

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400337

研究課題名(和文) 磁性絶縁体/金属ナノ構造におけるスピホール磁気抵抗効果の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study of spin Hall magnetoresistance in magnetic insulator/metal nanostructures

研究代表者

高橋 三郎 (TAKAHASHI, Saburo)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：60171485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性絶縁体と非磁性金属からなる複合ナノ構造(ハイブリッド構造)において、従来の金属強磁性体の異方性磁気抵抗効果と異なった新しい機構による磁気抵抗効果を提案した。強磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット(YIG)と白金(Pt)からなる2層ナノ構造では、スピン軌道相互作用の大きい白金層でスピホール効果と逆スピホール効果が同時に働くことにより新しいタイプの磁気抵抗効果(スピホール磁気抵抗効果)が出現することを提案し、磁性絶縁体/非磁性金属の接合界面近傍で発現する新規な非平衡スピン伝導現象を開拓した。

研究成果の概要(英文)：In hybrid nanostructures consisting of a ferromagnetic insulator and a nonmagnetic metal, a new type of magnetoresistance effect different from the conventional anisotropic magnetoresistance (AMR) of ferromagnets is proposed. In a bilayer of a ferromagnetic insulator, such as yttrium iron garnet (YIG), and a heavy metal, such as platinum (Pt), we predicted a new magnetoresistance called the spin Hall magnetoresistance (SMR), which is caused by simultaneous action of spin Hall effect and inverse spin Hall effect in the heavy metal layer with strong spin-orbit interaction, and explored static and dynamic spin transport phenomena caused by SMR, which have been observed in recent experiments.

研究分野：数物系科学

キーワード：スピントロニクス 強磁性絶縁体 スピン流 スピン蓄積 スピホール効果 スピホール磁気効果
スピントルク磁気共鳴 スピン依存伝導

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス分野では、磁性ナノ構造における巨大磁気抵抗効果、電流駆動磁化反転、スピンポンピング、スピンホール効果などのスピン依存伝導現象の基礎研究のみならず、これらの現象を利用した磁気センサーや磁気メモリ(MRAM)などへの応用研究が国内外で活発に行われている。特に、スピントロニクスは次世代の情報技術として有力視されており、その実用化に向けて、ナノ構造におけるスピン流生成とスピン流注入による磁気制御の効率化が課題となっている。しかしながら、従来の強磁性金属を用いたナノ構造素子では、強磁性金属中に電流を流すことにより生じる熱発生や電力消費が問題となってくる。これらの課題や問題点を解決する有力な候補として強磁性絶縁体を用いた絶縁体スピントロニクスが大きな注目を集めている。これまで研究代表者は、絶縁体スピントロニクスにおけるスピン波励起(マグノン)に着目し、強磁性絶縁体のマグノンを利用した磁性ナノ構造のスピン伝導の理論を構築してきた。特に、強磁性体絶縁体と非磁性金属の接合界面で伝導電子と局在スピンの間に働く交換相互作用により、非磁性金属のスピン流(スピン蓄積)からマグノン流(マグノン蓄積)への変換、およびその逆変換が起こることを明らかにしてきた。これにより、実験グループと共同で発見したスピンゼーベック効果や電気信号伝送の理論的解析が可能になってきた。

2. 研究の目的

本研究では、強磁性絶縁体と非磁性金属からなる複合ナノ構造(ハイブリッド構造)において、従来の金属強磁性体の異方性磁気抵抗効果と本質的に異なった新しい機構による磁気抵抗効果を提案する。強磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット(YIG)と白金(Pt)からなる2層ナノ構造では、スピン軌道相互作用の強い白金層でスピンホール効果と逆スピンホール効果が同時に働くことにより新しいタイプの磁気抵抗効果(スピンホール磁気抵抗効果)が出現することを提案し、磁性絶縁体/非磁性金属の接合界面近傍で発現する新規な非平衡スピン伝導現象を見出す。

3. 研究の方法

強磁性絶縁体と非磁性金属からなる複合ナノ構造におけるスピン伝導現象を理論的に解明する。強磁性絶縁体/非磁性金属の界面で、伝導電子と局在スピンの間に働く交換相互作用により、伝導電子のスピン反転、磁気励起(マグノンの生成消滅)、スピントルク型スピン吸収が起こり、強磁性絶縁体と非磁性金属の間でスピン角運動量の移行が生じる。このような界面での量子力学的過程を取り入れて、界面スピン流、角運動量移行による磁気励起とスピントルク、スピンホール磁気抵抗効果、及び高周波特性を調べる。強磁性

絶縁体を用いた磁性ナノ構造において発現するスピン伝導現象を、線形応答理論、スピン拡散伝導理論、ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を用いて理論的に明らかにする。

4. 研究成果

(1)強磁性絶縁体(FI)と非磁性金属(N)からなる2層のナノ構造膜におけるスピンホール磁気抵抗効果の理論を構築した。非磁性金属膜に電流を流すと、スピンホール効果により非磁性金属膜にスピン流とスピン蓄積が生じ、その一部は接合界面を通して強磁性絶縁体層に吸収される。強磁性絶縁体層の磁化の向きを変えると、吸収されるスピンの量が変化し、非磁性金属膜内のスピン流が変調を受ける。このスピン流の変調は、逆スピンホール効果により、印加した電流の大きさを変調する。この現象はスピンホール効果と逆スピンホール効果が同時に作用することにより発現する新しいタイプの磁気抵抗効果であり、スピンホール磁気抵抗効果(SMR)と命名した。初年度は、スピンホール磁気抵抗効果の定式化を行い、任意の磁化方向に対する磁気抵抗を計算する理論式を導出した。その結果、スピンホール磁気抵抗効果は、FI層の磁化とN層のスピン蓄積の相対的向きに依存することが明らかになった。スピン蓄積の方向は電流と垂直な横方向であるので、電流と磁化の相対的向きに依存する従来の異方性磁気抵抗効果(AMR)と本質的に異なった現象である。例えば、電流方向と垂直な面内で磁化を回転したとき、AMRは角度依存性を示さないが、SMRは正弦関数の依存性を示す。他方、スピン蓄積の方向と垂直な面内で磁化を回転した場合の角度依存性は上記と逆の振る舞いを示す。これらの特徴的な磁気抵抗の角度依存性は、強磁性絶縁体(YIG)と非磁性金属(Pt)を用いた2層膜接合において実験的に観測された。SMRの実験結果を解析することにより、界面スピン流や界面スピンコンダクタンスの大きさ、非磁性金属のスピンホール効果の強さなど基本的物理量を評価する手法が確立された。

(2)強磁性絶縁体と非磁性金属からなる2層の接合膜に高周波電流を印加すると、スピンホール磁気抵抗効果(SMR)を起源とする整流効果によって直流電圧(スピン整流効果)が生じることを見出した。高周波電流が金属層に流れると、スピンホール効果により強磁性層に高周波スピントルクが働いて強磁性磁気共鳴が起こり、スピンホール磁気抵抗は共鳴磁気励起による変調を受ける。その結果、高周波電流は共鳴的スピンホール磁気抵抗変化によって整流され、直流電圧が生じる。磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット(YIG)とスピン軌道相互作用の大きい白金(Pt)の接合膜を用いて、高周波スピントルクにより駆動される磁化ダイナミクスの理論的研究

を行った。高周波電流下での YIG/Pt 接合膜におけるスピンの流と磁化ダイナミクスの相互作用を調べるために、スピンホール磁気抵抗効果を利用した電流駆動のスピントルク強磁性共鳴を検出する方法を提案した。高周波電流誘起スピントルクを含むランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を導出して磁化ダイナミクスを調べ、高周波電流と高周波スピンホール磁気抵抗の重畳から Pt 層に生じる直流電圧を計算した。直流電圧の強磁性共鳴スペクトルの磁場依存性、共鳴スペクトルの対称、反対称成分の分離、及び膜厚依存性を調べることで、高周波電流駆動によるスピントルク及びスピンホール磁気抵抗効果が磁気励起を介してスピン整流効果を引き起こすことが明らかになった。本研究の理論的予言はミュンヘン大グループにより YIG/Pt 接合膜を用いて実験的に検証された。

(3) 強磁性金属と非磁性金属からなるナノ構造 2 層膜において、スピンホール磁気抵抗効果が起こることを理論的に明らかにした。強磁性絶縁体の代わりに電気を通す強磁性金属を用いると、スピンホール効果によって非磁性金属層に生じたスピン流は、強磁性金属の磁化の向きに依存して、横偏極成分のみならず縦偏極成分のスピン流も強磁性金属に吸収される。また、強磁性金属層に電流が流れることにより、強磁性金属にスピン依存ホール効果が生じて磁化の向きに依存した縦偏極成分のスピン流が生成され、強磁性金属層にもスピンホール磁気抵抗効果が生じる。このため、強磁性金属を用いた金属系 2 層膜のスピンホール磁気抵抗効果は強磁性金属層のスピン依存伝導に大きく依存する。最終年度は、強磁性金属層のスピン依存ホール効果及び縦の界面スピン流の影響を解明し、金属系の 2 層膜で発現するスピンホール磁気抵抗の角度依存性や膜厚依存性を解析する理論を構築した。これにより、非磁性金属層のスピンホール角、強磁性金属層のスピン依存ホール角やスピン分極率を見積もることが可能になった。実験グループとの共同で、強磁性金属のコバルト鉄ボロン (CoFeB) とスピン軌道相互作用の強いタングステン (W) 金属を用いた 2 層膜において、絶縁体系 2 層膜 (YIG/Pt) に比べて 10 倍ほど大きいスピンホール磁気抵抗効果の観測に成功した。

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 20 件)

J. Kim, P. Sheng, S. Takahashi, S. Mitani, and M. Hayashi, Spin Hall magnetoresistance in metallic bilayers, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 097201 (2016). DOI:10.1103/PhysRevLett.116.097201, 査読有.

Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S.T.B. Goennenwein, E. Saitoh, and G.E.W. Bauer, Theory of spin Hall magnetoresistance (SMR) and related phenomena, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 103004 (2016). DOI:10.1088/0953-8984/28/10/103004, 査読有.

I. Juarez-Acosta, M. A. Olivares-Robles, S. Bosu, Y. Sakuraba, T. Kubota, S. Takahashi, K. Takanashi, and G. E. W. Bauer, Modelling of the Peltier effect in magnetic multilayers, *J. Appl. Phys.* **119**, 073906 (2016). DOI: 10.1063/1.4942163, 査読有.

T. Koda, S. Mitani, S. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Sato, T.J. Konno, S. Maekawa, and K. Takanashi, Temperature dependence of enhanced spin relaxation time in metallic nanoparticles: Experiment and theory, *Phys. Rev. B* **93**, 085402 (2016). DOI:10.1103/PhysRevB.93.085402, 査読有.

R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, Spin hydrodynamic generation, *Nature Physics* **12**, 52 (2016). DOI:10.1038/nphys3526, 査読有.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Effective exchange fields in spin-torque resonance of magnetic insulators, *J. Magn. Magn. Mater.* **400**, 163 (2016). DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.058, 査読有.

M. Schreier, T. Chiba, A. Niedermayr, J. Lotze, M. Lammel, H. Huebl, S. Geprägs, S. Takahashi, G. E. W. Bauer, R. Gross, and S.T.B. Goennenwein, Current-induced spin torque resonance of a magnetic insulator, *Phys. Rev. B* **92**, 144411, (2015). DOI:10.1103/PhysRevB.92.144411, 査読有.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Magnetization damping in antiferromagnetically coupled spin valves via dynamical spin transfer torque, *Phys. Rev. B* **92**, 054407 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.054407, 査読有.

S. Bosu, Y. Sakuraba, T. Kubota, I. Juarez-Acosta, T. Sugiyama, K. Saito, M.A. Olivares-Robles, S. Takahashi, G. E.W. Bauer, and K. Takanashi, Size dependence of Peltier cooling in ferromagnet|Au nano-pillars, *Appl. Phys. Express* **8**, 083002 (2015). DOI: 10.7567/APEX.8.083002, 査読有.

T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa, and Y. Otani, Quasiparticle-

mediated spin Hall effect in a superconductor, *Nature Materials* **14**, 675 (2015). DOI: 10.1038/NMAT4276, 査読有.

T. Chiba, M. Schreier, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, Current-induced spin torque resonance of magnetic insulators affected by field-like spin-orbit torques and out-of-plane magnetizations, *J. Appl. Phys.* **117**, 17C715 (2015). DOI: 10.1063/1.4913632, 査読有.

T. Chiba, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, Current-induced spin-torque resonance of magnetic insulators, *Phys. Rev. Applied* **2**, 034003 (2014). DOI:10.1103/PhysRevApplied.2.034003, 査読有.

N. Kobayashi, H. Masumoto, S. Takahashi, and S. Maekawa, Giant dielectric and magnetoelectric responses in insulating nanogranular films at room temperature, *Nature Communication* **5**, 4417 (2014). DOI: 10.1038/ncomms5417, 査読有.

K. Tanaka, T. Moriyama, M. Nagata, T. Seki, K. Takanashi, S. Takahashi, and T. Ono, Linewidth broadening of the optical precession mode in synthetic antiferromagnet, *Appl. Phys. Express* **7**, 063010 (2014). DOI:10.7567/APEX.7.063010, 査読有.

J. Kim, J. Sinha, S. Mitani, M. Hayashi, S. Takahashi, S. Maekawa, M. Yamanouchi, and H. Ohno, Anomalous temperature dependence of current induced torques in magnetic heterostructures, *Phys. Rev. B* **89**, 174424 (2014). DOI:10.1103/PhysRevB.89.174424, 査読有.

H. Idzuchi, Y. Fukuma, S. Takahashi, S. Maekawa, and Y. Otani, Effect of anisotropic spin absorption on the Hanle effect in lateral spin valves, *Phys. Rev. B* **89**, 081308(R) (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.89.081308, 査読有.

S. Takahashi, Giant enhancement of spin pumping in the out-of-phase precession mode, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 052407 (2014). DOI: 10.1063/1.4863961, 査読有.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Spin torque transistor revisited, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 192412 (2013). DOI:10.1063/1.4806982, 査読有.

H. Nakayama, M. Althammer, Y.-T. Chen, K. Uchida, Y. Kajiwara, D. Kikuchi, T. Ohtani, S. Geprags, M. Opel, S. Takahashi, R. Gross, G.E.W. Bauer, S.

T. B. Goennenwein, and E. Saitoh, Spin Hall magnetoresistance induced by a nonequilibrium proximity effect, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 206601 (2013). DOI:10.1103/PhysRevLett.110.206601, 査読有.
Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S. T. B. Goennenwein, E. Saitoh, and G. E. W. Bauer, Theory of spin Hall magnetoresistance, *Phys. Rev. B* **87**, 144411 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.144411, 査読有.

[学会発表](計 3 2件)

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Magnetization damping in noncollinear spin valves with antiferromagnetic interlayer couplings, The 13th Joint MMM-Intermag Conference (San Diego, USA) January 11-15, 2016.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Effective exchange fields in spin-torque resonance of magnetic insulators, International Workshop: Spintronics (13th RIEC International Workshop on Spintronics) (Tohoku University, Sendai, Japan) November 18-20, 2015.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Magnetization dynamics in trilayer synthetic antiferromagnets, International Workshop: Spintronics with Antiferromagnets (32nd Reimei Workshop on Frontiers of Condensed Matter Physics) (Tohoku University, Sendai, Japan) November 16-17, 2015.
S. Takahashi, Fluid motion induced by spin injection (招待講演), KTH Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden) November 13, 2015.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Enhancement of Gilbert damping in trilayer synthetic antiferromagnets via dynamic exchange interactions, International conference on solid state devices and materials (Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan) September 27-30, 2015.

田中健勝、森山貴広、永田真己、水野隼翔、関剛斎、高梨弘毅、千葉貴裕、高橋三郎、G.E.W. Bauer、小野輝男、スピ流が人工反強磁性体に及ぼす影響の研究 III、日本物理学会秋季大会、関西大吹田キャンパス、2015年9月16-19日

小林伸聖、岩佐忠義、石田今朝男、増本博、高橋三郎、前川禎通、絶縁性 FeCo-MgF ナノグラニューラー膜の TMD 効果、第 39 回日本磁気学会学術講演会、名古屋大学東山キャンパス、2015年9月8-11日

田中健勝、森山貴広、永田真己、水野隼

翔、関剛斎、高梨弘毅、千葉貴裕、高橋三郎、G.E.W. Bauer、小野輝男、スピントルークが人工反強磁性体に及ぼす影響の研究、第39回日本磁気学会学術講演会、名古屋大学東山キャンパス、2015年9月8-11日

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Theory of current-induced spin torque resonance of magnetic insulators, 20th International Conference on Magnetism (ICM) (Barcelona, Spain) July 5-10, 2015.

T. Chiba, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, Magnetization damping in antiferromagnetically coupled spin valves, New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (Kashiwa-no-ha Conference Center, Kashiwa, Japan) June 1-19, 2015.

田中健勝、森山貴広、永田真己、水野隼翔、関剛斎、高梨弘毅、千葉貴裕、高橋三郎、G.E.W. Bauer、小野輝男、スピントルークが人工反強磁性体に及ぼす影響の研究II、日本物理学会第70回年次大会、早稲田大学早稲田キャンパス、2015年3月21日

小林 伸聖、岩佐忠義、石田今朝男、増本博、高橋三郎、前川 禎通、絶縁性ナノグラニューラ膜のトンネル磁気誘電効果、日本金属学会、第156回春期講演大会、東京大学駒場I地区キャンパス、2015年3月19日

M. Schreier, T. Chiba, A. Niedermayr, J. Lotze, H. Huebl, S. Geprags, S. Takahashi, G.E.W. Bauer, R. Gross, and S.T.B. Goennenwein, Current-induced spin torque resonance of a magnetic insulator, 79th Annual Meeting of the DPG and DPG Spring Meeting (Berlin, Germany) March 3, 2015.

J. Ieda, M. Ichimura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Effect of spin-motive force on spin current in nonlocal spin valve, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference (Honolulu, USA) November 7, 2014.

K. Tanaka, T. Moriyama, M. Nagata, T. Seki, K. Takanashi, S. Takahashi, and T. Ono, Linewidth broadening of the optical precession mode in a synthetic antiferromagnet due to mutual spin pumping effect, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference (Honolulu, USA) November 4, 2014.

T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, and Y. Otani, First observation of quasi-particles-mediated spin Hall effect in superconducting niobium nitride, The 59th Annual Magnetism and Magnetic

Materials Conference (Honolulu, USA) November 4, 2014.

T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Current-induced spin torque resonance for magnetic insulators, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference (Honolulu, USA) November 4, 2014.

千葉貴裕、G.E.W. Bauer、高橋三郎、磁性絶縁体における電流駆動磁気緩和の変調、第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学札幌キャンパス、2014年9月17日

田中健勝、森山貴広、永田真己、関剛斎、高梨弘毅、高橋三郎、小野輝男、人工反強磁性体における光学モードの線幅の増大、中部大学春日井キャンパス、2014年9月7日

千葉貴裕、G.E.W. Bauer、高橋三郎、磁性絶縁体における電流誘起スピントルク磁気共鳴、日本物理学会2014年秋季大会、中部大学春日井キャンパス、2014年9月7日

⑳ M. Hayashi, J. Torrejon Diaz, J. Kim, S. Jaivardhan, S. Mitani, S. Takahashi, S. Maekawa, M. Yamanouchi, H. Ohno, Current induced spin orbit torques and chiral magnetic texture in magnetic heterostructures (招待講演), 12th RIEC International Workshop on Spintronics (Tohoku University, Sendai, Japan) July 25-27, 2014.

㉑ T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Current-induced spin torque resonance for magnetic insulators, IEEE International Conference on Microwave Magnetics 2014 (Sendai, Japan) July 1, 2014.

㉒ T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Current-driven effective damping modulation of magnetic insulators, The 12th RIEC International Workshop on Spintronics, (Sendai, Japan) June 26, 2014.

㉓ S. Takahashi, Spin Hall magneto-resistance in a trilayer system with noncollinear magnetizations (招待講演), ICC-IMR/20th REIMEI International Workshop on Spin Mechanics 2 (Tohoku University, Sendai, Japan) June 24, 2014.

㉔ T. Chiba, G.E.W. Bauer, and S. Takahashi, Theory of spin Hall magneto-resistance for alternating currents, ICC-IMR/20th REIMEI International Workshop on Spin Mechanics 2 (Sendai, Japan) June 21-24, 2014.

㉕ J. Kim, S. Jaivardhan, S. Mitani, M. Hayashi, S. Takahashi, S. Maekawa, M. Yamanouchi, H. Ohno, Temperature

dependence of current induced spin-orbit torques, Intermag 2014 (Dresden, Germany) May 4-8, 2014.

- ⑳ 高橋三郎、磁性絶縁体/金属/磁性絶縁体の3層構造における交流電流誘起スピンプンピング、日本物理学会、東海大学湘南キャンパス、2014年3月27日
- ㉑ 千葉貴裕、G.E.W. Bauer、高橋三郎、Theory of spin torque resonance for magnetic insulators、日本応用物理学会、青山学院大学相模キャンパス、2014年3月17日
- ㉒ S. Takahashi, T. Chiba, Y.-T. Chen, G.E.W. Bauer, Spin Hall magnetoresistance and spin pumping in a trilayer with magnetic insulators、日本応用物理学会、青山学院大学相模キャンパス、2014年3月17日
- ㉓ S. Takahashi, Static and dynamic properties of spin transport in magnetic insulator/metal/magnetic insulator trilayer systems (招待講演)、14th REIMEI Workshop on Spin Currents and Related Phenomena (Grenoble, France) February 10, 2014.
- ㉔ 高橋三郎、千葉貴裕、Y.-T. Chen、G.E.W. Bauer、磁性絶縁体/金属多層膜におけるスピンホール磁気抵抗効果、日本物理学会、徳島大学常三島キャンパス、2013年9月25日
- ㉕ 中山裕康、M. Althammer、Y.-T. Chen、内田健一、梶原瑛祐、菊池大介、大谷隆史、S. Geprägs、M. Opel、高橋三郎、R. Gross、G. Bauer、S. Goennenwein、齊藤英治、スピン流により駆動される磁気抵抗効果：スピン Hall 磁気抵抗効果、日本応用物理学会、同志社大学京田部キャンパス、2013年9月20日

〔図書〕(計 1 件)

S. Takahashi, Physical Principles of Spin Pumping, Handbook in Spintronics, edited by Y. Xu, D. Awschalom, and J. Nitta (Springer, Netherlands, 2016) Chapter 35, pp.1445-1480. DOI: 10.1007/978-94-007-7604-3_51-1, 査読有.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 三郎(TAKAHASHI SABURO)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号:60171485