

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360130

研究課題名(和文)負のスピントロニクスデバイス開発

研究課題名(英文)Development of spintronics devices with using negative spin polarization materials

研究代表者

角田 匡清 (TSUNODA, Masakiyo)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80250702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：負のスピントロニクスを示すFe₄Nの類型材料であるMn₄N薄膜およびCo₃FeN薄膜の単相合成を行った。Mn₄N薄膜は垂直磁気異方性を示した。スピントロニクス相互作用ならびに結晶場分裂を取り入れた異方性磁気抵抗(AMR)効果の理論を構築した。Co₃FeNのAMR比は負でありハーフメタルの可能性が示唆された。スピネル薄膜をトンネル障壁層としたFe₄N基強磁性トンネル接合でインバーストンネル磁気抵抗効果が観測された。Fe₄N/Pt二層膜の逆スピントロニクス効果の計測から、強磁性共鳴下でのFe₄N薄膜からの高効率スピントロニクス生成が示された。

研究成果の概要(英文)：We succeeded for the single phase synthesis of Mn₄N and Co₃FeN thin films that have isomorphic structure to Fe₄N showing negative spin polarization. The Mn₄N thin films exhibited perpendicular magnetic anisotropy. We constructed a theory for anisotropic magnetoresistance (AMR) effects, which takes into account the spin-orbit interaction and the crystal field splitting. Negative AMR ratio observed for the Co₃FeN thin films indicated a possibility of them to be half-metals. Inverse tunnel magnetoresistance effects were observed for Fe₄N-based magnetic tunnel junctions with a spinel tunnel barrier. High efficiency for spin current generation under ferromagnetic resonance was suggested for Fe₄N/Pt bilayers by their large inverse spin Hall signals.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子・電気材料工学

キーワード：スピントロニクス 磁性材料 磁気抵抗効果 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

伝導電子の電荷とスピンの両性質を利用したスピントロニクスデバイスが、ハードディスク (HDD) ヘッドや磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM, Spin-RAM) などの応用デバイスに用いられて久しい。これらスピントロニクスデバイスの更なる性能向上には、伝導電子の高いスピン分極率が不可欠であり、上向きもしくは下向きスピンの片側の電子がフェルミ準位で状態を持たない、いわゆるハーフメタル材料の開発が盛んに行われている。実際 Co_2MnSi などに代表されるフルホイスラー合金はハーフメタルであり、それを用いた強磁性トンネル接合膜において大きなトンネル磁気抵抗変化率 (TMR 比) が報告されている (例えば、Y. Sakuraba, *Appl. Phys. Lett.*, 88 (2006) 192508)。一方で、スピン分極率の絶対値を大きくするのみならず、その符号をも制御することで新奇なスピントロニクス物性機能が導出され得ることについては、国内外の研究者を通じて、ほとんど留意されていないのが現状である。

スピントロニクスデバイスに通常用いられる $3d$ 遷移金属合金は正のスピン分極率 (多数スピン電子が伝導を担う) を示すが、近年の理論研究 (S. Kokado, *Phys. Rev. B*, 73 (2006) 172410) によれば、 Fe_4N が大きな負のスピン分極率を有することが示されている。同研究によれば、 Fe_4N は、フェルミ準位における状態密度の分極率 ($P_{\text{DOS}}(E_F) = (D_{\uparrow} - D_{\downarrow}) / (D_{\uparrow} + D_{\downarrow})$; 但し D は状態密度) は -0.6 程度であり、いわゆるハーフメタルではないが、各電子軌道の電気伝導性まで考慮に入れた計算では、伝導率のスピン分極率 ($P(E_F) = (\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}) / (\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow})$; 但し σ は伝導率) は -1 となり、ほぼ完全な負のスピン分極が得られる。

研究代表者のグループでは、この理論研究に着目して、 Fe_4N を強磁性電極に用いた強磁性トンネル接合膜 (MTJ) の研究に着手した結果、 $\text{Fe}_4\text{N}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ の構造を有するトンネル接合膜では新奇な物性であるインバース TMR 効果と非対称な伝導率のバイアス電圧依存性が観測されることを見出した (K. Sunaga, M. Tsunoda, *J. Appl. Phys.*, 102 (2007) 013917)。また、同構造の MTJ で、これまで広く受け容れられてきたスピン角運動量移送理論 (J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.*, 159 (1996) L1) では説明できないインバース電流誘起磁化反転 (CIMS) 現象を観測した (S. Isogami, M. Tsunoda, *Appl. Phys. Express*, 3 (2010) 103002)。さらに、 Fe_4N の負のスピン分極率 (少数スピン電子が伝導を担う) の実験的証拠として、負の異方性磁気抵抗 (AMR) 効果と、低温での AMR 比の特異な増大と AMR 曲線に重畳する \cos^4 成分の

発現を見出している (M. Tsunoda, *Appl. Phys. Express*, 2 (2009) 083001)。

Fe_4N 自体は 1930 年代から知られていた材料であり、その磁性ならびに磁気特性についてはすでに多くの研究成果がある。特に、類属材料である Fe_{16}N_2 が巨大な磁気モーメントを示すという報告 (T. K. Kim and M. Takahashi, *Appl. Phys. Lett.*, 20 (1972) 492) 以来、 Fe_4N に関しても磁気モーメントの体積効果などが現在もお積極的に研究されている (例えば、S. Atiq, *Appl. Phys. Lett.*, 92 (2008) 222507)。一方で、 Fe_4N の磁気伝導特性については、殆んど調べられておらず、前述の Kokado らの理論計算 (2006) によって触発され、近年研究がスタートしたのが現状である。

2. 研究の目的

前述のように、負の大きなスピン分極を有する材料を用いたスピントロニクスデバイスでは、これまでにない新奇な物性機能が得られている。本研究では、これら新奇機能の更なる向上と開拓を目指した物性研究と材料開発を行うと共に、応用デバイスの開発に向けて、通常のスピントロニクスデバイス材料との複合効果の検証、開発を行うことを目的とした。

負のスピン分極を有する強磁性材料を用いたスピントロニクスデバイスを、通常正の分極を有するデバイスと組み合わせることで、相補的特性を有する新奇デバイス機能が実現できる。また、同一デバイス内において正負の分極材料を組み合わせることで、スピントランスファートルクの効率を倍増させることができ、磁化反転電流密度の低減など、Spin-RAM で必要とされる技術課題解決への方策を与えることが期待される。さらに、低障壁高さを有する結晶質バリア材料と Fe_4N を組み合わせることで、低抵抗高 TMR 比を有する強磁性トンネル接合膜が実現できる。

3. 研究の方法

(1) Fe_4N 類型材料薄膜を単相合成するプロセスを確立し、その構造、磁気特性、磁気伝導特性に関する検討を通じて、スピントロニクスデバイス用の新たな負のスピン分極材料もしくは負のスピン分極材料に構造整合する正のスピン分極材料としての可能性を探索する。具体的には、 Fe_4N と同様のペロブスカイト型構造を有する Mn_4N 、ならびに最近の理論研究 (Y. Takahashi, *J. Magn. Magn. Mat.*, 323 (2011) 2941) で、多数スピンの電子がフェルミ準位で状態を持たないハーフメタルとなることが示されている Co_3FeN (図 1) について薄膜合成および磁気ならびに磁気伝導特性の計測を行い、スピントロニクス材料としての可能性探索を行う。

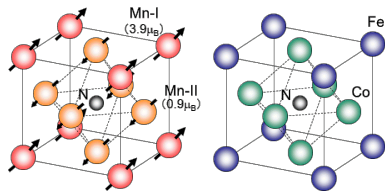


図1 .Mn₄Nの結晶構造と磁気構造(左:フェリ磁性) Co₃FeNの結晶構造(右:強磁性)

- (2) 擬単結晶 Fe₄N 薄膜で観測される 50 K 以下の温度での急激な AMR 比の増大と通常の 3d 遷移金属・合金薄膜では観測されない cos⁴ 成分の出現の原因を明らかにするために、スピン偏極伝導理論構築を行い現象のメカニズム解明を行う。これによって、Fe₄N の負のスピントロニクス効果の起源解明ならびに同分極増強に関する材料設計の手がかりを得る。
- (3) Fe₄N ならびに開発した類型材料との格子ミスフィットが小さく且つ障壁高さの低いバリア層材料を開発し、負のスピントロニクス材料を用いた MTJ を形成する。同 MTJ でのインバース TMR 効果の観測を行う。具体的には Fe₄N 薄膜上への Cu₃N およびスピネルの極薄膜形成法について検討を行い、Fe₄N 基 MTJ の作製とその磁気抵抗効果について検討を行う。
- (4) 負のスピントロニクス材料である Fe₄N 薄膜の新たなスピントロニクスデバイス応用を目指し、マイクロ波励磁によるスピントロニクス生成効率について検討を行う。

4. 研究成果

(1) Mn₄N ならびに Co₃FeN 薄膜の単相合成と磁気および磁気伝導特性

反応性スパッタ法を用いて、MgO(001)単結晶基板上に Mn₄N ならびに Co₃FeN 薄膜の合成を行った。図2には作製された Mn-N 薄膜の飽和磁化の成膜時スパッタガス中における N₂ ガスの混合量依存性(下)ならびに窒素混合量 8% で作製された薄膜の垂直および面内磁化曲線(上)を示す。同下図の上端には X 線回折法により同定した薄膜中の結晶相の情報付した。窒素混合量 5~9% の範囲で ε-Mn₄N の単相合成が可能であることが判ったが、窒素混合量 8% を最大に、それ以下の窒素量では飽和磁化が減少することが明らかとなった。これは、窒素混合量の減少に伴って体心位置に存在する N 原子の欠損が生じることで、同単位胞が反強磁性を示す γ-Mn となるためであると考えられる。本研究で最適の窒素混合量(8%)で作製した試料では明瞭な垂直磁気異方性が観測されている(図2上)。別途磁気トルク計測法で定めた磁気異方性定数は、 $K_u = 0.9 \times 10^6$ erg/cc であった。

(Co_xFe_{1-x})₄N 薄膜についても窒素ガス混合量を変化させた反応性スパッタ法で合成を

試みたところ、およそ 30% の混合量で (Co,Fe)₄N 薄膜が MgO(001)単結晶基板上に単相で合成可能であることが明らかとなった。しかしながら、Co 量の増大に伴って、同ペロブスカイト型相の熱安定性が低下することも明らかとなった。

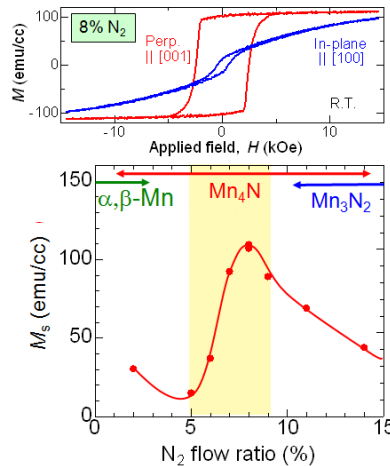


図2. 窒素混合量 8% の反応性スパッタ法で作製した Mn₄N 薄膜の磁化曲線(上)と窒素混合量を変えて作製した薄膜中の結晶相と飽和磁化(下)

作製した Mn₄N ならびに Co₃FeN 擬単結晶薄膜それぞれについて AMR 効果を調べた。図3に I || [100] の場合の AMR 比の測定温度依存性を示す。比較のために Fe₄N の結果を合わせて示している。Co₃FeN 薄膜では全温度範囲で負の AMR 比が観測される一方で、Fe₄N 薄膜で特徴的な 50 K 以下の急激な増大は見られなかった。Mn₄N では AMR 比の符号は室温で正であったものが 70 K 以下で負に変化し、50 K 以下では Fe₄N 同様の負への増大が認められた。後述する AMR 効果の理論解析の結果と考え合わせると、これらの実験結果から Co₃FeN 薄膜ではハーフメタルの可能性がある一方で、Mn₄N 薄膜では少なくとも室温においてはハーフメタルではないことが明らかとなった。

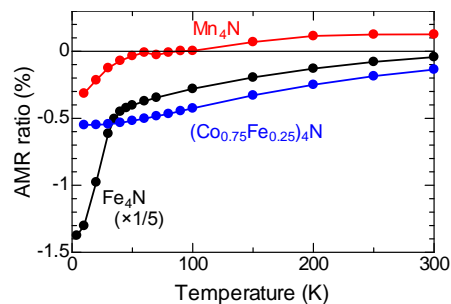


図3. Mn₄N ならびに Co₃FeN 擬単結晶薄膜の AMR 効果の測定温度依存性。

(2) 異方性磁気抵抗効果の理論構築

伝導(s)電子が、スピン軌道相互作用(λ)が存在する局在電子(d)軌道に散乱される効果(s-d

散乱)を取り入れた二流体モデルを用いて、AMR 効果の定式化を行った。従来の AMR 効果の理論(例えば I. A. Campbell, et al., *J. Phys. C*, 3 (1970) S95)に比較して、少数スピンを有する s 電子の散乱を無視せず取り扱ったことで、ハーフメタルを含むより広い強磁性材料の解析に適用が可能となる表式を得た。図 4 には、本理論研究で得られた AMR 比の符号と、フェルミ準位近傍の d 軌道のスピン分極および伝導電子のスピン分極との関係を示す。同図から、Fe, Ni, Co などの通常の強磁性金属では、伝導電子のスピン分極と d 軌道のスピン分極の符号が異なり正の AMR 比を示すのに対して、ハーフメタルならびに Fe_4N では両者の符号が一致するために負の AMR 比が得られることが明らかとなった。

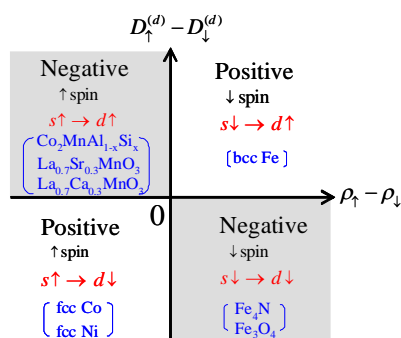


図 4. AMR 比の符号と主要な s - d 散乱との関係：シンプルモデルによる分類

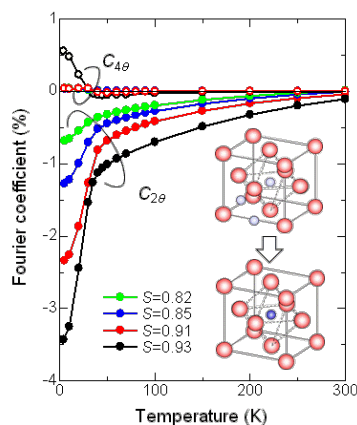


図 5. N 原子位置の規則度を変化させた Fe_4N 薄膜の AMR 効果

上記の AMR 効果の理論をさらに拡張し、局在電子(d)軌道に結晶場分裂 (Δ) の効果を取り入れた理論を構築した。その結果、 $I \parallel [100]$ の場合の AMR 比は、結晶場分裂がない場合には $(\lambda/H_{\text{ex}})^2$ 程度の大きさであるのに対して、結晶場分裂により $(\lambda/\Delta)^2$ 程度の大きさの項が付け加わることが明らかとなった。一般的な関係 $\Delta \ll H_{\text{ex}}$ (d 軌道のスピン分裂の大きさ) から、 Fe_4N の AMR 効果で特徴的に見られた 50 K での急激な増大は、温度の低下に伴う結晶場分裂の顕在化により生じたものと考えられる。実際、作製時の熱処理温度を変化させて、格子中の N 原子位置の規則度を変化させた Fe_4N 薄膜では、規則度の低下に

伴って 50K 以下での AMR 比の急激な増大現象が消失してゆくことが実験により示され(図 5) 結晶場分裂効果を取り入れた本拡張理論と整合することが確認された。

(3) 負のスピン分極材料を用いた強磁性トンネル接合膜

Fe_4N 擬単結晶薄膜上へ、反応性スパッタ法を用いた Cu_3N (バンドギャップ 0.8~1.9 eV (半導体)、 Fe_4N との格子ミスフィット 0.6%) 薄膜のエピタキシャル成長、ならびにスピネルターゲットからの RF スパッタ法および MgAl_2 薄膜の自然酸化法によるスピネル (バンドギャップ 5.4 eV、 Fe_4N との格子ミスフィット 7%) 薄膜の形成を試みた。成膜プロセスならびに成膜条件の最適化により Cu_3N 薄膜ならびにスピネル薄膜が Fe_4N 擬単結晶薄膜上にエピタキシャル成長可能であることを見出した。両薄膜をトンネル障壁層とした $\text{Fe}_4\text{N}/\text{barrier}/\text{CoFeB}$ 構造を有する MTJ を作製した結果、 Cu_3N 薄膜をトンネル障壁とした MTJ では、極めて低い抵抗面積 (RA) 値が得られる一方で、室温における TMR 変化率はほぼ 0 であることが判明した。得られた RA 値は理論計算により求められた値に近いものとなったが、TMR 比は計算による予測値 (200%) に遠く及ばないことが判った。これは、 Cu_3N のバンドギャップが極めて小さいため、室温下においては、熱励起により強磁性電極から Cu_3N の伝導帯に注入された伝導電子がスピン分極情報を失って対向強磁性電極へ伝導するためであると考えられた。

一方で、スピネル薄膜を用いた MTJ では最大変化率 20% を有するインバース TMR 効果 (トンネル障壁層を挟む 2 枚の強磁性電極の磁化配列が反平行状態の方が平行状態よりもトンネル抵抗値が低くなる現象) が観測された(図 6)。 Fe_4N 薄膜に替えて Fe 薄膜を強磁性電極とした MTJ では、通常の TMR 効果 (平行配列の方が反平行配列よりも抵抗小) が得られている(同図) ことから、インバース TMR 効果は Fe_4N 電極の負のスピン分極を反映したものと考えられ、これまでに報告された MgO をトンネル障壁層とした MTJ に限らずインバース TMR 効果が発現することが本研究により明らかとなった。

さらに、本研究で開発したハーフメタルの可能性のある Co_3FeN 薄膜を用い MgO 薄膜をトンネル障壁層とした MTJ ($\text{Co}_3\text{FeN}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ 構造) を作製して、TMR 効果の熱処理温度依存性について検討を行った。その結果、比較試料とした Fe_4N 薄膜を用いた MTJ が熱処理温度の増大に対して TMR 比を徐々に増大させ、350 の熱処理温度で最大 50% の大きさのインバース TMR 効果が得られたのに対して、 Co_3FeN -MTJ では、より低温 (320) の熱処理温度からインバース TMR 効果の劣化が生じ最大の TMR 比の大きさは 20% に留まった。これは前述した $(\text{Co,Fe})_4\text{N}$ 薄膜の Co 添加量増大に伴う熱安定性の低下に

よるものであり、今後 Co_3FeN 薄膜をスピントロニクスデバイスへ応用するためには、熱安定性向上のための構造制御などの成膜技術が必要であることを示している。本報告書では記述していないが、下地薄膜もしくは基板との格子ミスフィットを小さくすることで $(\text{Co,Fe})_4\text{N}$ 薄膜の熱安定性が向上することを既に見出している。

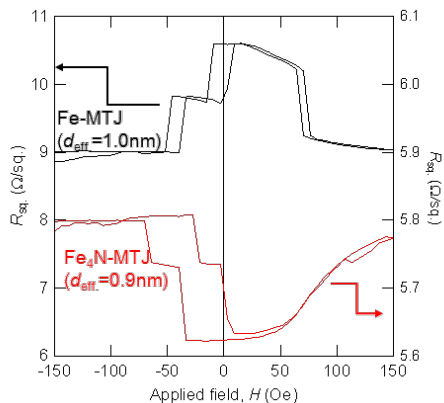


図 6. $(\text{Fe, Fe}_4\text{N})/\text{スピネル}/\text{CoFeB-MTJ}$ (上,下)の磁気抵抗曲線。測定は CIPT により室温で行った。 $H \parallel (\text{Fe, Fe}_4\text{N}) [100]$ 。低磁界の階段状の抵抗変化は擬単結晶フリー層 ($\text{Fe, Fe}_4\text{N}$) の磁化過程によるもの。

(4) マイクロ波励磁による Fe_4N 薄膜からのスピン流生成

熱酸化膜付き Si 基板上に、MgO 下地層を用いて(001)配向させた多結晶 Fe_4N 薄膜上へ Pt 薄膜を積層した二層膜を作製し、逆スピンホール効果を用いて強磁性共鳴下における Fe_4N 薄膜からのスピン流生成(スピンポンピング)効果を計測した。比較試料には Fe_4N 薄膜を $\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$ 薄膜を変えた試料を用い、9.86 GHz, 50 mW のマイクロ波下で Pt 薄膜に生じる直流電圧を室温で測定した。出力の直流印加磁場依存性(FMR プロファイル)のフィッティングから求めた逆スピンホール電圧 (V_{ISHE}) から界面におけるスピン流生成効率(ミキシングコンダクタンス: g_r) を評価した。通常の強磁性金属 (Ni-Fe) に比較して ($g_r = 6.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$) Fe_4N からのスピン流生成効率がおよそ一桁程度高い ($g_r = 1.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$) ことが判った。このことは、 Fe_4N の伝導電子が負のスピン分極を有していることと関係があると考えられ、 Fe_4N を用いた新奇スピントロニクスデバイスの可能性を示す結果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

K. Kabara, M. Tsunoda, and S. Kokado, "Annealing Effects on Nitrogen Site Ordering and Anisotropic Magnetoresistance in Pseudo-Single-Crystal $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ Films", Applied Physics Express, 査読有, 7 (2014) in press

S. Kokado and M. Tsunoda, "Anisotropic magnetoresistance effect of a strong ferromagnet: magnetization direction dependence in a model with crystal field", Phys. Status Solidi C, 査読有, 11 (2014) 1026-1032,

DOI: 10.1002/pssc.201300736

C. T. Chao, C. Y. Kuo, L. Horng, M. Tsunoda, M. Takahashi, and J. C. Wu, "Determination of Thermal Stability of Magnetic Tunnel Junction Using Time-Resolved Single-Shot Measurement", IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, 50 (2014) 1401204-1-4,

DOI: 10.1109/TMAG.2013.2276418

K. Mibu, M. Seto, T. Mitsui, Y. Yoda, R. Masuda, S. Kitao, Y. Kobayashi, E. Suharyad, M. Tanaka, M. Tsunoda, H. Yanagihara, and E. Kita, "Studies on spintronics-related thin films using synchrotron-radiation-based Mossbauer spectroscopy", Hyperfine Interact, 査読有, 217 (2013) 127-135,

DOI: 10.1007/s10751-012-0734-0

S. Kokado and M. Tsunoda, "Anisotropic Magnetoresistance Effect: General Expression of AMR Ratio and Intuitive Explanation for Sign of AMR Ratio", Advanced Materials Research, 査読有, 750-752 (2013) 978-982,

DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.750-752.978

S. Isogami, M. Tsunoda, M. Oogane, A. Sakuma, and M. Takahashi, "Enhancement of Spin Pumping Efficiency in $\text{Fe}_4\text{N}/\text{Pt}$ Bilayer Films", Applied Physics Express, 査読有, 6 (2013) 06300-1-4,

DOI: 10.7567/APEX.6.063004

S. Isogami, M. Tsunoda, M. Oogane, A. Sakuma, and M. Takahashi, "The Enhancement of Magnetic Damping in Fe_4N Films with Increasing Thickness", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 52 (2013) 073001-1-4,

DOI: 10.7567/JJAP.52.073001

S. Kokado, M. Tsunoda, K. Harigaya, and A. Sakuma, "Anisotropic Magnetoresistance Effects in Fe, Co, Ni, Fe_4N and Half-Metallic Ferromagnet: A Systematic Analysis", Journal of The Physical Society of Japan, 査読有, 81 (2012) 024705-1-17,

DOI: 10.1143/JPSJ.81.024705

K. Ito, K. Kabara, H. Takahashi, T. Sanai, K. Toko, T. Suemasu, and M. Tsunoda, "Negative Anisotropic Magnetoresistance in $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ Epitaxial Films on $\text{SrTiO}_3(001)$ Grown by Molecular Beam Epitaxy", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 51 (2012) 068001-1-2,

DOI: 10.1143/JJAP.51.068001

C. T. Chao, C. Y. Kuo, C. C. Chen, L. Horng, Y. J. Chang, T. Wu, S. Isogami, M. Tsunoda,

M. Takahashi, and J. C. Wu, "Coupling strength with off-axial external field in magnetic tunnel junction cells", Journal of Applied Physics, 査読有, 109 (2011) 07B911-1-3,
DOI: 10.1063/1.3560047

[学会発表](計 18 件)

古門聡士, 角田匡清, "強磁性体の異方性磁気抵抗効果: 結晶場を考慮に入れたモデルでの磁化方向依存性", 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年09月25日, 徳島

S. Kokado and M. Tsunoda, "Theoretical Study of Anisotropic Magnetoresistance Effect: Magnetization Direction Dependence in A System with Crystal Field", Donostia International Conference on Nanoscaled Magnetism and Applications, 2013年09月09日, San Sebastian, Spain

角田匡清, 千葉亮一, "スピネル障壁層を用いたFe₄N基強磁性トンネル接合膜の作製", 日本磁気学会 第37回学術講演会, 2013年09月03日, 札幌

角田 匡清, 鹿原 和樹, "擬単結晶(Fe,Co)₄N薄膜の作製とその異方性磁気抵抗効果", 日本磁気学会 第37回学術講演会, 2013年09月03日, 札幌

磯上慎二, 角田匡清, 大兼幹彦, 佐久間昭正, 高橋 研, "擬単結晶Fe₄N膜における磁気緩和の温度および結晶方位依存性", 日本磁気学会 第37回学術講演会, 2013年09月03日, 札幌

S. Kokado and M. Tsunoda, "Anisotropic Magnetoresistance Effect: General Expression of AMR Ratio and Intuitive Explanation for Sign of AMR Ratio", The 3rd International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology", 2013年05月11日, Zhangjiajie, China

S. Kokado, M. Tsunoda, F. Yang, Y. Sakuraba, K. Takanashi, K. Harigaya, A. Sakuma, "Theoretical Study of Anisotropic Magnetoresistance Effect: Magnetization Direction Dependence in Ferromagnet with Crystal Field of Cubic Symmetry", American Physical Society March Meeting 2013, 2013年03月18日, ボルチモア (米国)

M. Tsunoda, "3d-Metal Nitrides for Spintronics", The 2nd International Conference of AUMS (招待講演), 2012年10月02日, 奈良

M. Tsunoda and R. Chiba, "Fe₄N based magnetic tunnel junctions with Cu₃N barrier", The 2nd International Conference of AUMS, 2012年10月02日, 奈良

M. Tsunoda and K. Kabara, "Growth and Magnetic Properties of Pseudo-Single-Crystal Mn₄N Films", 2nd International Conference of AUMS, 2012年10月02日, 奈良

S. Isogami, M. Oogane, A. Sakuma, and M. Tsunoda, "Generation of spin current from γ -Fe₄N film", 2nd International Conference of AUMS, 2012年10月02日, 奈良

古門聡士, 角田匡清, Fujun Yang, 桜庭裕弥, 高梨弘毅, 針谷喜久雄, 佐久間昭正, "強磁性体の異方性磁気抵抗効果の理論的研究: 立方対称結晶場での磁化方向依存性", 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年09月18日, 横浜

S. Kokado, M. Tsunoda, K. Harigaya, and A. Sakuma, "Negative AMR: a necessary condition for half-metallicity", IEEE International Magnetism Conference, 2012年05月07日, バンクーバー (カナダ)

S. Kokado, M. Tsunoda, K. Harigaya, and A. Sakuma, "Anisotropic Magnetoresistance Effects in Fe, Co, Ni, Fe₄N, and Half-Metallic Ferromagnet: A Systematic Analysis", American Physical Society March Meeting 2012, 2012年2月29日, ボストン (米国)

S. Kokado, M. Tsunoda, K. Harigaya, and A. Sakuma, "Anisotropic Magnetoresistance Effects in Fe, Co, Ni, Fe₄N, and Half-Metallic Ferromagnet: A Systematic Analysis", International Workshop for Group-IV Spintronics, 2012年1月20日, 大阪

角田匡清, 稲葉竜也, 高橋研, " γ -Fe₄N 基強磁性トンネル接合用 Cu₃N 障壁膜の作製", 日本磁気学会第 35 回学術講演会, 2011年9月28日, 新潟

磯上慎二, 角田匡清, 大兼幹彦, 佐久間昭正, 高橋研, "負のスピン分極を有する γ -Fe₄N薄膜の磁気緩和定数", 日本磁気学会第35回学術講演会, 2011年9月28日, 新潟

古門聡士, 角田匡清, 針谷喜久雄, 佐久間昭正, "種々の強磁性体の異方性磁気抵抗効果の理論的研究", 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011年9月21日, 富山

[その他]

ホームページ

http://www.ecei.tohoku.ac.jp/ecei_web/Laboratory/takahashi_j_index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

角田 匡清 (TSUNODA, Masakiyo)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80250702

(2) 研究分担者

古門 聡士 (KOKADO, Satoshi)
静岡大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50377719