

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249037

研究課題名(和文) 強誘電体障壁強磁性トンネル接合素子の開発と電界効果によるスピン輸送制御

研究課題名(英文) Development of ferromagnetic tunnel junctions with a ferroelectric barrier layer and the control of their spin-transport by electric field effects

研究代表者

角田 匡清 (TSUNODA, Masakiyo)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80250702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,500,000円

研究成果の概要(和文)：強誘電体障壁の自発分極によるFe4N基強磁性トンネル接合素子のスピン輸送制御を目指した。種々の逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜の合成に成功し、その磁気および磁気輸送特性について実験により明らかにした。新たに構築したスピン軌道相互作用ならびに結晶場分裂を取り入れたスピン偏極伝導理論を用い、異方性磁気抵抗効果の計測を通じて、強磁性体中で伝導を担う電子のスピン分極をその符号を含めて評価した。ペロブスカイト型強誘電体を始めとする複合酸化物薄膜のエピタキシャル成長技術を開発した。第一原理計算により、強誘電体障壁強磁性トンネル接合素子の電界効果について調べた。

研究成果の概要(英文)：This study is aimed to control the spin-transport in Fe4N-based ferromagnetic tunnel junctions through the electric field effect by spontaneous polarization of a ferroelectric tunnel barrier. Various kinds of anti-perovskite-type transition-metal nitride thin films were successfully synthesized and their magnetic and magneto-transport properties were examined. The spin-polarized transport theory was newly constructed taking into account the spin-orbit interaction and crystal field effects, and successfully evaluated the spin-polarization of conduction electrons in ferromagnets with its sign through the anisotropic magnetoresistance effects. Epitaxial growth technique of thin films was developed for complex oxides as perovskite-type ferroelectrics. Electric field effects of ferromagnetic tunnel junctions with a ferroelectric barrier layer were investigated by the first-principles calculation.

研究分野：磁性薄膜工学

キーワード：スピントロニクス 磁性材料 磁気抵抗効果 スピン分極 電界効果

1. 研究開始当初の背景

近年、強磁性金属の電界効果の研究が盛んである。電界効果は主に極薄膜の磁気異方性の変化として観測され、電界で強磁性薄膜表面に誘起された電子が 3d 軌道の占有状態を変化させることによって薄膜表面の軌道磁気モーメントが異方的になることが原因と考えられている。これら先駆的研究では、薄膜表面への大きな電界印加に電解質の電気二重層を利用しているため、実用素子応用にはブレークスルーが必要である。強磁性薄膜表面に大きな電界を印加する方法としては、電気二重層の他に、強誘電体薄膜との接合構造が考えられる。近年、巨大な自発分極を有する強誘電体薄膜材料が開発されており、 BiFeO_3 薄膜の自発分極は $150 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ に及ぶ。これは、後述する Fe_4N 薄膜と組み合わせた場合に界面の Fe 原子あたり 0.7 個の電子を誘起する量に相当する。また強磁性トンネル接合(MTJ)で見られるトンネル磁気抵抗(TMR)効果は、強磁性電極の接合界面の電子状態を反映した現象であり、電界効果による強磁性金属表面(界面)の電子状態変化を直接的に観測できる。 Fe_4N の結晶構造は逆ペロブスカイト型構造であり、 BiFeO_3 を含む代表的な強誘電体酸化物のペロブスカイト型構造との類似性が高く、高品質なヘテロ接合素子を形成できる可能性が高い。

Fe_4N は、Fe と N の電子軌道混成によって、フェルミ準位における多数スピン電子の状態密度が小さくなり、大きな負のスピンの分極を示す。研究代表者のグループでは、これに着目して Fe_4N を強磁性電極に用いた MTJ の研究に着手し、室温で大きなインバース TMR 効果を観測した。また負のスピンの分極率の実験的証拠として、 Fe_4N 単層膜で負の異方性磁気抵抗(AMR)効果を見出した。さらに近年、 Fe_4N の類型材料である Mn_4N 薄膜(フェリ磁性体)の単相合成に成功し新奇な垂直磁気異方性が発現することを見出した。また、 $\text{Fe}_4\text{N}-\text{Co}_4\text{N}$ 合金系に関する最近の理論研究で、 Co_3FeN が多数スピン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となることも示されている。これら類型物質の材料変化を Fe_4N の電子数の増減と捉えたと、 Fe_4N への電界効果は、大きな界面磁性の変調(電子数 - 1 (Fe→Mn): フェリ磁性・垂直磁気異方性化、電子数+0.75 (Fe→ Co_3Fe): ハーフメタル化)をもたらすと考えられる。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、ペロブスカイト型強誘電体酸化物をトンネル障壁とした Fe_4N 基強磁性トンネル接合を開発し、電界効果によってもたらされる界面 Fe_4N 層の磁性変調とスピン輸送特性の相関計測を通じた物性研究を行う。それにより、室温動作可能な電界制御型新奇スピントロニクス固体素子の開発につなげることを目的とした。

3. 研究の方法

電界効果による界面電子数の増減に伴う Fe_4N の磁性変調に関する知見を得るために、先ず(1)種々の逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜を合成し、その磁気特性評価を行った。薄膜合成には、反応性スパッタリング法ならびに分子線エピタキシー(MBE)法を用い、成膜手法の違いによる薄膜物性の変化に留意した。その後、(2)同薄膜の磁気輸送特性を調べることで、スピントロニクス材料としての基本性能の把握を行った。磁気輸送特性評価は、主に AMR 効果ならびに異常ホール効果の計測実験と、伝導理論構築の両面で行った。さらに、(3)強誘電体トンネル障壁層薄膜の高品質成膜プロセスの開発を行った。一般に酸化物薄膜を結晶性良く成長させるためには、基板温度を高温($> 400^\circ\text{C}$)にする必要があるが、界面拡散の無いヘテロ接合を実現するために、より低温での複合酸化物薄膜のエピタキシャル成長技術を確認することを目指した。また、(4)第一原理計算によるペロブスカイト障壁 MTJ の電子状態解析を行い、強誘電体障壁層の誘電分極が Fe_4N を始めとする逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜界面の物性に及ぼす影響について調査を行った。

4. 研究成果

(1) 逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜の合成とその磁気特性

本研究においては、すでにその磁気特性が明らかとなっている Fe_4N および Mn_4N 薄膜を終端組成として、 $\text{Co}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ 、 $\text{Ni}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ ($x = 0 \sim 4$)、 $\text{Co}_x\text{Mn}_{4-x}\text{N}$ ($x = 0, 0.2$)、 $\text{Mn}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ ($x = 3, 4$) のそれぞれの組成の薄膜を合成し、その磁気特性について評価を行った。いずれの薄膜においても、基板温度等の成膜条件を調整することによって、 SrTiO_3 もしくは MgO 単結晶基板上に、逆ペロブスカイト相の単相エピタキシャル成長に成功した。 $\text{Co}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ 、 $\text{Ni}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ 薄膜においては、Co、Ni それぞれの添加量増大に伴って、逆ペロブスカイト相の耐熱性が低下することが判った。磁気特性評価の例として、図 1 に室温ならびに 2K で測定した $\text{Ni}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ 薄膜の磁化曲線を示す。

Ni_4N 薄膜では、室温および 2K のいずれでも自発磁化を示さず、同相が非磁性であるこ

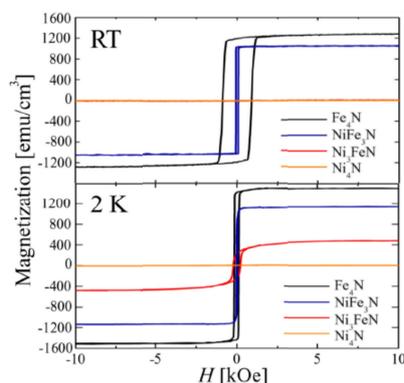


図 1 . $\text{Ni}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ 薄膜の磁化曲線

とを示している。また、Ni₃FeN 薄膜のキュリー温度 (T_C) が室温以下であることも同図より明らかであり、詳細な磁化の温度変化測定から、 $T_C = 266\text{K}$ と見積もられた。このような組成変化に対する急激な磁気転移温度の変化は Co_xFe_{4-x}N 薄膜では認められなかった。

また Co_{0.2}Mn_{3.8}N 薄膜では、Mn₄N と同様に垂直磁気異方性が観測されるが、その室温における飽和磁化ならびに磁気異方性エネルギーは、Mn₄N に対してそれぞれ 25% および 10% 程度小さくなること、さらに Mn₃FeN では、飽和磁化が Mn₄N に対して 10% 程度減少し面内磁化容易になることも明らかとなった。

(2) 逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜の磁気輸送特性とスピン偏極伝導理論

Fe₄N 薄膜の AMR 効果は、50 K 以下の低温で図 2 (三角印) に見られるような異常 (電流方向を含む面内での磁化回転に対する抵抗変化の 2 回対称成分 (C_2) の急激な増大と 4 回対称成分 (C_4) の出現) を示すことが報告されている。スピン軌道相互作用だけを取り入れた不純物による電子散乱理論では、d 軌道の変形はスピン方向に対して一軸的に生じるため、 C_4 の 50K 以下での出現を説明することができない。そこで本研究で、スピン軌道相互作用と正方対称結晶場効果を取

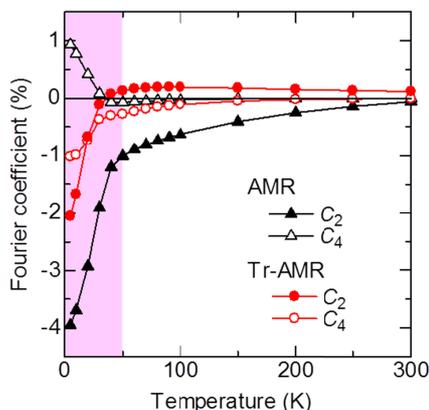


図 2 . Fe₄N 薄膜の AMR 効果

り入れた電子散乱理論を構築した。

図 3 に d 軌道の変形の例として、正方対称結晶場下における少数スピン電子の $d_{3z^2-r^2}$ 軌道 (波動関数の方位成分) のスピンの方向 (ϕ) に対する変化の様子を示す。xy 平面方向に伸びた軌道が z 軸対称から変形して小判型になっており、矢印で示したスピンの方向の変化に伴ってその長軸が xy 平面内でスピンと逆方向に回転してゆく様子が見られる。すなわち、x 軸方向の波動関数の確率振幅が $\cos 2\phi$ に比例して変調する成分を含む。電流が x 軸方向に流れている場合の s-d 散乱による抵抗率は d 軌道の x 軸方向への広がりによって決まる。図 3 に例示した $d_{3z^2-r^2}$ 軌道の場合、x 軸方向の波動関数に $\cos 2\phi$ に比例して

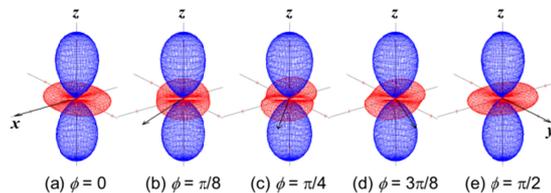


図 3 . 正方対称結晶場下の $d_{3z^2-r^2}$ 軌道

変調する成分が含まれるため、電気抵抗のスピン方向依存性には 2 回対称成分のみならず 4 回対称成分が含まれることになり、結果 C_4 の原因となる。すなわち本研究のような薄膜試料の場合に想定される、測定温度低下に伴う膜厚方向の結晶格子の収縮は、立方晶から正方晶への結晶対称場の変化を誘起し、それに伴って AMR 効果 (C_2 , C_4) の温度変化が生じたものと考えられる。

上述した 50K 以下の温度での Fe₄N 格子の立方晶 正方晶転移は、transverse-AMR 効果 (以下 Tr-AMR 効果) の測定により検証できる。Tr-AMR 効果は通常の AMR 効果と異なり、電流ベクトル (x 方向) に垂直な面 (yz 面) 内で磁化を回転させた場合の電気抵抗率の変化である。結晶対称性の議論から、正方晶であれば Tr-AMR 曲線に $\cos 2\theta$ 成分が含まれる。図 2 (丸印) には Fe₄N 薄膜の Tr-AMR 曲線の C_2 および C_4 の測定温度依存性を示す。300K~50K の範囲では小さな正の値であった C_2 が、50 K 以下の温度から急激に負に増大しており、同温度で立方晶 正方晶転移が生じていることが示された。

異常ホール効果 (AHE) についてもその起源はスピン軌道相互作用であり、AMR 効果の低温異常が AHE にも何らかの形で表れると期待される。図 4 に Fe₄N 薄膜の異常ホール伝導度 (σ_{AH}) の測定温度依存性を示す。 σ_{AH} は 300K から 50K の範囲では温度低下に伴って直線的に増大するが、50K 以下の温度で急激に減少することが判る。このような変化は前述した AMR 効果の低温異常によく対応しており、立方晶 正方晶転移によって異常ホール効果も影響を受けているものと推察される。すなわち正方晶転移に伴う e_g 軌道

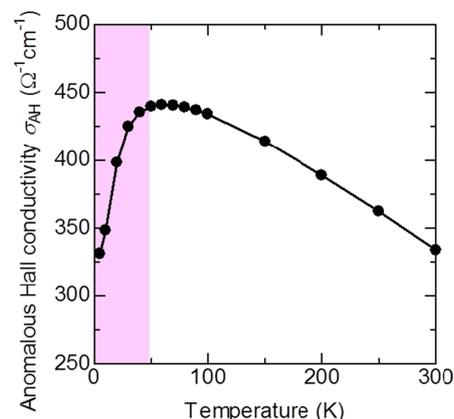


図 4 . Fe₄N 薄膜の異常ホール効果

と t_{2g} 軌道それぞれの分裂によってフェルミ準位上での軌道角運動量が変化し、その結果スピン軌道相互作用に起因する異常ホール伝導度が変化したものと考えられる。

Mn_4N 薄膜に対しても同様に AMR 効果および AHE の測定を行った結果、 Fe_4N と同様の低温異常が 100K 付近から生じることが明らかとなった。さらに $Co_xFe_{4-x}N$, $Ni_xFe_{4-x}N$, Mn_4N 薄膜について測定した AMR 効果に対して、正方晶結晶場効果を取り入れた電子散乱理論を用いて解析を行った結果、それぞれの薄膜で電気伝導を担っているのは、前二者で少数スピン電子、 Mn_4N 薄膜で多数スピン電子であることも明らかとなった。

(3) 高品質ペロブスカイト型強誘電体障壁膜の開発

ペロブスカイト型酸化物障壁膜の作製に先立ち、同様の複合酸化物である $MgAl_2O_4$ 障壁膜の作製について検討を行った。図 5 に、(a) MgO 基板上にエピタキシャル成長させた Fe 薄膜、ならびに(b) Si 単結晶基板上にエピタキシャル成長させた Fe_4N 薄膜、のそれぞれの上に成膜した 20 nm 厚の $MgAl_2O_4$ 薄膜の in-plane XRD プロファイルを示す。青色および緑色のプロファイルはそれぞれ散乱ベクトルを $MgO[200]$ および $MgO[220]$ と平行にした場合の結果である。比較の為、 $MgAl_2O_4$ 薄膜を形成していない各下地のプロファイルも黒色で重ねて示している。図中ピンク色で示した下地プロファイルとの差分が $MgAl_2O_4$ 薄膜による回折線であり、同図の結果から、 $MgAl_2O_4$ 薄膜が、 Fe および Fe_4N 薄膜上にエピタキシャル成長していることが判った。一方でアモルファス下地上に形成した場合には、 $MgAl_2O_4$ 薄膜は十分に結晶化しないことが明らかとなった。

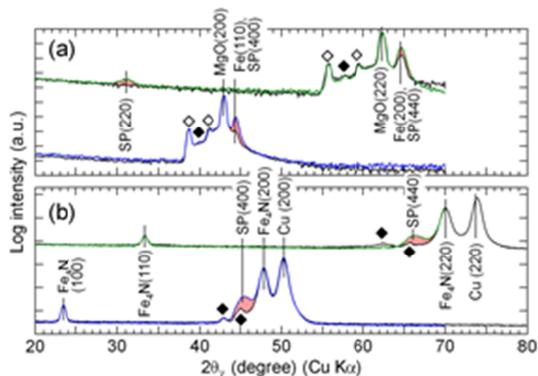


図 5 . $MgAl_2O_4$ 薄膜の XRD プロファイル

図 6 には、(Fe or Fe_4N)/ $MgAl_2O_4$ /CoFeB 構造の Fe 基 MTJ および Fe_4N 基 MTJ の TMR 比の障壁膜厚依存性を示す。負の TMR 比はインバース TMR 効果を意味している。文献で報告されている大きな TMR 比 ($> 200\%$) には及ばないが、最大で 70% 程度の TMR が得られることが判った。

$SrTiO_3$ および $BaTiO_3$ を用いて同様の検討を行った結果、これらペロブスカイト型酸化

物薄膜においては、十分な結晶性を得るには、下地層を用いたエピタキシャル成長に加えて、成膜温度もしくは成膜後の熱処理温度を高温 ($> 350^\circ C$) とする必要があることが明らかとなった。また、同薄膜を障壁とした MTJ では、強磁性層界面の酸化に起因するトンネル伝導特性の劣化が顕著であり、十分な TMR 効果が得られなかった。

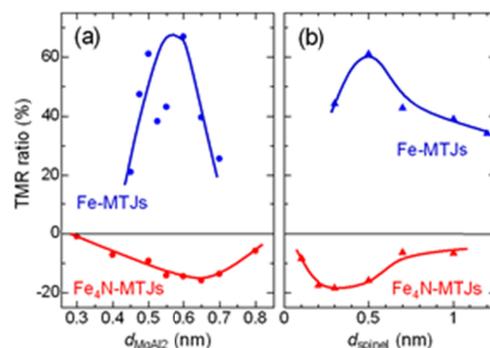


図 6 . Fe 基および Fe_4N 基 MTJ の TMR 効果

(4) 強誘電体障壁強磁性トンネル接合素子の電界効果の検討

Fe_4N ($CoFe_3N$) 9 層と $BaTiO_3$ 13 層からなるヘテロ構造 (図 7) について $BaTiO_3$ の電気分極方向と界面磁性との関係について調べた。安定な界面構造を決定するために、終端面を変えて形成エネルギーの比較を行ったところ、 $Fe_4N/BaTiO_3$ と $CoFe_3N/BaTiO_3$ 界面共に、図 7 に示すような Fe_2N/TiO の終端構造が最も安定であることが確認された。分極方向による強磁性層の界面の磁性変化を調べたところ、 $BaTiO_3$ の自発分極の大きさから、界面での電子数変化 ($\sim 0.025e/Fe\text{-atom}$) による磁性変化は顕著ではないが、磁化については、 $Fe_4N/BaTiO_3$ と $CoFe_3N/BaTiO_3$ の界面それぞれで、 $1.37\mu_B$, $1.34\mu_B$ と非常に大きな変化が得られた。この巨大な磁化の変化は、逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物中の界面から 2 層目の体心位置の Fe 原子 (図 7 $Fe(\text{II}')$) が正極・負極側でそれぞれ低スピン・高スピン状態をとることに起因している。正極側の界面では、 Fe_4N ($CoFe_3N$) の層間距離が縮まり、 Fe 原子間距離が短くなることで低スピン状態が安定化していることが判った。

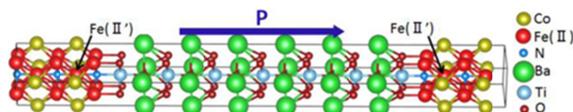


図 7 . 強誘電状態にある $CoFe_3N/BaTiO_3/CoFe_3N$ 接合の構造

5 . 主な発表論文等

【雑誌論文】(計 24 件)

K. Kabara, M. Tsunoda, and S. Kokado, "Magneto-transport properties of pseudo-single-crystal Mn_4N thin films", 査読有, AIP Advances 7 (2017) 056416. (DOI: 10.1063/1.4974065)

F. Takata, K. Kabara, K. Ito, M. Tsunoda, T. Suemasu, "Negative anisotropic magnetoresistance resulting from minority spin transport in $\text{Ni}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ ($x = 1$ and 3) epitaxial films", 査読有, Journal of Applied Physics **121** (2017) 023903. (DOI:10.1063/1.4974002)

角田匡清, 鹿原和樹, 古門聡土, "[招待論文]逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜の電流磁気効果", 査読有, まぐね **11** (2016) 125.

S. Kokado, Y. Sakuraba, and M. Tsunoda, "Spin polarization ratios of resistivity and density of states estimated from anisotropic magnetoresistance ratio for nearly half-metallic ferromagnets", 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. **55** (2016) 108004. (DOI:10.7576/JJAP.55108004)

F. Takata, K. Ito, S. Higashikozono, T. Gushi, K. Toko, T. Suemasu, "Epitaxial growth and magnetic properties of $\text{Ni}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ ($x = 0, 1, 3,$ and 4) films on $\text{SrTiO}_3(001)$ substrates", 査読有, Journal of Applied Physics **120** (2016) 083907. (DOI: 10.1063/1.4961734)

S. Isogami and M. Tsunoda, "Enhanced inverse spin-Hall voltage in (001) oriented $\text{Fe}_4\text{N}/\text{Pt}$ polycrystalline films without contribution of planar-Hall effect", 査読有, Japanese Journal of Applied Physics **55** (2016) 043001. (DOI:10.7567/JJAP.55.043001)

K. Ito, Y. Yasutomi, K. Kabara, T. Gushi, S. Higashikozono, K. Toko, M. Tsunoda, and T. Suemasu, "Perpendicular magnetic anisotropy in $\text{Co}_x\text{Mn}_{4-x}\text{N}$ ($x = 0$ and 0.2) epitaxial films and possibility of tetragonal Mn_4N phase", 査読有, AIP Advances **6** (2016) 056201. (DOI:10.1063/1.4942548)

K. Kabara, M. Tsunoda, and S. Kokado, "Anomalous Hall effects in pseudo-single-crystal γ' - Fe_4N thin films", 査読有, AIP Advances **6** (2016) 055801. (DOI:10.1063/1.4942550)

K. Kabara, M. Tsunoda, and S. Kokado, "Transverse anisotropic magnetoresistance effects in pseudo-single-crystal γ' - Fe_4N thin films", 査読有, AIP Advances **6** (2016) 055818. (DOI:10.1063/1.4943923)

K. Ito, T. Sanai, Y. Yasutomi, T. Gushi, K. Toko, H. Yanagihara, M. Tsunoda, E. Kita, and T. Suemasu, "Mossbauer study on epitaxial $\text{Co}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ films grown by molecular beam epitaxy", 査読有, Journal of Applied Physics **117** (2015) 17B717. (DOI:10.1063/1.4914342)

S. Kokado and M. Tsunoda, "Twofold and Fourfold Symmetric Anisotropic Magnetoresistance Effect in A Model with Crystal Field", 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 094710. (DOI:10.7566/JPSJ.84.094710)

K. Kabara and M. Tsunoda, "Perpendicular magnetic anisotropy of Mn_4N films fabricated by reactive sputtering method", 査読有, J. Appl. Phys. **117** (2015) 17B512. (DOI: 10.1063/1.4913730)

M. Tsunoda, R. Chiba, and K. Kabara, "Fabrication of MgAl_2O_4 tunnel barrier by radio frequency sputtering method and magnetoresistance effect through it with Fe or Fe_4N ferromagnetic electrode", 査読有, J. Appl. Phys. **117** (2015) 17D703. (DOI: 10.1063/1.4906762)

K. Ito, K. Kabara, T. Sanai, K. Toko, Y. Imai, M. Tsunoda, and T. Suemasu, "Sign of the spin-polarization in cobalt-iron nitride films determined by the anisotropic magnetoresistance effect", 査読有, J. Appl. Phys. **116** (2014) 053912. (DOI:10.1063/1.4892179)

S. Kokado and M. Tsunoda, "Anisotropic magnetoresistance effect of a strong ferromagnet: magnetization direction dependence in a model with crystal field", 査読有, phys. stat. solidi (c) **11** (2014) 1026. (DOI:10.1002/pssc.201300736)

K. Kabara, M. Tsunoda, and S. Kokado, "Annealing effects on nitrogen site ordering and anisotropic magnetoresistance in pseudo-single-crystal γ' - Fe_4N films", 査読有, Appl. Phys. Express **7** (2014) 063003. (DOI:10.7567/APEX.7.063003)

S. Isogami, M. Tsunoda, M. Oogane, A. Sakuma, and M. Takahashi, "Dependence of Magnetic Damping on Temperature and Crystal Orientation in Epitaxial Fe_4N Thin Films", 査読有, J. Magn. Soc. Jpn. **38** (2014) 162. (DOI: 10.3379/msjmag.1406R001)

【学会発表】(計 66 件)

S. Kokado, Y. Sakuraba, M. Tsunoda, "Relational expression between spin polarization ratio and anisotropic magnetoresistance ratio for nearly half-metallic ferromagnets", 81st DPG Spring Meeting, 2017年3月20日,「ドレスデン(ドイツ)」

隈田 壮, 辻川 雅人, 白井 正文, " $\text{CoFe}_3\text{N}/\text{BaTiO}_3$ 接合界面における電気分極反転に伴う巨大な磁気モーメント変化", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14日,「パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)」

安西 聡仁, 具志 俊希, 東小園 創真, 高田 郁弥, 都甲 薫, 末益 崇, "逆ペロブスカイト型強磁性窒化物 $\text{Mn}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ 薄膜の磁気特性", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14日,「パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)」

角田匡清, 鹿原和樹, 古門聡土, "[招待講演]逆ペロブスカイト型遷移金属窒化物薄膜の磁気伝導特性", 第 2 回磁性材料・磁性薄膜研究会, 2017年2月20日,「名古屋工業

大学(愛知県・名古屋市)」
S. Kokado and M. Tsunoda, "[招待講演] Intuitive Explanation of Anisotropic Magnetoresistance (AMR) Effect and Necessary Condition for Half-Metallic Ferromagnet -Negative AMR-", Seminar at Department of Physics, Tsinghua University, 2017年1月6日,「北京(中国)」
K. Kabara, M. Tsunoda, and S. Kokado, "Magneto-transport properties of pseudo-single-crystal Mn_4N thin films", 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016年11月4日,「ニューオリンズ(アメリカ)」
S. Isogami, "Dependence of spin dynamics on nitrogen site ordering in Fe_4N thin films", 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016年11月3日,「ニューオリンズ(アメリカ)」
S. Kokado and M. Tsunoda, "[招待講演] Theoretical Study on Anisotropic Magnetoresistance Effects in Ferromagnets", International Symposium on Innovative Materials and Physics, 2016年11月22日,「ウロンゴン(オーストラリア)」
磯上慎二, 水口将輝, 高梨弘毅, "擬単結晶 Fe_4N 薄膜における異常ネルンスト効果の結晶方位依存性", 第40回日本磁気学会学術講演会, 2016年9月8日,「金沢大学(石川県・金沢市)」
M. Tsunoda, K. Kabara, and S. Kokado, "Low temperature anomalies of galvano-magnetic effects in γ' - Fe_4N thin films", 8th Joint European Magnetic Symposia, 2016年8月23日,「グラスゴー(イギリス)」
M. Tsujikawa, Y. Masuzawa, M. Shirai, "First-principles study on the electronic and magnetic properties of $BiFeO_3$ and $Bi(Fe,Co)O_3$ ", 2016 Japan & France joint workshop, 2016年5月20日,「パリ(フランス)」
S. Kokado, M. Tsunoda, "Twofold and Fourfold Symmetric Anisotropic Magnetoresistance Effect in a Model with Crystal Field", DPG Spring Meeting 2016, 2016年3月8日,「レーゲンスブルク(ドイツ)」
K. Kabara, M. Tsunoda, S. Kokado, "Anomalous Hall effect in pseudo-single-crystal γ' - Fe_4N thin films", 13th Joint MMM-Intermag Conference, 2016年1月15日,「サンディエゴ(アメリカ)」
S. Isogami and M. Tsunoda, "Enhanced spin-Hall voltage in Fe_4N/Pt bilayer films", 13th Joint MMM-Intermag conference, 2016年1月14日,「サンディエゴ(アメリカ)」
K. Kabara, M. Tsunoda, S. Kokado, "Transverse anisotropic magnetoresistance effects in pseudo-single-crystal γ' - Fe_4N thin films", 13th Joint MMM-Intermag Conference, 2016年1月14日,「サンディエゴ

(アメリカ)」
K. Ito, Y. Yasutomi, K. Kabara, T. Gushi, S. Higashikozono, K. Toko, M. Tsunoda, and T. Suemasu, "Perpendicular magnetic anisotropy of $Co_xMn_{4-x}N$ ($x = 0$ and 0.2) epitaxial films on $SrTiO_3(001)$ substrates", 13th Joint MMM-Intermag Conference, 2016年1月12日,「サンディエゴ(アメリカ)」
角田匡清, 鹿原和樹, 古門聡士, "[招待講演] Fe_4N 擬単結晶薄膜の異方性磁気抵抗効果と異常ホール効果", 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 2015年10月22日,「大阪大学(大阪府・吹田市)」
角田匡清, 古門聡士, "[招待講演] Fe_4N 薄膜の異方性磁気抵抗効果", みちのく磁性談話会, 2015年6月6日,「宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城県・蔵王町)」
Y. Sakuraba, S. Kokado, Y. Hirayama, T. Furubayashi, H. Sukegawa, S. Li, Y. K. Takahashi, and K. Hono, "[招待講演] Novel approach to investigate spin-polarization in half-metallic Heusler compounds via anisotropic magnetoresistance effect", 59th Annual MMM Conference, 2014年11月4日,「ホノルル(アメリカ)」
鹿原和樹, 角田匡清, " $(Fe,Co)_4N$ 薄膜を用いた強磁性トンネル接合の作製", 第38回日本磁気学会学術講演会, 2014年9月4日,「慶應義塾大学(神奈川県・横浜市)」

【その他】

ホームページ

http://www.ecei.tohoku.ac.jp/electronic_physics/

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
末益 崇 (SUEMASU, Takashi)
筑波大学・数理物理系・教授
研究者番号：40282339
- (3) 研究分担者
白井 正文 (SHIRAI, Masafumi)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：70221306
- (4) 研究分担者
古門 聡士 (KOKADO, Satoshi)
静岡大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50377719
- (5) 研究分担者
磯上 慎二 (ISOGAMI, Shinji)
福島工業高等専門学校・一般教科(物理科)・准教授
研究者番号：10586853