

## 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 24 年 05 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560001

研究課題名（和文） スピン伝導の基礎理論構築と新規なデバイスの設計

研究課題名（英文） Fundamental Theory of Spin Transport and Design of Novel Devices

研究代表者

近藤 憲治（KONDO KENJI）

北海道大学・電子科学研究所・講師

研究者番号：50360946

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、強磁性薄膜のエッジ間に有機分子を挟んだスピン量子十字構造素子なる新規なデバイスを提案し、そのスピン伝導特性について非平衡グリーン関数を用いて理論的に調べた。また、プロトタイプデバイスを作成し、実験結果と比較することによって理論の検証を行った。研究の結果、アンダーソン・ハミルトニアンを用いて、スピン伝導の一般式を得ることに成功した。同時にプロトタイプのスピン量子十字構造素子を作成することに成功し、理論と実験の良い一致が得られた。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we have proposed spin quantum cross devices, which consist of organic molecules sandwiched between two ferromagnetic metals whose edges are crossed. We have theoretically investigated the spin transport characteristics of them using non-equilibrium Green's function. Also, we have made a prototype-spin quantum cross device and verified the theory compared with the experimental results. As a result, we have successfully obtained a general formula for spin transport using Anderson Hamiltonian, and succeeded in realizing a spin quantum cross device experimentally. We have also found that the developed theory predicts the experimental results quantitatively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス、輸送理論、非平衡グリーン関数、スピン軌道相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

当時、現在もシリコンテクノロジーに代表されるトップダウンによる微細加工技術は限界に来ており、これを克服するために様々な Beyond CMOS デバイスが考えられていた。そこで、我々は、Beyond CMOS デバイスとし

て、メゾスコピックな領域で、新規なクロス状の構造（スピン量子十字構造）を持つデバイスを考案した。この素子でスピンを利用して Beyond CMOS デバイスを目指すとともに、このデバイスの特性を理論的に明らかにする中で、スピン伝導の基礎理論も同時にこの

デバイスで検証しつつ、発展させようと試みようとした。また、ナノオーダーの接合が可能なこの素子に有機分子などのボトムアップ構造を挟みこむことで、トップダウンとボトムアップの融合を試みようとした。

## 2. 研究の目的

新規なスピン量子十字構造素子(SQCS 素子)の電子伝導特性、スピン伝導特性を理論的に明らかにするとともに、それを実際に作成し、理論の検証を行う。そして、その中で得られた知見を理論にフィードバックして、スピン伝導の基礎理論の構築を行う。

## 3. 研究の方法

スピン量子十字構造素子の輸送特性を計算するために、スピン量子十字構造素子を Anderson Hamiltonian で定式化した。そのうえで、非平衡グリーン関数を用いて、スピン伝導特性の計算を行った。一方、研究分担者とともに、この素子の実現化のためにプロトタイプのスピン量子十字構造素子を作成し、その電流・電圧特性ならびに磁気特性を測定した。

## 4. 研究成果

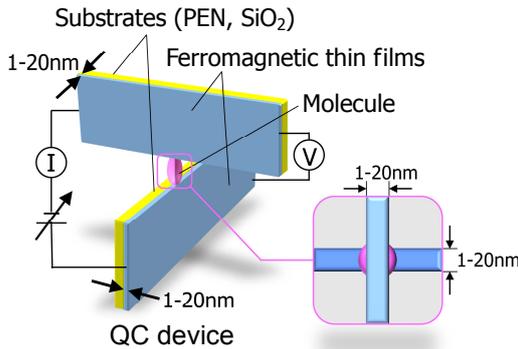
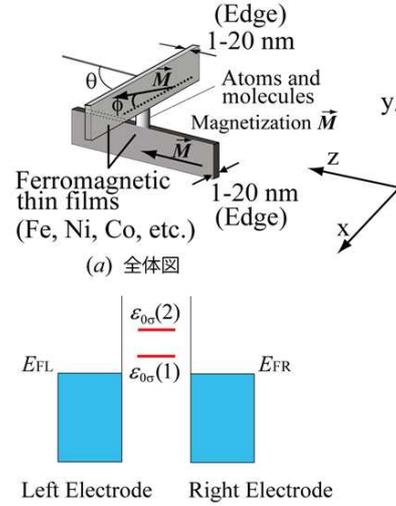


図 1 : スピン量子十字構造素子 (SQCS devices) の模式図

図 1 に、スピン量子十字構造素子 (SQCS devices) の模式図を示す。スピン量子十字構造素子は、強磁性薄膜を Polyethylene Naphthalate (PEN) 有機膜や SiO<sub>2</sub> のような絶縁膜上に積み、その薄膜のエッジを十字状にクロスさせることで、膜厚の制御と同程度の 1 x 1 ~ 20 x 20 nm<sup>2</sup> 程度のナノスケールの接合を有することができるものである。そしてその接合部に原子や分子を挟むことで、新規な switching 素子を目指した。我々は、この素子の伝導特性を理論及び実験で考察した。また電極に使われる強磁性薄膜の磁気特性も実験的に調べた。初めに、スピン量子十字構造素子のスピン伝導特性を理論的に調べるために、図 2 ように、スピン量子十字構造素子

をモデル化した。図のように強磁性薄膜の磁化は、一般化のためにノンコリニアな配置とした。また、間に挟む分子や原子として、2 準位原子をモデルとした。他準位への一般化は容易である。そして、非平衡グリーン関数を用いて、スピン伝導の一般式を得た。



(a) 全体図

(b) SQCS 素子のエネルギーダイアグラム

図 2 : スピン量子十字構造素子 (SQCS devices) の計算モデル

従来、ノンコリニアな系の計算において、角度  $\theta$  は考慮されていたが、 $\phi$  は考慮されていなかった。今回、初めて、方位角  $\phi$  を考慮した一般式を得ることに成功した。その結果、方位角は、従来通り、輸送方程式には、頭に見れなく、スピン伝導は、両方の磁化 (スピン) を古典ベクトルと見た場合の内積のなす角度  $\theta$  にのみ依存する事がわかった。但し、電極間にある分子において、伝導スピンのフリップすることを許すと、分子のエネルギー準位が方位角  $\phi$  の影響で、分裂することもわかった。このことから、もし分子の準位の分裂が観測されれば、分子内でスピンのフリップしている事がわかる。ノンコリニアな系の一般式は、式(1)のようになる。

$$I = \frac{e}{\hbar} \int_{E_{FR}}^{E_{FR}+eV} d\epsilon \sum_i \left[ \Gamma_L^{\uparrow\uparrow} \Gamma_R^{\uparrow\uparrow} \left( |G_i^{r\uparrow\uparrow}|^2 + |G_i^{r\uparrow\downarrow}|^2 \right) + \Gamma_L^{\downarrow\downarrow} \Gamma_R^{\downarrow\downarrow} \left( |G_i^{r\downarrow\downarrow}|^2 + |G_i^{r\downarrow\uparrow}|^2 \right) \right] \times [f(\epsilon - eV - E_{FR}) - f(\epsilon - E_{FR})]. \quad (1)$$

ここで、グリーン関数は、以下のように定義されている。

$$G_i^{r\uparrow\uparrow} = \frac{M_i^\downarrow}{D_i}, G_i^{r\uparrow\downarrow} = \frac{\Sigma_i^{r\uparrow\downarrow}}{D_i},$$

$$G_i^{r\downarrow\downarrow} = \frac{\Sigma_i^{r\downarrow\downarrow}}{D_i}, G_i^{r\downarrow\uparrow} = \frac{M_i^\uparrow}{D_i}$$

分子内でスピンのフリップしない場合に式(1)で計算した角度 $\theta$ をパラメータにした弱結合の電流-電圧特性を図3に示す。

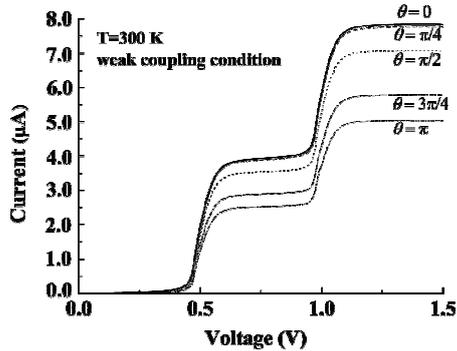


図3：ノンコリニアで弱結合の場合の電流・電圧特性

また、式(1)を用いて、電極の次元性が及ぼす影響ならびに分子と電極の結合強度が伝導に与える影響に関する考察も行った。電極にNi電極を用いたときの計算の結果、分子との結合が室温のエネルギーより小さいweak couplingの時には、図4(a), (b)のように電極が2次元であろうが、3次元であろうが関係なく、シャープなピークを持つ電流・電圧特性が得られ、switching素子として機能することが判明した。また動作電力も10nW程度で、現在のCMOSを凌駕する。

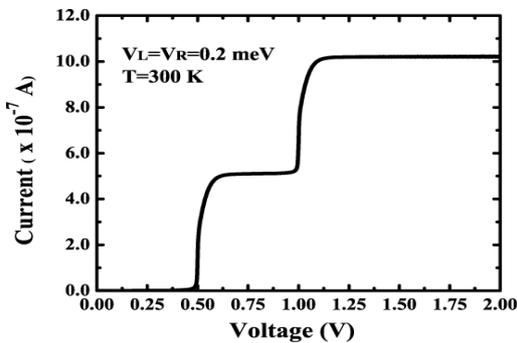


図4(a) 電極が2次元である場合のI-V特性

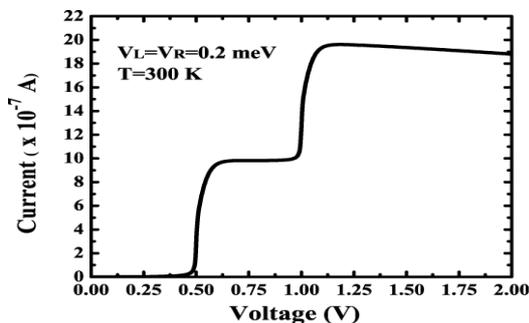


図4(b) 電極が3次元である場合のI-V特性

また、分子との結合が室温のエネルギーより十分大きいstrong coupling limitの時には、図5のような電流・電圧特性が得られ、オーミックな特性が得られる事が予想された。その

後、実験により得られた電流電圧特性は、図6のようなオーミック特性を示し、定量的に理論と良い一致を示した。

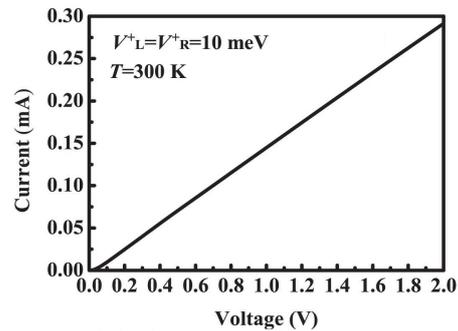


図5:強結合時のSQCS素子のI-V特性

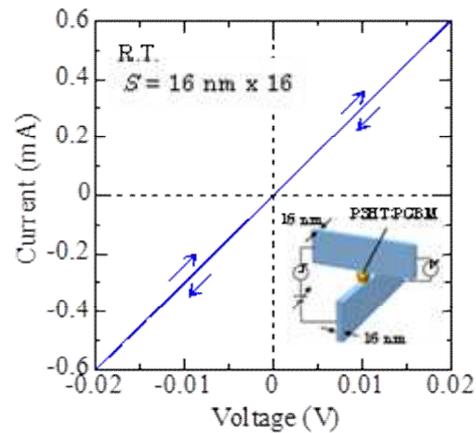


図6:Ni/P3HT:PCBM/Ni スピン量子十字デバイスのI-V特性

## 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 16 件)

1. 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)
2. 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)
3. 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)
4. 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)
  5. K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi, “Large Thermoelectric Voltage in Point Contacts of Ni Ferromagnetic Metals”, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 1314, pp. 110836-1- 110836-6 (2011). (査読有)
  6. H. Kaiju, N. Basheer, T. Abe, K. Kondo, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu, and A. Ishibashi, “Surface and Interface Structures and Magnetic Properties of Ni and Ni<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates”, *J. Vac. Soc. Jpn.*, Vol. 54, pp. 203-206 (2011). (査読有)
  7. K. Kondo, “Theoretical Modeling of Spin Quantum Cross Structure Devices with Noncollinear Ferromagnetic Electrodes”, *J. Appl. Phys.* Vol.107, pp.09C709-1-09C709-3 (2010), (査読有)
  8. K. Kondo, H. Kaiju, and A. Ishibashi, “A Theoretical Study and Realization of New Spin Quantum Cross Structure Devices using Organic Materials”, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 1198, pp. E07011-E07016 (2010). (査読有)
  9. H. Kaiju, K. Kondo and A. Ishibashi, “Current-Voltage Characteristics in Nanoscale Tunnel Junctions Utilizing Thin-Film Edges”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.49, pp. 105203-1-105203-5 (2010). (査読有)
  10. H. Kaiju, K. Kondo, N. Basheer, N. Kawaguchi, S. White, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi, “Fabrication and Current-Voltage Characteristics of Ni Spin Quantum Cross Devices with P3HT:PCBM Organic Materials”, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 1252, pp. J02081- J02086 (2010). (査読有)
  11. H. Kaiju, N. Basheer, K. Kondo and A. Ishibashi, “Surface Roughness and Magnetic Properties of Ni and Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub> Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, pp. 1356 - 1359 (2010). (査読有)
  12. H. Kaiju, K. Kondo, A. Ono, N. Kawaguchi, J. Won, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi, “The fabrication of Ni quantum cross devices with a 17 nm junction and their current-voltage characteristics”, *Nanotechnology*, Vol. 21, pp. 015301-1 - 015301-6 (2010). (査読有)
  13. K. Kondo, H. Kaiju, and A. Ishibashi, “Theoretical and Experimental Results of Electronic Transport of Spin Quantum Cross Structure Devices”, *J. Appl. Phys.* Vol.105, pp. 07D522-1-07D522-3 (2009). (査読有)
  14. 近藤 憲治, “ホール効果と異常ホール効果, そしてその先にあるもの”, 日本金属学会誌 までりあ, Vol. 48, pp. 55-60 (2009). (査読有) (Invited)
  15. H. Kaiju, A. Ono, N. Kawaguchi, K. Kondo, A. Ishibashi, J. Won, A. Hirata, M. Ishimaru and Y. Hirotsu, “Ni thin films vacuum-evaporated on polyethylene naphthalate substrates with and without the application of magnetic field”, *Appl. Sur. Sci.* Vol.255, pp. 3706 -3712 (2009). (査読有)
  16. H. Kaiju, K. Kondo, A. Ono, N. Kawaguchi, J. H. Won, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu, and A. Ishibashi, “Fabrication of Quantum Cross Devices Using Ni Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates”, *J. Magn. Soc. Jpn.* Vol.33, pp. 242 -246 (2009). (査読有)
- [学会発表] (計 25 件)
1. 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 強磁性薄膜における表面粗さと磁気特性」、第 52 回真空に関する連合講演会 学習院大学 (2011 年 11 月 17 日)
  2. K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi:” Microscopic Magneto-Optic Kerr Effect Spectroscopy in Ni<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> and Fe Ferromagnetic Thin Films on Organic Substrates”, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, USA (2011 年 11 月 3 日)
  3. K. Kondo:” Spin Transport in Ferromagnet/Semiconductor/Ferromagnet Structures with Cubic Dresselhaus Spin-Orbit-Interaction”, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, USA (2011 年 11 月 2 日)
  4. 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”, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, USA (2011 年 11 月 2

- 日)
5. H. Kaiju, K. Kondo, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi: "Fabrication of Nanoscale Junctions Utilizing Thin-Film Edges", 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, China (2011年10月24日)(Invited)
  6. 近藤 憲治、海住 英生、石橋 晃: 「ニッケル強磁性電極の点接触による巨大熱起電力」、日本物理学会秋季大会 富山大学 21pPSA-9 (2011年9月21日)
  7. 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Fe、Ni<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>、Ni 薄膜の表面状態と磁気特性」、日本物理学会秋季大会 富山大学 21aPS-10 (2011年9月21日)
  8. 海住英生、阿部太郎、近藤憲治、石橋 晃: 「薄膜エッジを利用したNi/NiO/Ni ナノスケールトンネル接合の作製とその電流電圧特性」、日本物理学会秋季大会 富山大学 21pPSA-10 (2011年9月21日)
  9. K. Kondo, H. Kaiju, and A. Ishibashi: "Large Thermoelectric Voltage in Point Contacts of Ni Ferromagnetic Metals", 2010 Material Research Society Fall Meeting, Boston, USA, LL8.36 (2010年12月1日)
  10. 海住英生、ヌブラバシール、阿部太郎、近藤憲治、平田秋彦、石丸学、弘津禎彦、石橋晃: 「ポリエチレンナフタレート (PEN)有機膜上のNi 及びNi<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> 薄膜における表面・界面構造と磁気特性」、真空・表面科学合同講演会 第30回表面科学学術講演会 第51回真空に関する連合講演会 大阪大学 5P-036V (2010年11月5日)
  11. 近藤 憲治: 「ノンコリニアな電極を有するスピン量子十字構造素子の輸送特性の理論」、日本物理学会秋季大会 大阪府立大学 25aPS-35 (2010年9月25日)
  12. 海住英生、ヌブラバシール、近藤憲治、石橋晃: 「ポリエチレンナフタレート有機膜上のNi 及びNi<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> 薄膜の表面状態と電気磁気特性」、日本物理学会秋季大会 大阪府立大学 25aPS-11 (2010年9月25日)
  13. 近藤 憲治、海住 英生、石橋 晃: 「有機分子を挟んだナノスケール接合素子の理論とそのデバイスの作製」、日本物理学会秋季大会 大阪府立大学 23pPSB-66 (2010年9月23日)
  14. 海住英生、近藤憲治、ヌブラバシール、川口敦吉、スザンホワイト、平田秋彦、石丸学、弘津禎彦、石橋晃: 「Ni/P3HT:PCBM/Ni ナノスケール接合の作製とその評価」、日本物理学会秋季大会 大阪府立大学 23pPSB-67 (2010年9月23日)
  15. H. Kaiju, K. Kondo, and A. Ishibashi: "Large Thermoelectric Voltage in Ni Nanoscale Junctions", The 29th International Conference on Thermoelectrics, Shanghai, China, P2-93 (2010年6月1日)
  16. H. Kaiju, K. Kondo, N. Basheer, N. Kawaguchi, S. White, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu, and A. Ishibashi: "Fabrication and current-voltage characteristics of Ni spin quantum cross devices with P3HT/PCBM organic materials", 2010 Material Research Society Spring Meeting, San Francisco, USA, J2.7 (2010年4月6日)
  17. H. Kaiju, K. Kondo, N. Basheer, N. Kawaguchi, S. White, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu, and A. Ishibashi: "Fabrication and Evaluation of Ni/P3HT:PCBM/Ni Nanoscale Junctions", International Symposium on Joint Research Network for Advanced Material and Devices, Tomakomai, Japan, pp. 113-114, P-32 (2010年3月25日)
  18. K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi: "Theoretical and Experimental Results of a Large Thermoelectric Voltage at Point Contacts of Spin Quantum Cross Structure Devices", 11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, FR-10 (2010年1月21日)
  19. H. Kaiju, N. Basheer, K. Kondo, and A. Ishibashi: "A Study of Ni and Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub> Thin Films on Polyethylene Naphthalate Organic Substrates for Spin Quantum Cross Devices", 11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, BR-09 (2010年1月19日)
  20. K. Kondo, H. Kaiju, and A. Ishibashi: "A Theoretical Study and Realization of New Spin Quantum Cross Structure Devices using Organic Materials", 2009 Material Research Society Fall Meeting, Boston, USA, E7.1 (2009年12月2日)
  21. 海住英生、小野明人、川口敦吉、近藤憲治、元鍾漢、平田秋彦、石丸学、弘津禎彦、石橋晃: 「磁場中及び無磁場中蒸着によるポリエチレンナフタレート有機膜上のニッケル薄膜に関する研究」、日本物理学会秋季大会 熊本大学 26pPSB-19 (2009年9月26日)
  22. 近藤憲治、海住英生、石橋晃: 「スピン量子十字構造素子の輸送特性の理論的研究とその実験検証」、日本物理学会秋季大会 熊本大学 25pPSA-21 (2009年9月25日)
  23. 海住英生、近藤憲治、石橋晃: 「トンネルバリアをもつ量子十字素子のトランスポート理論計算」、日本物理学会秋季大会 熊本大学 25pPSB-11 (2009年9月25日)
  24. K. Kondo, H. Kaiju, and A. Ishibashi: "Theoretical and Experimental

Results of Electronic Transport of Spin Quantum Cross Structure Devices”, International Symposium of Post-Silicon Materials and Devices Research Alliance Project, Ichou Kaikan of Osaka University, Osaka, P-15, p.54 (2009年9月5日)

25. H. Kaiju, K. Kondo, and A. Ishibashi: ”Fabrication and current-voltage characteristics of spin quantum cross devices”, International Workshop on Photons and Spins in Nanostructures, Hokkaido University Sousei Conference room, Sapporo, Japan, p. 57 (2009年7月27日)

[図書] (計2件)

1. H. Kaiju, K. Kondo, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi: Transworld Research Network, “Recent Res. Devel. Applied Phys.”, 2012年 (to be published)
2. H. Kaiju, K. Kondo and A. Ishibashi: InTech,” Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications”, 2011年, pp. 569-590

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

1. 名称: コバルト薄膜およびその形成方法ならびにナノ接合素子およびその製造方法ならびに配線およびその形成方法  
発明者: 海住英生、石橋 晃  
権利者: 北海道大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-197115  
出願年月日: 2009年9月9日  
国内外の別: 国内
2. 名称: プローブおよびその製造方法ならびにプローブ顕微鏡ならびに磁気ヘッドおよびその製造方法ならびに磁気記録再生装置  
発明者: 石橋 晃、海住英生  
権利者: 北海道大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-154644  
出願年月日: 2009年6月30日  
国内外の別: 国内

○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]

○報道

1. K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi: SPINTRONICS-INFO.COM (<http://www.spintronics-info.com/>), “Researchers from Hokkaido University aim to fabricate “Beyond CMOS” switching devices” (2011年3月19日)
2. H. Kaiju, K. Kondo, A. Ono, N. Kawaguchi, J. H. Won, A. Hirata, M. Ishimaru, Y. Hirotsu and A. Ishibashi: Nanotechweb, <http://nanotechweb.org/cws/article/lab/41438>, “Thin-film edges crossed to give nanoscale junction” (2010年1月20日)

○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・講師  
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・助教  
研究者番号: 70396323

(3) 連携研究者

該当なし