

## 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 24 日現在

機関番号：31302  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22246078  
 研究課題名（和文）  
 面内規則配列を有する自己組織化ナノ構造薄膜の作製とスピンドバイスへの適用  
 研究課題名（英文）  
 Preparation of self-organized nano-structured thin film for the application to spin-devices  
 研究代表者  
 土井 正晶 (DOI MASAOKI)  
 東北学院大学・工学部・教授  
 研究者番号：10237167

研究成果の概要（和文）：エピタキシャル Alternate Monatomic Layered (AML)磁性体/非磁性体界面のスピニ依存界面抵抗に着目し、中間層材料を変えた CPP (Current Perpendicular to Plane) GMR 素子を試作し、Ag 中間層を用いた場合に、0.84 の大きな  $\gamma$  値が得られること、またその MR 特性は、AML 膜厚 5nm で面積抵抗変化量  $\Delta RA$  が  $3\text{m}\Omega \mu\text{m}^2$  以上、MR 比  $>5\%$  が得られることを見出した。また、アンドレーフ反射法によって AML Fe/Co 薄膜のスピニ分極率が 0.60 であることを実験的に検証し、規則度の増加によるスピニ分極率の増加を確認した。これらの結果から 高 MR を有するナノコンタクト MR 素子に対する材料設計指針を得た。

研究成果の概要（英文）：The structural properties of the full epitaxial trilayer, AML[Fe/Co]<sub>n</sub>/Ag/AML[Fe/Co]<sub>n</sub>, on the Ag electrode have been confirmed by in situ reflection high-energy electron diffraction and transmission electron diffraction microscopy. A considerably large resistance-area product change and MR ratio ( $\Delta RA > 3\text{m}\Omega \mu\text{m}^2$  and MR ratio  $>5\%$ ) were confirmed even at thin AML[Fe/Co]<sub>n</sub> layer at room temperature (RT) in our spin-valve elements. The estimated values of  $\beta_F$  and  $\gamma_{FN}$  were 0.80 and  $0.84 \pm 0.02$ , respectively. The intrinsic transport  $P$  of 0.60 was obtained for the AML epitaxial [Fe/Co]<sub>n</sub> superlattice by the point contact Andreev reflection (PCAR) method. The material design for Nano-contact MR device was obtained.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2011 年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2012 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：金属物性

キーワード：電子・磁気物性、スピニエレクトロニクス

#### 1. 研究開始当初の背景

##### ①研究の学術的背景

ユビキタスネットワークやスーパーハイ

ビジョン映像の実現に向けて、ストレージメモリはその素子寸法が100nmをきるころまで微細化が進展し、その高密度・大容量・高速

化の要請はさらに高まり続けている。しかし、次世代超高密度・大容量・超高速のストレージメモリ実現のためには、現在のデバイスとして実用化されているGMR (Giant Magnetoresistance) /TMR (Tunneling Magnetoresistance) では記録再生感度 (GMR) および応答速度 (TMR) が十分ではなくなることが分かっている。また、ナノ構造デバイスに省エネルギー型高速無線通信機能を持たせるためには新しい動作原理に基づくナノメートルサイズのマイクロ波発振素子の開発が急務である。この限界を打ち破るためには、ナノスケールでの特異なスピン伝導物理のデバイス応用が急務となっており、新たな量子スピン伝導に基づいた新規MR原理の創製とそのデバイスへの適用検討が不可欠である。本研究ではキーデバイスとして期待されている従来型のスピン伝導デバイスを遥かに凌駕する、あるいは従来の枠を超えたデバイス応用が期待される新しいスピンナノデバイスの可能性を、量子スピン伝導物理から検討することを目的としている (図1)。

## ②国内外の研究動向・着想に至った経緯

これまでにない新たな量子スピン伝導に基づいた MR 原理に基づくデバイスを開発するために研究代表者は自己組織化ナノ構造薄膜すなわちナノ接点磁壁型磁気抵抗素子に関する研究を行ってきた。ナノ接点磁壁型磁気抵抗素子とは、図2に示すように、複数の強磁性金属ナノ接点を含む Nano-Oxide-Layer (NOL) を、スピンバルブ素子のスペーサ層に用いた新規な磁気抵抗素子であり、ナノ接点部に閉じ込められる特異な磁壁によるスピン依存散乱が磁気抵抗の起源となっている。このナノ接点構造体の厚みは1nm以下、ナノチャンネル径は1~10nm、チャンネル間隔は5~10nmである。このようなナノ領域でのデバイスにおいては、実効的なスピン分極率の増加を用いることがキーテクノロジーのひとつとなることが予想される。また、図1に示すような理論計算がなされているナノ接点磁壁型磁気抵抗素子は、ナノ接点部のスピン伝導非対称性 $\beta$ を0.8以上に高めることで、100%以上の磁気抵抗比(MR)を低抵抗で実現可能なことが研究分担者の今村らによって予測されている。本研究代表者は平衡・非平衡 Fe 系エピタキシャル薄膜の構造と磁性に関する研究を行っており、これまでに得た Fe 系エピタキシャル成長に関する知見を基に bcc-Fe(1ML)/Co(1ML) エピタキシャル薄膜へ研究を展開した (平成19年~21年基盤研究(B) 研究代表者土井正晶)。

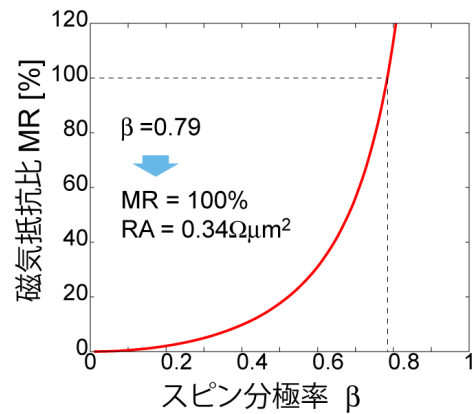


図1 ナノ接点磁壁型磁気抵抗素子のMR比のスピン分極率依存性。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、キーデバイスとして期待されている従来型のスピン伝導デバイスを遥かに凌駕する、あるいは従来の枠を超えたデバイス応用が期待される新しいスピンナノデバイスの可能性を、量子スピン伝導物理から検討することを目的としている。極薄 (~1nm) の酸化物層中に、1~2nm φ のナノ接点サイズの金属導電チャンネルを面内に規則的に配列した NOL (Nano-Oxide Layer) を高スピン伝導非対称性を有する単原子積層 [Fe/Co]<sub>n</sub> エピタキシャル単結晶薄膜で挟み込んだスピンバルブ薄膜を作製し、その接点領域 (ナノ狭窄部) に閉じ込められるナノ狭窄磁壁による MR 比 < 100% を有する低抵抗磁気抵抗素子を実現することを目標としている。ナノ狭窄磁壁による新規なスピndevice への実用化検討を行うことを目的とする。本研究の要は、エピタキシャル成長、選択酸化、選択ミリング等の自己組織化手法を駆使して、微細加工などのトップダウンプロセスでは現状不可能である絶縁体中に 1~2nm φ の金属導電チャンネルを面内に規則的に配列した極薄酸化物薄膜を単結晶薄膜上に作製することである。単原子積層 [Fe/Co]<sub>n</sub> エピタキシャル単結晶薄膜で挟み込んだスピンバルブ薄膜を作製するために自己組織化ナノパターンニング技術を検討し、MR 比 < 100% を実証することを目標に研究を行った。

## 3. 研究の方法

①Au 電極上の [Fe(1ML)/Co(1ML)] エピタキシャルスピンバルブ薄膜の作製と膜構造・磁気特性評価  
MgO/Au/[Fe(1ML)/Co(1ML)]<sub>20</sub>/NOL/[Fe(1ML)/Co(1ML)]<sub>20</sub>/IrMn/Cu スピンバルブ薄膜を作製し、その磁気特性とスピン伝導特性およびス

ピントランスファートルクによるスピンダイナミクスの評価・解析を行い、スピンナノデバイスへ適用するための設計指針を提案する。

#### ①CPP型素子加工

作製したスピンバルブ薄膜をEBリソグラフィ法（現有設備）とイオンミリング（現有設備）によって微細加工し、数ミクロン径の膜面垂直方向通電（CPP）型の素子に加工する。上部Cu電極をスパッタ法（現有設備）によって蒸着し、CPP型の素子を作製する。AFM（新規購入）によって素子形状の確認を行い、素子作製技術を確立する。

#### ②磁気抵抗効果測定

作製した CPP-GMR 素子を用いて低温（4.2K）から室温までの磁気抵抗効果測定を行い、スピン伝導特性を評価する。今村（研究分担者）らによる理論計算の結果と対比し、狭窄磁壁のスピン伝導の特性について考察する。

#### ③スピントランスファートルクによるスピンダイナミクス測定

マイクロ波の測定にはプローブ法（現有設備）を用い、直流電流を印加して発振するマイクロ波信号をバイアスTを経由してスペクトラムアナライザ（0.1~18GHz）（現有設備）を用いて測定する。ナノ接点の配列、特に間隔とコヒーレントマイクロ波発振の関係について考察し、コヒーレントマイクロ波発振素子の設計指針を提示する。

### 4. 研究成果

平成 22 年度はエピタキシャル強磁性薄膜上の自己組織化ナノパターンング技術を検討し、NOL (Nano-Oxide Layer) の Conductive-AFM と TEM 観察による構造評価を行い、ナノ接点の形成技術の確立を目指して実験を行った。

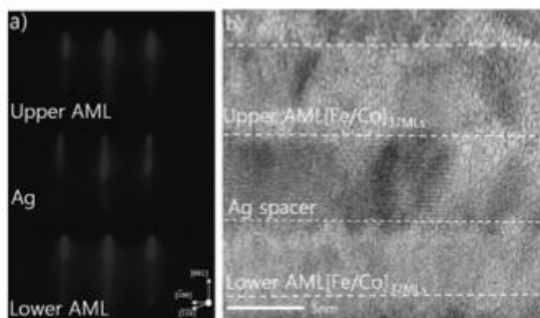


図2 エピタキシャル Alternate Monatomic Layered (AML)/Ag の RHEED および断面 TEM 像

まず、エピタキシャル Alternate Monatomic Layered (AML) 磁性体/非磁性体界面のスピン依存界面抵抗に着目し、中間層材料を変えた CPP (Current Perpendicular to Plane) GMR 素子を試作し（図2）、Ag 中間層を用いた場

合に、0.84 の大きな  $\gamma$  値が得られること、またその MR 特性は、AML 膜厚 5nm で面積抵抗変化量  $\Delta RA$  が  $3m\Omega \mu m^2$  以上、MR 比 5% が得られることを見出した（図3）。この  $\Delta RA$  値は従来報告されている FeCo 合金系 CPPGMR 特性をはるかに上回る特性である。しかし、理論計算により予測されている高い界面抵抗は得られなかったため、さらに界面でのミキシングを考慮して Fe を厚め（1nm）に積層して Ag と Fe の界面を増加させた結果、界面抵抗が増加することを確認した。これらの結果から AML [Fe/Co]/Ag/ AML [Fe/Co] エピタキシャル薄膜が電流狭窄型の MR 薄膜素子に適していることを明らかにした。

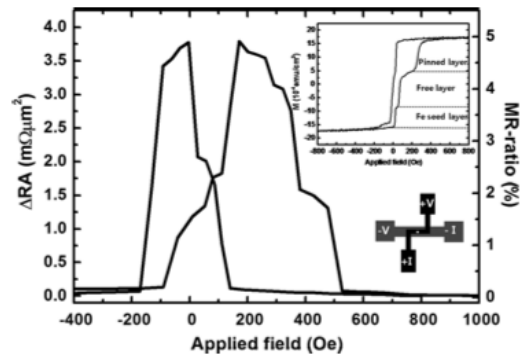


図3 MgO/Au/[Fe(1ML)/Co(1ML)]<sub>20</sub>/NOL/[Fe(1ML)/Co(1ML)]<sub>20</sub>/IrMn/Cu スピンバルブ薄膜の MR 曲線

また、縞状エピタキシャル成長をマスクとし NOL (Nano-Oxide Layer) の作製を行うために新規購入設備 AFM 装置による表面観察および TEM 観察などから縞状の Ag 初期成長層の直接観察を行った。その結果、AML [Fe/Co] 上の Ag が縞状成長することを確認した（図4）。この縞状の Ag 初期成長層をマスクとして表面に露出した [Fe/Co] を選択酸化する足掛かりを得た。

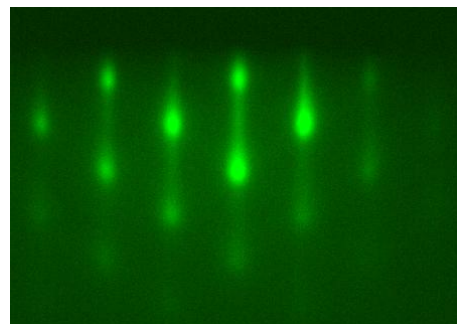


図4 AML [Fe/Co] 上の Ag の縞状エピタキシャル成長 (RHEED 像)

平成23年度 ではアンドレーフ反射法によつ

てAML Fe/Co薄膜のスピン分極率が0.60であることを実験的に検証し、規則度の増加によるスピン分極率の増加を確認した(図5)。さらに金属/酸化物/金属の3層膜に於いて微細加工によるドット形状の作製を行い、素子化への設計指針を得た。

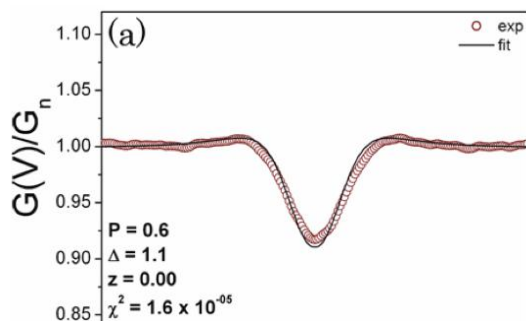


図5 アンドレーフ反射法によるAML Fe/Co薄膜のスピン分極率計測結果

平成24年度はエピタキシャルAlternate Monatomic Layered (AML) 磁性体/非磁性体界面のスピン依存界面抵抗に着目し、Ag中間層を用いた場合に、0.84の大きな $\gamma$ 値が得られること、またそのMR特性は、AML[Fe/Co]/Ag/AML[Fe/Co]三層膜ではMR比>20%が得られることおよびスピントランスファートルクによるスピンドイナミクス測定により比較的高出力のスピントルク発振を見出した。ナノコンタクトMR素子に対する材料設計指針を得た。今後は、エピタキシャル成長、選択酸化、選択ミリング等の自己組織化手法を駆使してチャンネル径の制御されたエピタキシャルFe/Co NOLを作製し、AML/NOL/AML薄膜において素子化および評価を行う。実験結果を理論計算の結果と比較・検討し、研究目標の達成に向けて研究をさらに推進させる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

1. I. C. Chu, M. Doi, M. Sahashi, A. Rajanikanth, Y. Takahashi, and K. Hono, "Spin Polarization of Alternate Monatomic Epitaxial [Fe/Co]<sub>n</sub> Superlattice", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 51, 093006 (2012).
2. N. Shimomura, K. Sawada, T. Nozaki, M. Doi, M. Sahashi, "Demonstration of magneto electric effect in ultrathin Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-oxide layer by training effect", APPLIED PHYSICS LETTERS, 査読有, 101, 012403 (2012).
3. K. Miyake, Y. Saki, A. Suzuki, S. Kawasaki, M. Doi, and M. Sahashi, "Modification of

Magnetic Nanocontact Structure by a Bias-Voltage-Induced Stress and Its Influence on Magnetoresistance Effect in TaOx Nano-Oxide Layer Spin Valve", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 51 (2012).

4. Hiroaki Suzuki, Tetsuya Nakamura, Hiroaki Endo, Masaaki Doi, Hiroshi Tsukahara, Hiroshi Imamura, Hiromi N. Fuke, Susumu Hashimoto, Hitoshi Iwasaki, and Masashi Sahashi, "Enhancement of microwave oscillation under angled in-plane magnetic field in ferromagnetic nano-contact spin-valves", APPLIED PHYSICS LETTERS, 査読有, 99, 092507 (2011).
5. M. Doi, H. Endo, K. Shirafuji, S. Kawasaki, M. Sahashi, H. N. Fuke, H. Iwasaki and H. Imamura, "Spin-transfer induced microwave oscillation in spin valves with ferromagnetic nano-contacts in oxide spacer layer", J. Phys. D, Fast Track Communication, 査読有, 44, 092001 (2011).
6. Y. Okutomi, K. Miyake, M. Doi, H. N. Fuke, H. Iwasaki, and M. Sahashi, "Spin-transfer torque driven ferromagnetic resonance in nano-contact magnetoresistive devices and its characteristics", J. Appl. Phys., 査読有, 109, 07C727 (2011).
7. J. W. Jung, R. Shiozaki, M. Doi, and M. Sahashi, "Spin scattering asymmetric coefficients and enhanced specific interfacial resistance of fully epitaxial current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance spin valves using alternate monatomic layered [Fe/Co]<sub>n</sub> and a Ag spacer layer", 査読有, J. Appl. Phys., 109, 07C510 (2011).
8. T. Nakamura, M. Doi, S. Hashimoto, H. Iwasaki, M. Sahashi, "Influence of the stress current on spin-torque-oscillator with NCMR-SV devices", IEEE Trans. Magn., 査読有, 47, 3377 (2011).
9. Muftah Al-Mahdawi, M. Doi, S. Hashimoto, H. N. Fuke, H. Iwasaki, M. Sahashi, "Frequency modulation of a Nano-oxide layer-based spin-torque oscillator with FeCo nanocontacts", IEEE Trans. Magn., 査読有, 47, 3380 (2011).
10. Y. Shiokawa, M. Shiota, Y. Watanabe, T. Otsuka, M. Doi, M. Sahashi, "Oxidation and annealing process: morphological change and nanocontact MR in spin valves with FeCo-AlOx NOL spacer", IEEE Trans. Magn., 査読有, 47, 3470 (2011).
11. SeungMo Noh, D. Monma, K. Miyake, M. Doi, T. Kaneko, H. Imamura, M. Sahashi, "Spin dynamics in ferromagnetic resonance

for nano-sized magnetic dot arrays: metrology and insight into magnetization dynamics”, IEEE Trans. Magn., 査読有,47, 2387 (2011).

12. T. Nakamura, H. Suzuki, Y. Okutomi, M. Doi, H. N. Fuke, H. Iwasaki, and M. Sahashi, “Feature of Current-Induced Microwave Oscillation in Nano-contacts Magneto resistive Devices after High-Temperature-Annealing”, IEEE TRANS. MAGN. , 査読有, Vol.46, 2212-2215 (2010).
13. K. Sawada, N. Shimomura, M. Doi, and M. Sahashi, “Anomalous temperature dependence of training effect in specular spin valve using ultrathin Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nano-oxide layer with magnetoelectric effect”, J. Appl. Phys., 査読有, 107, 09D713 (2010).
14. 田中俊行, 遠藤広明, 土井正晶, 福家ひろみ, 岩崎仁志, 佐橋政司, “Fe/AlO<sub>x</sub>-NOL を用いた NCMR 素子におけるマイクロ波発振の特徴”, 日本磁気学会誌, 査読有, 34, 297 (2010).

[学会発表] (計 26 件)

1. Y. Hatayama, “Effect of partially substitution of Dy for Nd-Fe-B / Nd-Cu thin films on the structure and magnetic properties”, 12th Joint MMM/Intermag Conference, 2013.Jan.,17 Chicago, USA.
2. H. Iwama, “Effect of non-magnetic layer on the magnetization process for Nd-Fe-B thin films and circular dots”,12th Joint MMM/Intermag Conference, 2013.Jan.17, Chicago, USA.
3. N. Shimomura, “Demonstration of magneto electric effect in ultrathin Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-oxide layer by training effect”, The 2nd International conference of the AUMS,Oct.4.
4. Hiroki Iwama, “ Magnetization reversal behavior of FePt/MgO/FePt thin film”, ICM, 2012 July. 13, Busan, Korea.
5. 鄭 鎮 源 , “Large current-perpendicular-to-plane giant magneto resistance by enhanced interfacial specific resistance at Fe/Ag interface”, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 31 日, 山形大学 小白川キャンパス.
6. 中村徹哉, NCMR 素子におけるコヒーレント高出力マイクロ波発振, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 31 日, 山形大学 小白川キャンパス.
7. T. Otsuka, “Dependence of Nano-Contacts Magnetoresistance on bulk scattering spin asymmetry in Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> alloys”, IEEE International Magnetism Conference, April 26 (2011), International Convention Center, Taipei.
8. T. Nakamura, “Coherent and High-powered Microwave Excitation in NCMR Spin-Torque Oscillator”, IEEE International Magnetism Conference, April 28 (2011), International Convention Center, Taipei.
9. M. Shiota,” Oxidation and Annealing Process; Morphological Change and Nano-Contact MR in Spin Valves with FeCo-AlO<sub>x</sub> NOL Spacer”, IEEE International Magnetism Conference, April 28 (2011), International Convention Center, Taipei.
10. M. Doi, “Spin Torque Oscillation on Nano-constriction Structured Spin-valve Thin Films”, 5<sup>th</sup> International Workshop on Spin Currents, July 27, (2011), Sendai International Center, Sendai.
11. 岩間弘樹, “FePt/MgO/FePt 円形ドット試料の磁区構造観察”, 日本金属学会 2011 年秋季講演大会, 2011 年 11 月 7 日, 沖縄コンベンションセンター
12. M. Doi, “ Spin Torque Microwave Oscillation on Spin-valve Elements with Ferromagnetic Nano-contacts (Invited) ”, ISAMMA 2010, ISAMMA 2010, 2010 年 7 月 15 日, Sendai, Japan.
13. S. M. Noh, “Pillar Size/Shape Influence on Damping Constant in Field Generating Layer of STO for MAMR Writing Head”, ISAMMA 2010, ISAMMA 2010, 2010 年 7 月 16 日, Sendai, Japan.
14. K. Miyake, “Improvement of MR ratio by high DC bias voltage application in TaO<sub>x</sub>-NOL NCMR spin-valve”, ISAMMA 2010, ISAMMA 2010, 2010 年 7 月 14 日, Sendai, Japan.
15. Y. Shiokawa, “Ion Assisted Oxidation Process in AlO<sub>x</sub> NOL for Nanocontacts MagnetoResistive Devices”, ISAMMA 2010, ISAMMA 2010, 2010 年 7 月 14 日, Sendai, Japan.
16. Y. Shiokawa,” NCMR of Full-Heusler Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.1</sub>Fe<sub>0.9</sub>Si alloy with AlO NOL”, Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2010, 2010 年 8 月 25 日, Kraków, Poland.
17. J. W. Jung,” Large spin scattering asymmetry of fully epitaxial  $\gamma$ -Fe with Alternated Monatomic [Fe/Co]<sub>n</sub> layered CPP-GMR spin valve devices”, Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2010, 2010 年 8 月 24 日, Kraków, Poland.
18. M. Al-Mahdawi,” Response of Nano-

- Contact Magneto-resistive Spin Torque Oscillation to an Injected Microwave Current”, Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2010, 2010年8月24日, Kraków, Poland.
19. Y. Okutomi, ” Rectifying characteristics of radio-frequency current in the Nano-Contact Magnetoresistive device”, Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2010, 2010年8月24日, Kraków, Poland.
  20. J.W. Jung, ” Spin asymmetric interfacial resistance of fully epitaxial alternate monatomic layered [Fe/Co]<sub>n</sub> with Fe/Ag interface in CPP-GMR spin valve devices”, 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2010年11月15日, Atlanta, USA.
  21. Y. Shiokawa, ” Onset of Spin-Scattering-Asymmetry for Nano-Contacts in Ion-Assisted-Oxidation NCMR Devices”, 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2010年11月17日, Atlanta, USA.
  22. Y. Okutomi, ” Spin-Transfer-Torque-Driven Ferromagnetic Resonance in the Nano-Contact Magnetoresistive Device and its Characteristics”, 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2010年11月17日, Atlanta, USA.
  23. J. W. Jung, ” Large spin scattering asymmetry of fully epitaxial film with alternate monatomic layered [Fe/Co]<sub>n</sub> using Ag and Cu spacer in CPP-GMR-SVs”, 第34回日本磁気学会学術講演会, 2010年9月4日, つくば国際会議場・茨城県.
  24. 下村直樹, ” イオンアシスト成膜による反強磁性Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜の作製”, 第34回日本磁気学会学術講演会, 2010年9月4日, つくば国際会議場・茨城県.
  25. 塩田芽実, ” FeCo-AIO<sub>x</sub>NOL系ナノ接点の形成過程と磁気抵抗”, 2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会, 2010年9月14日, 長崎大学・長崎県.
  26. 大塚尚彦, ” Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.1</sub>Fe<sub>0.9</sub>Si ホイスラー合金を用いたナノコンタクトのスピン非対バルク散乱”, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010年9月14日, 長崎大学・長崎県.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称 :

発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土井 正晶 (DOI MASA AKI)  
東北学院大学・工学部・教授  
研究者番号 : 10237167

### (2) 研究分担者

佐橋 政司 (SAHASHI MASASHI)  
東北大学・工学研究科・教授  
研究者番号 : 20361123  
三宅 耕作 (MIYAKE KOUSAKU)  
東北大学・工学研究科・助教  
研究者番号 : 20374960  
今村 裕志 (IMAMURA HIROSHI)  
独立法人産業技術総合研究所・主任研究員  
研究者番号 : 30323091

### (3) 連携研究者

無し