

機関番号：14301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048023

研究課題名（和文） スピン流による磁気構造のナノスケール制御

研究課題名（英文） Nano-scale control of magnetization by spin current

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スピン流励起ナノスピンドYNAMICSを研究することで、スピン流による磁気構造のナノスケール制御を確立することを目的として研究を行い、電流誘起磁気コア共鳴運動の実時間実空間観察、ナノ秒電流パルスによる磁気コア反転、磁気コアメモリーの読み取り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 way to control nano-spin-structures such as magnetic domain wall and magnetic vortex by spin-current, and obtained the following results: direct observation of resonant excitation of magnetic vortex by spin-transfer torque, switching of magnetic vortex core by a nano-second electric current pulse injection, electrical reading of bit data from vortex core memory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,500,000	0	11,500,000
2008年度	14,400,000	0	14,400,000
2009年度	14,400,000	0	14,400,000
2010年度	11,500,000	0	11,500,000
年度			
総計	51,800,000	0	51,800,000

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

研究代表者らは、強磁性体に電流を流すだけで磁化の境界である磁壁を移動すること可能であることを示した (Phys. Rev. Lett., 92 (2004) 077205)。この現象は、磁性体中のスピン偏極電流と磁壁の相互作用の結果として理解され、磁壁のような空間的に変調したナノスピン構造中をスピン流が流れるとスピントルクが働くという普遍的概念へと展開される。実際、申請者らは、ナノスピン構造のもう一つの典型例である磁気ディスク中の磁気コアを電流によって共鳴励起す

ることに成功した (Phys. Rev. Lett. 97, (2006) 107204)。

2. 研究の目的

上述したように、電流を運ぶ伝導電子と磁化を担う磁気モーメントとの直接相互作用（スピントランスファー効果）を利用して磁化状態を制御することを目指す研究が世界的に研究されている。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スピン流励起ナノスピンドYNAMICSを研究することで、スピン流によ

る磁気構造のナノスケール制御を確立することを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

本研究では、以下の点に着目して研究を進めることで、スピン流とナノスピンドYNAMIKSの相関を明らかにすることを目指した。

(1) 磁壁の電流駆動におけるスピンドYNAMIKSの研究

磁壁の電流駆動の試料形状・物質依存性を調べる。従来の多結晶試料に留まっていた実験を単結晶試料に拡張するため、単結晶磁性体薄膜の作製とその微細加工技術を確立し結晶方位依存性等の研究を行う。パルス電流を用いてナノ秒領域での磁壁のダイナミクスを明らかにする。

(2) 磁気コアの電流誘起共鳴現象

円盤中に閉じこめられた磁気コアの運動は、電流駆磁壁移動に比べて試料端の影響が少ないために、スピントランスファー効果を研究するためのより良いモデル系と考えられる。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スピントランスファー効果の物理を明らかにするために、試料サイズや物質を系統的に変えた研究を行う。

(3) ナノスピン構造励起によるスピン流創出磁壁電流駆動や磁気コア共鳴励起の逆効果の研究を行う。つまり、磁壁や磁気コアを外部磁場等で励起することで、スピン流や電流を作り出すことを目指す。

4. 研究成果

(1) 電流誘起磁気コア共鳴運動の実時間実空間観察 (Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 237203)

磁気円二色性を利用したX線顕微鏡を用いることで、電流誘起磁気コア共鳴運動の様子を実時間実空間観察することに成功した。シミュレーションの予測通り、磁気コアは磁気円盤中で円運動をしていることが観察された。実験結果を解析することで、電流のスピン分極率を求めることに成功した。本手法は多くの強磁性材料に適用可能であり、スピントロニクスで重要な材料定数である電流のスピン分極率の測定法を確立したといえる。

(2) ナノ秒電流パルスによる磁気コア反転 (Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 152502)

交流電流励起によって磁気コアの向きを反転することに成功していた (Nature Materials, 6 (2007)269) が、反転に数十ナノ秒の時間がかかる、磁気コアの向きの制御性が悪いなどの問題があった。今回、ナノ秒の電流パルスを印加するだけで磁気コアの向きを反転することが可能であることを示した。短時間で完全に磁気コアの向きを制御することが可能であり、磁気コアメモリーの書き込み手法の確立に相当する。

(3) 磁気コアメモリー (Appl. Phys. Express,

3 (2010) 53001)

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端子素子を作製した。この3端子素子が、磁気コアメモリーとしても動作することを示した。出力振幅の大きさと磁気コアの向き(ビット情報)を読み出すことが可能であることを見出した。

(4) 電流によるスピン波の制御 (Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 147202)

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。さらに重要な点は、速度変化は電流のスピン分極率に依存し、振幅変化はベータ項に依存することを明らかにしたことである。すなわち、電流印加下のスピン波の速度・振幅測定から、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とベータ項の大きさを定量的に評価することが可能であることを示した。

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 37件)

- (1) M. Madami, G. Carlotti, G. Gubbiotti, F. Scarponi, S. Tacchi, and T. Ono, "Spatial profile of spin excitations in multilayered rectangular nanodots studied by microfocused Brillouin light scattering", J. Appl. Phys., 109, 07B901(2011).
- (2) M A Tanaka, T Hori, S Hori, K Kondou, S Kasai, T Ono, K Mibu, "Bias-voltage-dependence of magnetoresistance for epitaxial Fe/MgO/Co₂MnSn tunnel junctions", J. Phys.: Conf. Ser., 266,12107(2010).
- (3) T. Ichitsubo, S. Takashima, E. Matsubara, Y. Tamada, and T. Ono, "Exchange-coupling of c-axis oriented L1₀-FePd and Fe in FePd/Fe thin films", Appl. Phys. Lett., 97, 182508(2010).
- (4) H. Ogi, A. Yamamoto, K. Kondou, K. Nakano, K. Morita, N. Nakamura, T. Ono, and M. Hirao, "Significant softening of copper nanowires during electromigration studied by picosecond ultrasound spectroscopy", Phys. Rev. B Phys. Rev. B, 82, 155436(2010).
- (5) K. Sekiguchi, K. Yamada, S.M. Seo, K.J.

- Lee, D. Chiba, K. Kobayashi, T. Ono, “Nonreciprocal emission of spin-wave packet in FeNi film” , Appl. Phys. Lett, 97, 22508,(2010).
- (6) Kenji Tanabe, Daichi Chiba, Teruo Ono, “Electrical Detection of Magnetic Vortex Chirality” , Jpn. J. Appl. Phys,49, 78001(2010).
- (7) S. Tacchi, M. Madami, G. Gubbiotti, G. Carlotti, H. Tanigawa, T. Ono, and M. P. Kostylev, “Anisotropic dynamical coupling for propagating collective modes in a two-dimensional magnonic crystal consisting of interacting squared nanodots” ,Phys. Rev. B, 82, 24401,(2010).
- (8) K. Sekiguchi, T. Arakawa, Y. Yamauchi, K. Chida, M. Yamada, H. Takahashi, D. Chiba, K. Kobayashi, and T. Ono, “Observation of full shot noise in CoFeB/MgO/CoFeB-based magnetic tunneling junctions” , Appl. Phys. Lett,96, 252504(2010).
- (9) Keisuke Yamada, Shinya Kasai, Yoshinobu Nakatani, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, “Current-induced switching of magnetic vortex core in ferromagnetic elliptical disks” ,Appl. Phys. Lett, 96, 192508(2010).
- (10)Marco Madami, Federico Montoncello, Giulia Capuzzo, Loris Giovannini, Fabrizio Nizzoli, Gianluca Gubbiotti, Silvia Tacchi, Giovanni Carlotti, Hirobonu Tanigawa, and Teruo Ono, “Experimental Evidence of Field-Induced Localization of Spin Excitations in NiFe Elliptical Rings by Micro-Focused Brillouin Light Scattering” , IEEE Trans. Mag., 46, 1531(2010).
- (11)Kunihiro Nakano, Daichi Chiba, Koji Sekiguchi, Shinya Kasai, Norikazu Ohshima, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, “Electrical detection of vortex core polarity in ferromagnetic disk” , Appl. Phys. Express ,3,53001(2010).
- (12)M. Madami, Tacchi, G. Gubbiotti, G. Carlotti, F. Montoncello, G. Capuzzo, L. Giovannini, F. Nizzoli, H. Tanigawa, and T. Ono, “Spin Modes in Elliptical Nanorings in the Vortex State: Two-Dimensional Mapping by Micro-Focused Brillouin Light Scattering” , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.,46,199(2010).
- (13)Y. Yamauchi, M. Hashisaka, S. Nakamura, K. Chida, S. Kasai, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, D. C. Driscoll, A. C. Gossard and K. Kobayashi, “Non-equilibrium dephasing in ballistic interferometers” , Journal of Physics: Conference Series, 193, 12045(2009).
- (14)M. P. Delmo, S. Kasai, K. Kobayashi, and T. Ono, “Space-charge-effect-induced large magnetoresistance in silicon” ,Journal of Physics: Conference Series, 193, 12001(2009).
- (15)M. P. Delmo, S. Kasai, K. Kobayashi, and T. Ono, “Current-controlled magnetoresistance in silicon in non-Ohmic transport regimes” , Appl. Phys. Lett.,95, 132106(2009).
- (16)V. Bonanni, D.Bisero, P.Vavassori, G.Gubbiotti, M.Madami, A.O.Adeyeye, S.Goolaup, N. Singh, T.Ono, C.Spezzi, “ Shape and thickness effects on the magnetization reversal of Py/Cu/Co nanostructures” , J. Magn. Mater, 21, 3038–3041(2009).
- (17)Soo-Man Seo, Kyung-Jin Lee, Hyunsoo Yang, and Teruo Ono, “ Current-Induced Control of Spin-Wave Attenuation” , Phys. Rev. Lett, 102, 147202(2009).
- (18)Michael P. Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono, Kensuke Kobayashi “ Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect” , Nature, 457, 1112(2009).
- (19)Shinya Kasai, Peter Fischer, Mi-Young Im, Keisuke Yamada, Yoshinobu Nakatani, Kensuke Kobayashi, Hiroshi Kohno, and Teruo Ono, “Probing the Spin Polarization of Current by Soft X-Ray Imaging of Current-Induced Magnetic Vortex Dynamics” , Phys. Rev. Lett,101, 237203(2008).
- (20)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, 207203(2008).
- (21)Keisuke Yamada, Shinya Kasai, Yoshinobu Nakatani, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, “Switching magnetic vortex core by a single nanosecond current pulse”, Appl. Phys.

- Lett, 93, 152502(2008).
- (22) 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, 91302(2008).
- (23) K. Kondou, N. Ohshima, S. Kasai, Y. Nakatani, and T. Ono, “Single Shot Detection of the Magnetic Domain Wall Motion by Using Tunnel Magnetoresistance Effect” ,Appl. Phys. Express, 1, 61302(2008).
- (24) T. Ono and Y. Nakatani, “Magnetic Domain Wall Oscillator” , Appl. Phys. Express, 1, 61301(2008).
- (25) G. Gubbiotti, M. Madami, S. Tacchi, G. Carlotti, H. Tanigawa and T. Ono, “ Spin dynamics of multilayered nanoelements with different shapes studied by Brillouin light scattering technique” , J. Phys. D: Appl. Phys.41, 134023(2008).
- (26) M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Nakamura, S. Kasai, K. Kobayashi, and T. Ono, “Measurement for quantum shot noise in a quantum point contact at low temperatures” , Journal of Physics: Conference Series, 109, 12013(2008).
- (27) 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).
- (28) A. Thiaville, Y. Nakatani, F. Pi'échon, J. Miltat, and T. Ono, “Transient domain wall displacement under spin-polarized current pulses” , Eur. Phys. J. B, 60, 15–27(2007).
- (29) A. Yamaguchi, H. Miyajima, T. Ono, Y. Suzuki, S. Yuasa, “The rectification of radio-frequency signal by magnetic domain wall in a single-layered ferromagnetic nanowire” , Appl. Phys, Lett., 91, 132509(2007).
- (30) T. Nozaki, H. Maekawa, M. Mizuguchi, M. Shiraishi, T. Shinjo, and Y. Suzuki, H. Maehara, S. Kasai and T. Ono, “ Substantial reduction in the depinning field of vortex domain walls triggered by spin-transfer induced resonance ” , Appl. Phys, Lett,91,82502(2007).
- (31) F. Montoncello, L. Giovannini, F. Nizzoli, P. Vavassori, M. Grimsditch, T. Ono, G. Gubbiotti, S. Tacchi, and G. Carlotti, “ Soft spin waves and magnetization reversal in elliptical Permalloy nanodots: Experiments and dynamical matrix results” , Phys. Rev. B,76, 24426(2007).
- (32) T. Ono and H. Kohno, “Spin-transfer Motor ” ,J. Magn. Soc. Jpn., 31,305,(2007).
- (33) A. Yamaguchi, H. Miyajima, S. Kasai, T. Ono, “Self-homodyne rf demodulator using a ferromagnetic nanowire” , Appl. Phys, Lett, 90, 212505(2007).
- (34) A. Yamaguchi, H. Miyajima, T. Ono, Y. Suzuki, S. Yuasa, A. Tulapurkar, Y. Nakatani, “ Rectification of radio frequency current in ferromagnetic nanowire ” ,Appl. Phys, Lett, 90, 182507(2007).
- (35) G. Gubbiotti, M. Madami, S. Tacchi, and G. Socino, G. Carlotti, T. Ono, “Effect of eccentricity on the spin-wave spectrum of NiFe/Cu/NiFe pillars with elliptical cross section” , J. Appl. Phys. 101, 09F502(2007).
- (36) K. Yamada, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, H. Kohno, A. Thiaville, T. Ono, “Electrical switching of the vortex core in a magnetic disk” Nature Materials, 6, 269(2007).
- (37) S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, H. Kohno and T. Ono, “ Magnetization reversal in a ferromagnetic circular dot under current induced resonant excitation ” , J. Magn. Mater.,310, 2351-2352.(2007).
- 以上、すべて査読有り
- [学会発表] (計 103 件)
- (1) Teruo Ono, “Experimental Evidence for Intrinsic Pinning Mechanism in Current-induced Domain Wall Motion” International Conference of AUMS, Dec,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, Oct,28,2010, Hualien, Taiwan.
- (3) Teruo Ono, “Current-induced domain wall motion against magnetic field” 7th International Symposium on Metallic Multilayers, Sep,21,2010, Berkley, USA.
- (4) Teruo Ono, “Experimental investigation

- of spin motive forces induced by a gyration motion of a magnetic vortex core” , International Workshop on Surface, Interface and Thin Film Physics,Jun,16,2010, Shanghai, China.
- (5) TeruoOno, “ Spin torque effects in nanomagnets” , Progress in Spintronics and Graphene Research,Jun,4,2010, Beijing, China.
 - (6) TeruoOno, “ Current-induced Domain Wall Motion against Magnetic Field” International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (Global COE Program) & Third International Conference on Nanospintronics Design and Realization,May,31,2010, Osaka, Japan.
 - (7) TeruoOno, “Modification of Spin Wave Propagation by Current Injection” , American Physical Society March Meeting,Mar,17,2010, Portland, USA.
 - (8) TeruoOno, “ Current-induced domain wall motion against magnetic field” , 6th RIEC International Workshop on Spintronics, Feb,5,2010, Sendai, Japan.
 - (9) TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics of nano-magnets - Domain wall motion & Vortex core switching -” International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology,Nov,29,2009, Hawaii, USA.
 - (10)TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics - Domain wall motion & Vortex core switching -” , 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium,Sep,1,2009, Osaka, Japan.
 - (11)TeruoOno, “ Current-induced domain wall motion in perpendicularly magnetized Co/Ni wires ” , SPIE, NanoScience + Engineering, SpintronicsII,Aug,2,2009, San Diego,USA.
 - (12)TeruoOno, “ Current-induced Domain Wall Motion in Perpendicularly Magnetized Co/Ni Wires ” , 20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,Jun,23,2009, Berlin, Germany.
 - (13)TeruoOno, “High DW velocity in Co/Ni with perpendicular anisotropy,” IEEE International Magnetism Conference,May,5,2009, Sacramento,USA.
 - (14)TeruoOno, “Domain wall dynamics and the current induced domain wall motion in perpendicularly magnetized wires ” , JSAP annual meeting, Japan-Korea session “Progresses in the Spin-RAM, Domain wall new devices, and Spintronics,Mar,31,2009, Tsukuba,JAPAN.
 - (15)TeruoOno,”Control of Magnetization in Nano-Magnet by Electric Current” Symposium on Surface and Nano Science,Jan,27,2009, Shizukuishi,JAPAN.
 - (16)TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics in nano-magnet: fundamental to applications” , JST-DFG workshop on Nanoelectronics,Jan,21,2009,Kyoto,JAPAN.
 - (17)TeruoOno, “ Real-time Detection of Current-induced Dynamics of Magnetic Vortex Core by Using TMR Effect” , Asian Magnetism Conference 2008,Dec,10,2008, Busan, Korea.
 - (18)TeruoOno, “ Real-time Detection of Current-induced Dynamics of Magnetic Vortex Core by Using TMR Effect” , Asian Magnetism Conference 2008,Dec,8,2008, Seoul, Korea.
 - (19)TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet” , The 5th Asia Forum on Magnetism,Oct,16,2008, Beijing, China.
 - (20)TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet: Domain wall and magnetic vortex” , The 4th Taiwan International Conference on Spintronics,Oct,2,2008, Taipei, Taiwan.
 - (21)TeruoOno, “ Current-induced vortex core motion in magnetic disk” , Moscow International Symposium on Magnetism,Jun,20,2008, Moscow, Russia.
 - (22)TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet” , The 5th International Workshop on Surface, Interface, and Thin Film Physics,Jun,17,2008, Shanghai, China.
 - (23)TeruoOno, “ Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet” , The 5th International Workshop on Surface, Interface, and Thin Film Physics,Apr,17,2008, Daejeon, Korea.
 - (24)TeruoOno, “ Current-induced spin

dynamics in nanomagnet ” ,
International workshop on 'SPIN
CURRENT 2008, Feb, 18, 2008,
Sendai, JAPAN.

- (25) Teruo Ono, “Electrical Manipulation of Magnetization in Nanomagnet” , The 5th International Conference on Advanced Materials and Devices, Dec, 14, 2007, Jeju, Korea.
- (26) Teruo Ono, “ Current-induced spin dynamics in nanomagnet ” , Joint EUROCORES FONE "SpiCo-SPINCURRENT-Spintra" Workshop, Quantum Transport, Magnetic Nanodevices and Spintronics, Dec, 11, 2007, Napoli, Italy.
- (27) Teruo Ono, “Switching a vortex core in a ferromagnetic disk by electric current” , Material Research Society Fall Meeting, Nov, 26, 2007, Boston, USA.
- (28) Teruo Ono, “Switching a vortex core in a ferromagnetic disk by electric current” , 4th Asian Forum on Magnetism, Jul, 29, 2007, Douliou, Taiwan.
- (29) Teruo Ono, “Electrical Manipulation of Magnetization in Nanomagnet ” , International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, May, 28, 2007, Jeju, Korea.
- (30) Teruo Ono, “ Excitation of nano-spin-structure by electric current ” , International Conference on Nanospintronics Design and Realization ” , May, 21, 2007, Dresden, Germany.

以上すべて国際会議招待講演
他、国内会議 73 件発表

[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