壁ダイナミクスを利用した能動素子
電流によって磁壁が移動する場合、磁壁中の磁気モーメントが回転運動をしながら磁壁が進むことが理論的に指摘されている。この磁壁の回転運動をトンネル磁気抵抗素子によって検出することで動作する、マイクロ波発振器を作製し基本動作を確認することを目的とする。

4. 研究成果

(1) 磁気渦トランジスタ (Appl. Phys. Express 1 (2008) 091302)

磁気円盤中の磁気コアを交流電流で励起すると磁気コアが回転運動を行い、磁気円盤の中心の磁化方向が回転する。この磁化の回転運動をトンネル磁気抵抗素子によって検出することで動作する 3 端子素子を作製し基本動作を確認した。磁気渦の共鳴周波数において電圧を増幅するトランジスタとして働くことを示した。この素子は新しいタイプのスピントランジスタといえる。

(2) 磁壁発振器 (Appl. Phys. Express 1 (2008) 061301)

電流によって磁壁が移動することが知られているが、磁壁を強制的に止めて電流を流すシミュレーションを行ったところ、磁壁が移動する場合に比べて桁違いに速い回転運動を誘起できることがわかった。この磁壁の

回転運動をトンネル磁気抵抗素子によって検出することで動作するマイクロ波発振器を提案した。この素子は、(1) 外部磁場印加不要で周波数を電流密度で制御できる (2) 3 端子化されているため出力がトンネル磁気抵抗素子の印加電圧で制御できる (3) ナノ細線素子であるため微小電流で動作可能などのこれまでの発振器にない特徴を持つ。

(3) 電流によるスピン波の制御 (Phys. Rev. Lett. 108, 017203 (2012))

電流との相互作用によってスピン波の速度・振幅を制御できることを実験的に示した。電子の流れとスピン波の進行方向が平行 (反平行) な場合は、スピン波の速度が増大 (減少) し振幅が増大 (減少) することがわかった。実験結果を解析することで、スピントロニクスで重要な材料定数であるスピン分極率、ベータ項およびギルバートダンピング定数を求めた。

(4) 磁気コアメモリー動作実証 (Appl. Phys. Lett. 99, 262505 (2011))

磁性ドットとトンネル磁気抵抗素子を組み合わせた磁気コアメモリー素子を作製し、電気的読み書きが可能であることを実証した。

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 59 件) 「全て査読有り」

- (1) Koji Sekiguchi, Keisuke Yamada, Soo-Man Seo, Kyung-Jin Lee, Daichi Chiba, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, “Time-Domain Measurement of Current-Induced Spin Wave Dynamics”, Phys. Rev. Lett. 108, 017203 (2012).
- (2) K. Nakano, D. Chiba, N. Ohshima, S. Kasai, T. Sato, Y. Nakatani, K. Sekiguchi, K. Kobayashi, T. Ono, “All-electrical operation of magnetic vortex core memory cell”, Appl. Phys. Lett., 99, 262505 (2011).
- (3) T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi, T. Ono, “Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire”, Nature Materials, 10, 194 (2011).
- (4) Hironobu Tanigawa, Tomohiro Koyama, Maciej Bartkowiak, Shinya Kasai, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Yoshinobu Nakatani, “Dynamical

- Pinning of a Domain Wall in a Magnetic Nanowire Induced by Walker Breakdown”, Phys. Rev. Lett. 101, (2008) 207203.
- (5) Shinya Kasai, Kunihiro Nakano, Kouta Kondou, Norikazu Ohshima, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, “Three-Terminal Device Based on the Current-Induced Magnetic Vortex Dynamics with the Magnetic Tunnel Junction”, Appl. Phys. Express 1 (2008) 091302.
- (6) A. Himeno, K. Kondo, H. Tanigawa, S. Kasai, and T. Ono, “Domain wall ratchet effect in a magnetic wire with asymmetric notches”, J. Appl. Phys. 103, 07E703 (2008).
- (7) T. Ono and Y. Nakatani, “Magnetic Domain Wall Oscillator”, Appl. Phys. Express 1 (2008) 061301.

[学会発表] (計 38 件)

- (1) Teruo Ono, “Experimental Evidence for Intrinsic Pinning Mechanism in Current-induced Domain Wall Motion”, International Conference of AUMS, December 6, 2010, Jeju, Korea
- (2) Teruo Ono, “Electrical Detection of Vortex Core Polarity in Ferromagnetic Disk with Magnetic Tunnel Junction”, Asia-Pacific Data Storage Conference, October 28, 2010, Hualien, Taiwan
- (3) Teruo Ono, “Current-induced domain wall motion against magnetic field”, 7th International Symposium on Metallic Multilayers, September 21, 2010, Berkley, USA
- (4) Teruo Ono, “Modification of Spin Wave Propagation by Current Injection”, American Physical Society March Meeting, March 17, 2010, Portland, USA
- (5) Teruo Ono, “Current-induced Domain Wall Motion in Perpendicularly Magnetized Co/Ni Wires”, 20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, June 23, 2009, Berlin, Germany
- (6) Teruo Ono, “Current-induced magnetization dynamics of nano-magnets - Domain wall motion & Vortex core switching -”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, November 29-December 4, 2009, Kaanapali, Maui, Hawaii, USA
- (7) Teruo Ono, “High DW velocity in Co/Ni with perpendicular anisotropy” IEEE International Magnetism Conference, May 5, 2009, Sacramento, USA
- (8) Teruo Ono, “Real-time Detection of Current-induced Dynamics of Magnetic Vortex Core by Using TMR Effect”, Asian Magnetism Conference 2008, December 10-13, 2008, Busan, Korea
- (9) Teruo Ono, “Current-induced vortex core motion in magnetic disk”, Moscow International Symposium on Magnetism, June 20-25, 2008, Moscow, Russia
- (10) Teruo Ono, “Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet”, The 5th International Workshop on Surface, Interface, and Thin Film Physics, June 17-19, 2008, Shanghai, China
- (11) Teruo Ono, “Current-induced spin dynamics in nanomagnet”, Joint EUROCORES FONE “SpiCo-SPINCURRENT-Spintra” Workshop, Quantum Transport, Magnetic Nanodevices and Spintronics, December 11, 2007, Napoli, Italy
- (12) Teruo Ono, “Switching a vortex core in a ferromagnetic disk by electric current”, Material Research Society Fall Meeting, November 26, 2007, Boston, USA
- (13) Teruo Ono, “Excitation of nano-spin-structure by electric current”, International Conference on Nanospintronics Design and Realization, May 21-25, 2007, Dresden, Germany

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/onolab/public_html/indexj.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 輝男 (ONO TERUO)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：90296749