

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560001

研究課題名(和文)位相不変量をもつスピン現象の理論研究及びその応用デバイスの設計

研究課題名(英文)Theoretical Study of Spin-related Phenomena with Topological Invariants and Design of Its Application Devices

研究代表者

近藤 憲治 (KONDO, Kenji)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：50360946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：スピン量子十字構造素子なるものを提案し、それをモデルデバイスとして、スピン伝導の計算を行った。本研究課題では、近年話題になっているバルクとしては絶縁体で、表面は金属であるという奇妙な性質を有するトポロジカル絶縁体を電極に用いた場合のスピンコンダクタンスを計算した。トポロジカル絶縁体のバンド構造は、時間反転対称性で決まっているため、これを制御するために、表面に時間反転対称性を破る磁性絶縁体を蒸着したモデルを考え、その磁化の関数として、スピンコンダクタンスを計算した。その結果、磁化によって、スピンコンダクタンスを制御することが可能であることが分かり、新規なスピン素子として有望である事が判明した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a novel device which is called "spin quantum cross structure device (SQCS-device)". In this study, the spin conductance was calculated for a SQCS-device having a topological insulator as the left electrode and a normal metal as the right electrode. Topological insulators have attracted much interest by the exotic character that they have insulating bulk states and conducting surface states simultaneously. Their band structures are determined by time reversal symmetry. Therefore, we introduced a magnetic insulator deposited on the topological insulator to control its band structure in the model. Then, the spin conductance was calculated as a function of magnetization of the magnetic insulator for the SQCS-device with the topological insulator. As a result, it is found that the magnetization of the magnetic insulator can control the spin conductance very well. This result suggests that the SQCS-device with the topological insulator can be a promising novel device.

研究分野：応用物理学および工学

キーワード：スピントロニクス 物性理論 第一原理計算 磁性 スピン輸送

1. 研究開始当初の背景

当時、我々は、光学リソグラフィや電子線リソグラフィを超えるナノ構造物を作製するために、発想を変え、薄膜のエッジを使用する新規なクロス状の構造を考案することで、この限界を克服する努力をしていた。これを我々は量子十字構造素子(Quantum Cross Structure Device) (QCS-device) と呼び、特に金属薄膜に強磁性体を使った場合をスピン量子十字構造素子(Spin Quantum Cross Structure Device)(SQCS-device)と呼んで研究していた。アンダーソンハミルトニアンを用いて、このデバイスの電流・電圧特性を理論的に計算した結果、巨大な磁気抵抗効果を持つことが判明し、同時に電極と間に挟む分子が強結合の場合、その電流・電圧特性はオーミック特性を持つことも計算から予測されていた。そこで実際にプロトタイプ of SQCS-device を作製した結果、理論と実験の一致はとても良く、発展させた理論は正しいことがわかった。そのような研究の最中にトポロジカル絶縁体や内因性スピンホール効果などの理論の進展があり、現象の背後には幾何学的位相が隠れており、それらが付随する現象は、散乱に強く、散逸が本質的に無い事がわかってきた。これらの特性はデバイスの特性として好ましいが、基礎理論はデバイス設計に向く形ではなく、我々はこれをデバイス設計に生かしたいと考えた。そのためには、デバイス設計を念頭に入れて、位相不変量がスピン伝導に与える影響を理論的に研究することが必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、位相不変量をもつスピン現象の理論を基礎から研究し、位相不変量がスピン伝導に与える影響を理論的に研究すること及びデバイス設計の観点から、基礎理論をデバイス設計に向く形に発展させ、トポロジカル絶縁体や内因性スピンホール効果をデバイスに利用する方法を構築することを試みる。そして、新規な応用デバイスであるスピン量子十字構造素子にその理論を適用し、このデバイスの特性を計算し、どのような機能を発現出来るかを研究する。

3. 研究の方法

スピン量子十字構造素子(SQCS 素子)をデバイスモデルとして、この素子の電極に用いる物質や接合部に挟む物質を様々に変えた場合について、モデル・ハミルトニアンを構築し、デバイスの電子伝導特性ならびにスピン伝導特性を非平衡グリーン関数法により計算を行う。その際に、幾何学的位相も計算することで、スピン伝導の幾何学的位相依存性の理論計算を行う。モデル・ハミルトニアンでの検討が終わった際には、より具体的に電

極をジェリウムモデルとは見なせずに、バンド分散を持つものとして扱うために、第一原理計算を採用して、より精密なスピン伝導の幾何学的位相依存性の計算を行う。結果が得られるたびに、分担研究者と実験で試作を行い、電子伝導特性ならびにスピン伝導特性の測定を行う。

4. 研究成果

(1) 障壁を介したトポロジカル絶縁体から正常金属へのスピン注入

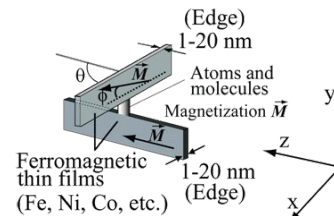


図 1: スピン量子十字構造素子

図 1 に研究期間全体に渡って考察してきたスピン量子十字構造素子 (Spin Quantum Cross Structure Device) の概念図を示す。この構造において、上の薄膜と下の薄膜を色々に変化させることにより、我々は様々な機能素子を作製できると考えて研究した。また、この素子は基礎理論を応用した場合の電流・電圧特性やスピンコンダクタンスを計算するモデルデバイスとしても活用した。本研究課題においては、トポロジカル絶縁体の利用を念頭においたので、図 1 の構造においてクロスさせない形状の図 2 のような構造において、片方の電極にトポロジカル絶縁体(TI)を用いて、もう一方の電極に正常金属を用いた場合に、その間に絶縁体を挟んだ際のスピン注入を考察した。トポロジカル絶縁体

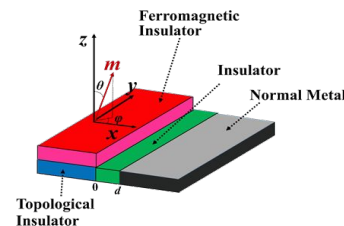


図 2: 磁性絶縁体を蒸着した TI/Insulator/Normal Metal 素子の概念図

には磁化 m を有する磁性絶縁体を蒸着し、その磁化 m の大きさと方向を極角 θ と方位角 ϕ を変化させることで、トポロジカル絶縁体の時間反転対称性を破ることにより、トポロジカル絶縁体のバンドを変化させて、スピンコンダクタンスを計算した。同時にそのスピンコンダクタンスの絶縁バリア幅 d の依存性を考察した。図 3 には、磁化 m の大きさと方向が変化した場合のトポロジカル絶縁体のバンド構造の変化を示す。図からわかるように、磁化の z 成分 m_z が存在すると時間反転対称性が破れるために、Dirac-Cone のバンドはギャップが開くのがわかる。別な表現をすれば massless な分散を massive な分散へと変化

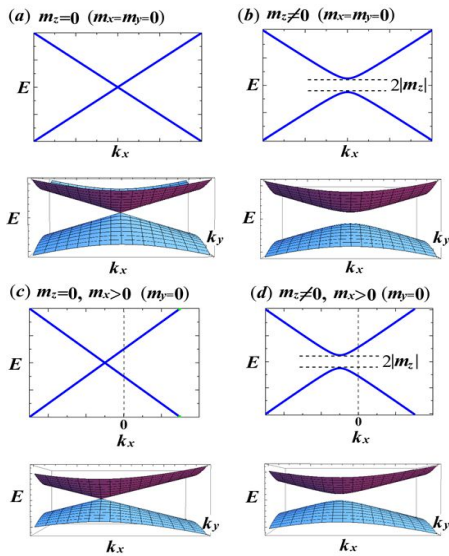


図3: 磁化 m の大きさと方向が変化した場合のトポロジカル絶縁体のバンド構造の変化図

させることがわかる。一方、磁化の x, y 成分は、ギャップを開ける効果はないが、フェルミ球の中心を x, y 方向に偏芯させる効果があることがわかる。従って、磁化の方向や大きさを変化させて、スピンコンダクタンスを計算すると、スピンコンダクタンスは、磁化 m の方向と大きさに敏感であり、それは Dirac-Cone のバンドが開くことならびにシフトすることが原因である。また、バリア幅に対するスピンコンダクタンスの依存性は緩やかであったが、これは、バリア幅がフェルミ波長より十分小さいことによるものである。計算結果の例として、図4にスピンコンダクタンスのバリア幅及び極角依存性を示す。

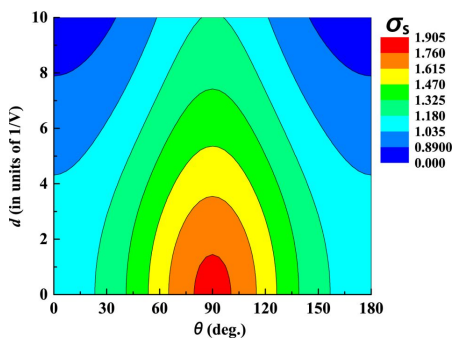


図4: Spin conductance のバリア幅及び極角依存性

(2) 2次元金属電極における自由電子近似の妥当性

図1や図2の素子の計算においては、金属電極であろうとトポロジカル絶縁体の電極であろうと、すべて2次元の自由電子として扱っている。後者は2次元の自由 Dirac 電子であるが、本来、存在しているクーロン斥力を無視するという意味においては、ジェリウム近似を用いている点で同じ扱いをしてい

る。しかしながら、実際の金属電極は、自由電子ではなく、クーロン相互作用を伴っている電子の集合である。最近ではナノテクノロジーの進歩で電極も本当の意味で2次元的に作製が可能である。そして、図1や図2のデバイスにおいては、この2次元性は重要になることが考えられる。そこで、本研究では、電子相関を GW 近似で取り込んで、2次元電極での準粒子のエネルギー分散を求めた。2次元金属電極における自由電子の分散と GW 近似で計算された準粒子の分散を比較し、自由電子近似の妥当性を考察した。2次元金属を $r_s=1.5$ 相当の密度を有する2次元電子ガスと近似して、絶対零度での準粒子の分散を求めた。図5は、準粒子の1電子スペクトル関数をすべての波数に渡ってプロットした結果と自由電子ガスの分散の比較図である。これが2次元電子ガスでの相関を考慮したエネルギー分散である。これを見るとわかるようにフェルミ面近傍に限ってのみ自由電子近似は妥当であるとわかる。従って、高温下や高電界下で、輸送特性を計算する場合は、電子相関を含めた近似のもとで計算した状態密度を使用する必要がある。

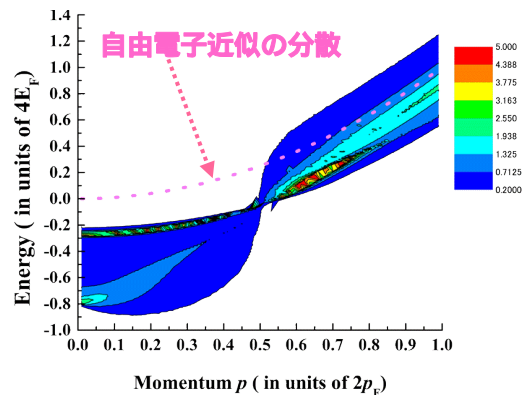


図5: 2次元電子ガスのエネルギー分散 (GW 近似)と自由電子ガスの分散

(3) スピン輸送における巨大 Hanle 効果の起源の理論的検討

スピン量子十字構造素子において、強磁性金属リボンから間に挟んだ Si にトンネルバリアを介してスピン注入をすることを想定し、強磁性 CoFe から MgO バリアを介して、Si にスピンを注入した際に観測される Hanle 効果について考察した。Hanle 効果は半導体に強磁性体からスピンを注入した際に、どの程度スピン注入が行われているかの指標として測定が行われている。その測定方法には、3端子 Hanle 効果測定と4端子 Hanle 効果測定があり、後者の Hanle 電圧は、 μV 程度であり、従来理論との一致が良い。しかしながら、図6に示す3端子 Hanle 効果測定においては、Si や Ge にスピン注入した際に異常に巨大な電圧(mV 単位)が観測されており起源がわからなかった。近年、北大工学部の植村らが、実験によって、この3端子 Hanle 効果測定においては、MgO バリアの幅と Hanle 電圧(シ

シート抵抗 R_s 換算)に指数関数的な対応が見られることを発見した(図7参照)。

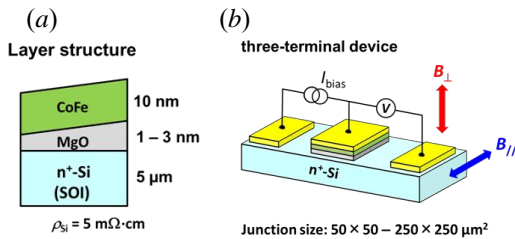


図6: 3端子 Hanle 効果測定における(a)基板組成と(b)測定配置

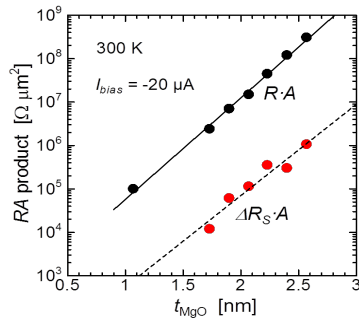


図7: $\Delta R_s \cdot A$ の MgO 膜厚依存性の実験結果

この事実から、我々は、3端子 Hanle 効果測定における異常に大きな Hanle 電圧は見かけのもので、トンネル過程で、外部磁場により、電子のスピンの脱分極することで、Hanle 電圧が見えているのではないかと考え、理論計算を行った。図8に MgO バリアの幅と Hanle 電圧(シート抵抗 R_s 換算)の計算結果を示す。これらの結果は、半定量的に、かなり現象を説明できており、仮説が正しいことを示している。したがって、巨大な Hanle 信号は、MgO バリアの磁場による抵抗変化を観測しているに過ぎないことを発見し、証明した。

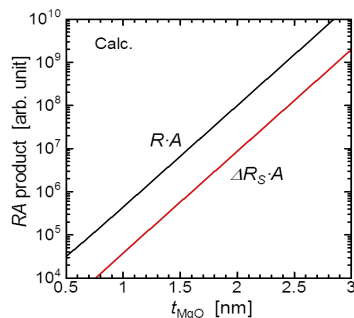


図8: $\Delta R_s \cdot A$ の MgO 膜厚依存性の計算結果

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 12 件)

1. K. Kondo, "Validity of the Free Electron Model for Two-Dimensional Electrodes", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 1753, p. mrsf14-1753-nn08-03 (2015), 査読有, DOI: 10.1557/opl.2015.112.
2. K. Kondo, "Spin transport in normal metal/insulator/topological insulator coupled to ferromagnetic insulator structures", *J. Appl. Phys.* Vol.115, pp. 17C701-1- 17C701-3 (2014), 査読有, DOI: 10.1063/1.4852119.
3. H. Kaiju, Y. Yoshida, S. Watanabe, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi, "Magnetic properties on the surface of FeAl stripes induced by nanosecond pulsed laser irradiation", *J. Appl. Phys.* Vol.115, pp. 17B901-1- 17B901-3 (2014), 査読有, DOI: 10.1063/1.4862376.
4. H. Kaiju, Y. Yoshida, S. Watanabe, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi, "Magnetic Properties on FeAl Stripes and Dots Induced by Nanosecond Pulsed Laser Irradiation", *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 38, pp.157-161 (2014), 査読有, DOI: 10.3379/msjmag.1407R001.
5. K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi, "Focused Magneto-Optic Kerr Effect Spectroscopy in $Ni_{75}Fe_{25}$ and Fe Ferromagnetic Thin Films on Organic Substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 52, pp. 013001-1-013001-5 (2013), 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.52.013001.
6. Y. Yoshida, K. Oosawa, S. Watanabe, H. Kaiju, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi, "Nanopatterns induced by pulsed laser irradiation on the surface of an Fe-Al alloy and their magnetic properties", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.102, pp.183109-1-183109-4 (2013), 査読有, DOI: 10.1063/1.4804363.
7. T. Uemura, K. Kondo, J. Fujisawa, K. Matsuda and M. Yamamoto, "Critical effect of spin-dependent transport in a tunnel barrier on enhanced Hanle-type signals observed in three-terminal geometry", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.101, pp.132411-1-132411-4 (2012), 査読有, DOI: 10.1063/1.4804363.
8. H. Kaiju, K. Kondo, N. Basheer, N. Kawaguchi, S. White, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi, "Fabrication of Nickel/Organic-Molecules/Nickel Nanoscale Junctions Utilizing Thin-Film Edges and Their Structural and Electrical Properties", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 51, pp. 065202-1- 065202-8 (2012), 査読有, DOI: 10.1143/JJAP.51.065202.
9. K. Kondo, "Spin Transport in Ferromagnet/Semiconductor/Ferromagnet Structures with Cubic Dresselhaus Spin-Orbit-Interaction", *J. Appl. Phys.* Vol.107, pp.09C709-1-09C709-3 (2012), 査読有, DOI:10.1063/1.3677799.
10. H. Kaiju, T. Abe, K. Kondo and A. Ishibashi, "Surface Roughness and Magnetic Properties of Co Ferromagnetic Thin Films on Polyethylene Naphthalate

- Organic Substrates”, *J. Vac. Soc. Jpn.* Vol.55, pp. 187-190 (2012), 査読有, DOI: 10.3131/jvsj2.55.187.
11. H. Kaiju, T. Abe, K. Kondo and A. Ishibashi, “Surface Morphologies and Magnetic Properties of Fe and Co Magnetic Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates”, *J. Appl. Phys.* Vol.111, pp. 07C104-1-07C104-3 (2012), 査読有, DOI:10.1063/1.3670609.
 12. H. Sasakura, C. Hermannstadter, S. N. Dorenbos, N. Akopian, M. P. Kouwen, J. Motohisa, Y. Kobayashi, H. Kumano, K. Kondo, K. Tomioka, T. Fukui, I. Suemune and V. Zwiller, “Longitudinal and transverse exciton-spin relaxation in a single InAsP quantum dot embedded inside a standing InP nanowire using photoluminescence spectroscopy”, *Phys. Rev. B*, Vol.85, pp. 075324-1 -1-075324-7 (2012), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.85.075324.
- 〔学会発表〕(計 31 件)
1. K. Kondo*:” Spin Injection to Semiconductor from Topological Insulator Coupled to Ferromagnetic Insulator through the Barrier”, The 15th Ries-Hokudai International Symposium joined with the 3rd International Symposium of Nano-Macro Materials, Devices, and System Research Alliance Project, ガトーキングダムサッポロ (北海道・札幌市) (2014 年 12 月 16 日).
 2. K. Kondo*:” Validity of the Free Electron Model for Two-Dimensional Electrodes”, 2014 MRS Fall Meeting, Boston (USA) (2014 年 12 月 3 日).
 3. 近藤 憲治*:「障壁を介したトポロジカル絶縁体から半導体へのスピン注入」, 2014 日本物理学会秋季大会、中部大学 (愛知県・春日井市) (2014 年 9 月 7 日).
 4. 坂下 友規*, 釜谷 悠介, 海住 英生, 近藤 憲治, 石橋 晃:「Ni₇₅Fe₂₅/Alq₃/Co 接合における交流インピーダンス特性」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学 (北海道・札幌市) (2014 年 9 月 17 日).
 5. 海住英生*, 近藤憲治, 石丸学, 弘津禎彦, 石橋晃:「磁性薄膜エッジを用いたナノスケール接合デバイス」, 日本磁気学会第 194 回研究会、中央大学駿河台記念館(東京都・千代田区) (依頼講演)(2014 年 1 月 10 日).
 6. K. Kondo*:”Negative Magnetoresistance in Ferromagnet/Semiconductor/Ferromagnet Structures with Cubic Dresselhaus Spin-Orbit-Interaction”, The 14th RIES-Hokudai International Symposium, ガトーキングダムサッポロ (北海道・札幌市) (2013 年 12 月 11 日).
 7. H. Kaiju, K. Kondo, and A. Ishibashi: “Magnetic Properties of Fe and Co Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates”, The 14th RIES-Hokudai International Symposium, ガトーキングダムサッポロ (北海道・札幌市) (2013 年 12 月 11 日).
 8. H. Kaiju*, K. Kondo, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi:” Fabrication of Ni-based Nanoscale Junctions Utilizing Thin-Film Edges and Their Structural and Electrical Properties”, The 2013 Energy, Materials and Nanotechnology Fall Meeting, Orlando (USA) (invited) (2013 年 12 月 7 日).
 9. K. Kondo*:” Spin transport in normal metal/insulator/topological insulator coupled to ferromagnetic insulator structures”, The 58th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference, Denver (USA) (2013 年 11 月 8 日).
 10. H. Kaiju*, Y. Yoshida, K. Oosawa, S. Watanabe, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi:” Magnetic properties on the surface of an Fe₅₂Al₄₈ alloy induced by nanosecond pulsed laser irradiation”, The 58th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference, Denver (USA) (2013 年 11 月 7 日).
 11. 近藤 憲治*:「2 次元金属電極における自由電子近似の妥当性」, 2013 日本物理学会秋季大会、徳島大学 (徳島県・徳島市) (2013 年 9 月 26 日).
 12. 近藤 憲治*, 海住 英生, 石橋 晃:「集光型磁気光学 Kerr 効果による Co/PEN の磁気光学定数の決定と表面磁性」, 2013 日本物理学会秋季大会、徳島大学 (徳島県・徳島市) (2013 年 9 月 25 日).
 13. 海住 英生*, 近藤 憲治, 阿部 太郎, 石橋 晃:「Co/PEN における面内磁気光学カー効果の回転磁場依存性」, 2013 日本物理学会秋季大会、徳島大学 (徳島県・徳島市) (2013 年 9 月 25 日).
 14. 海住英生*, 近藤憲治, 石丸学, 弘津禎彦, 石橋晃:「薄膜エッジを利用したナノスケール接合の作製とその電気伝導特性」, 物質・デバイス領域共同研究拠点研究会、北海道大学 (北海道・札幌市) (依頼講演)(2013 年 7 月 19 日).
 15. H. Kaiju*, K. Kondo, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi:” Magnetic properties on the surface of an Fe₅₂Al₄₈ alloy induced by nanosecond pulsed laser irradiation”, Collaborative Conference on Materials Research 2013, Jeju Island (Korea) (invited) (2013 年 6 月 26 日).
 16. H. Kaiju*, K. Kondo, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi:” Ni-based Nanoscale Junctions Utilizing Thin-Film Edges”, 2nd International Congress on

- Advanced Materials 2013, Zhenjiang (China) (2013年5月18日).
17. T. Uemura*, L. F. G. J. Fujisawa, K. Kondo, K. Matsuda and M. Yamamoto: "Tunnel barrier thickness dependence of Hanle-type signals in CoFe/MgO/n-Si and CoFe/MgO/n-Ge junctions investigated through three-terminal configuration", 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, Kyoto International Conference Center (Kyoto・Sakyo-ku) (2012年9月27日).
 18. 近藤 憲治*: "3 次の Dresselhaus-スピン軌道相互作用下の強磁性体/半導体/強磁性体における負の磁気抵抗", 2012 日本物理学会秋季大会、横浜国立大学 (神奈川県・横浜市) (2012年9月18日).
 19. 近藤 憲治*, 海住 英生、石橋 晃: "集光型磁気光学 Kerr 効果による有機基板上の強磁性薄膜 ($Ni_{75}Fe_{25}$ ならびに Fe) の表面磁性", 2012 日本物理学会秋季大会、横浜国立大学 (神奈川県・横浜市) (2012年9月18日).
 20. 海住 英生*, 阿部 太郎、近藤 憲治、石橋 晃: "ポリエチレンナフタレート有機膜上の Co、Fe 強磁性薄膜における磁気特性", 2012 日本物理学会秋季大会、横浜国立大学 (神奈川県・横浜市) (2012年9月18日).
 21. K. Kondo*, H. Kaiju and A. Ishibashi: "Focused Magneto-Optic Kerr Effect Spectroscopy in $Ni_{75}Fe_{25}$ and Fe Ferromagnetic Thin Films on Organic Substrates", The 19th International Conference on Magnetism, Busan (Korea) (2012年7月13日).
 22. H. Kaiju*, T. Abe, K. Kondo and A. Ishibashi: "Magnetic Properties of Co Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates", The 19th International Conference on Magnetism, Busan (Korea) (2012年7月13日).
 23. K. Kondo*: "Negative Magnetoresistance in Ferromagnet/Semiconductor/Ferromagnet Structures with Cubic Dresselhaus Spin-Orbit-Interaction", The 19th International Conference on Magnetism, Busan (Korea) (2012年7月10日).
 24. T. Uemura*, K. Kondo, J. Fujisawa, K. Matsuda and M. Yamamoto: "MgO thickness dependence of spin accumulation signal in $Co_{50}Fe_{50}/MgO/Si$ ", 2012 IEEE International Magnetism Conference, Vancouver (Canada) (2012年5月8日).

〔図書〕(計 2 件)

1. 海住 英生、近藤 憲治、石丸 学、弘津 禎彦、石橋 晃: "磁性薄膜エッジを用いたナノスケール接合デバイス", 日本磁気学会、日本磁気学会研究会資料、Vol. 194、

13-19、2014.

2. H. Kaiju, K. Kondo, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi: "Recent advances in magnetic thin films on flexible organic substrates", Transworld Research Network, RECENT RESEARCH DEVELOPMENTS IN APPLIED PHYSICS, Vol. 10、1-23、2012.

〔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 1 件)

名称: Nickel Thin Film, Method for Formation of the Nickel Thin Film, Ferromagnetic Nano-Junction Device, Method for Producing the Ferromagnetic Nano-Junction Device, Thin Metallic Wire, and Method for Formation of the Thin Metallic Wire
 発明者: H. Kaiju, M. Ishimaru, Y. Hirotsu, A. Ono, and A. Ishibashi
 権利者: 北海道大学
 種類: 米国特許
 番号: 8795856
 出願年月日: 2008年8月28日
 取得年月日: 2014年8月5日
 国内外の別: 国外

〔その他〕

Editorial Board Member of Scientific Reports (Nature Publishing Group)

ホームページ

<http://qed4.es.hokudai.ac.jp/kondo.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 憲治 (KONDO, Kenji)
 北海道大学・電子科学研究所・准教授
 研究者番号: 50360946

(2) 研究分担者

海住 英生 (KAIJU, Hideo)
 北海道大学・電子科学研究所・准教授
 研究者番号: 70396323

(3) 連携研究者

笹倉 弘理 (SASAKURA, Hirotaka)
 北海道大学・電子科学研究所・助教
 研究者番号: 90374595