

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目： 若手研究 ( A )  
研究期間： 2007 ~ 2009  
課題番号： 19686002  
研究課題名 ( 和文 ) 面内スピン注入素子を用いた多端子スピン論理素子の開発  
研究課題名 ( 英文 ) Development of multi-terminal spin logic devices using lateral spin injection devices  
研究代表者 木村 崇 ( KIMURA Takashi )  
( 九州大学・稲盛フロンティア研究センター・教授 )  
研究者番号： 80360535

## 研究成果の概要 ( 和文 ):

高性能な純スピン流デバイス実現を目指して、多端子スピン注入を用いたスピン方向電気制御技術を確認した。更に、白金細線における巨大スピンホール効果の電氣的検出とその発現機構の解明、非磁性金属中のスピン緩和機構の解明すると共に、純スピン流の情報伝達時間に関する知見も得た。

## 研究成果の概要 ( 英文 ):

For developing high performance electrical devices operated by pure spin currents, we have established the control method of the direction of the spin polarization using multi-terminal spin injection and the generation method of the pure spin current without using ferromagnetic. We have also investigated the origin of the spin Hall effect and the mechanisms of the spin relaxation and the spin diffusion in nonmagnetic wire.

## 交付決定額

( 金額単位 : 円 )

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	16,800,000	5,040,000	21,840,000

研究分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目：工学・応用物性

キーワード：電子デバイス・機器、物性実験

## 1. 研究開始当初の背景

近年、スピン依存伝導現象の理解が進むにつれ、スピンの性質を積極的に利用した新規なスピントロニクス素子の開発が急速に進んでいる。最近では、伝導電子スピンと局在

電子スピンの中に働くスピントルクに関連した研究が注目されており、スピントルクによる外部磁場を用いない磁化方向制御技術が確立されつつある。

近年のスピン注入技術の発展に伴い、磁気

情報記録や磁性 RAM などの開発が飛躍的に進展している。最近では、スピンのダイナミックな性質を利用したマイクロ波素子なども提案・実証されている。このような状況の中で、より機能的なスピントロニクス素子の実現は、この分野の更なる進展に繋がることは明らかである。

これまでのスピントロニクス素子は、すべて二端子素子であり、専ら積層構造を用いている。素子を多端子にすることで、半導体電子回路と同様、より機能的な能動回路の作製が可能になることが期待できる。しかしながら、積層構造では、多端子構造の作製は極めて困難である。一方、面内構造を用いれば、電極形状や端子配置等の自由度が増し、多端子素子を容易に作製できる。申請者は、これまでに面内スピンバルブ構造を用いて、オーミック接合における巨大なスピンバルブ信号の観測、スピン抵抗を考慮した素子構造の最適化、スピン流による磁気情報検出、非局所手法を用いたスピン流のみによる磁化反転技術を確認している。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の代表者が有する純スピン流に関するシーズ技術を用いて高機能なスピデバイスを実現することを目的とした。具体的には、二端子スピン注入を用いた完全電氣的制御可能な（磁場を一切用いない）スピン流発生素子の試作、純スピン流生成効率の向上、3端子素子からなるスピントランジスタ、すなわちゲートを介したON-OFF 制御素子の実現や、スピン流やスピン蓄積電圧の増幅が可能なスピン能動回路の実現を目指す。また、スピン流に関連した新奇物理現象の探索も目指す。

## 3. 研究の方法

超高真空磁性多層膜成膜装置、電子ビーム露光装置、Ar イオンミリング装置等の最先端微細加工装置を用いて、多端子素子の作製を行い、超低雑音測定システムを用いて磁気伝導測定を行った。試料作製後、大気暴露せず、接合部以外の表面を保護する為に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> をスパッタ法により成膜を行い、素子の劣化を防ぐ。ここで、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は、スピン抵抗が大きいために、スピン抵抗回路に悪影響を及ぼすことなく表面を保護することができる。更に、本研究で導入した自動温調クライオスタットを用いることで、完全自動の伝導特性評価システムの構築し、効率的な試作素子の性能を評価した。

## 4. 研究成果

まず、初年度は、純スピン流素子において基本技術となるスピンホール効果の電氣的検出（図1参考）及び多端子スピン注入に

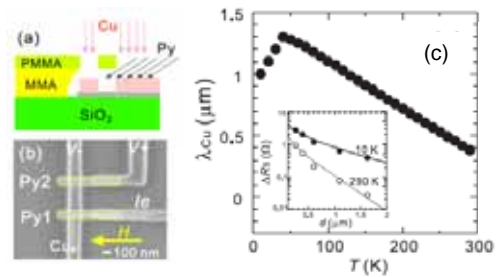


図2. (a) 斜め蒸着による面内スピンバルブ素子作製法と(b)試作した素子の電子顕微鏡写真。(c)Cu 細線のスピン拡散長の温度依存性。

よる蓄積スピンの量子化軸方向電氣的制御法の確立に成功した。これにより、磁場を使うことなく、スピントロニクス素子の動作させることが可能になった。また、白金で観測されたスピンホール効果は、これまでに観測された半導体中のものに比べて、1万倍以上大きな効果を示すことが分かり、スピンホール素子の実現に大きく貢献した。

更に、スピン伝送技術において重要になる、スピン散逸過程の詳細を実験的に明らかにし、銅細線においては、表面酸化層の影響により、低温でスピン緩和が大きくなることも発見した。これらは、微細なスピントロニクス素子において重要になる表面効果のスピン伝導への影響を具体的に示した初めての結果である（図2参考）。

次年度は、スピンホール効果の起源を探るべく、あらゆる 4d, 5d 遷移金属のスピンホール効果の系統的实验を行うことで、スピンホール伝導率の電子数依存性を調べた。その結果は、バンド構造に起因するスピンホール効果の理論計算結果により、符合や大きさがよく再現されることがわかった。このことは、観測されたスピンホール効果が、内因的機構に基づくことを示唆している。

最終年度は、これまでの研究で得た、スピン吸収効果やスピンホール効果等の基礎物理現象のより詳細な研究、及び多端子スピン

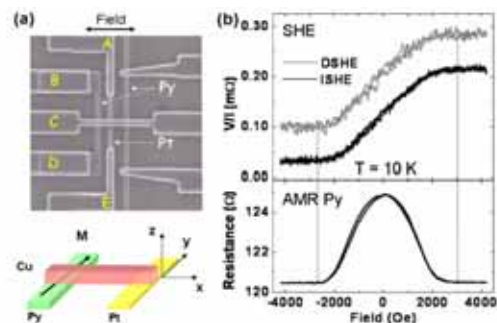


図1. 白金細線を用いた純スピン流の生成実験 (a) 試作素子の電子顕微鏡写真(b)スピンホール効果の観測結果 (c) パーマロイ細線の磁気抵抗曲線

注入による蓄積スピンの量子化軸方向電氣的制御法の更なる高性能化を目指した実験を行った。その結果、スピン吸収効果により、NiFe/Cu オーミック接合では、トンネル接合に比べ、電子の拡散速度が増大することが判明した。このことは、純スピン流デバイス的高速動作に繋がる。更に、接合界面のスピン偏極率や非磁性体の伝導率は、素子作製後のポストアニールで向上することを発見した。

このように、本研究では、純スピン流に関する多くの制御技術、及びそれを用いた高機能素子の実現に成功した。これらの得られた純スピン流制御技術を基に、より高性能な三次元スピン注入技術や多値メモリ等を考案し、現在、発展型で超高性能な次世代スピンデバイスの実現を目指した研究を続けている。

#### 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 24 件)

1. J. B. Laloe, T. Yang, T. Kimura, T. Y. Otani, Spin-dependent transport in a nanopillar non-local spin valve, *J. Magn. Mater.*, 321 (2009) 3829.
2. M. Morota, K. Ohnishi, T. Kimura, Y. Otani, Spin Hall effect in Molybdenum wires, *J. Appl. Phys.*, 105 (2009) 07C712.
3. J. B. Laloe, T. Yang, T. Kimura, Y. Otani, Spin-current-induced dynamics in ferromagnetic nanopillars of lateral spin-valve structures, *J. Appl. Phys.*, 105 (2009) 07D110.
4. T. Yang, T. Kimura and Y. Otani : Highly efficient nonlocal spin injection and pure-spin-current-induced magnetization switching, *Nat. Phys.* 11, 851-854 (2008)
5. T. Kimura and Y. Otani : Local domain structure of exchange coupled NiFe/CoO nanowire probed by nonlocal spin valve measurement, *J. Appl. Phys.* 103, 083915 (2008).
6. K. Ohnishi, T. Kimura, and Y. Otani : Improvement of superconductive properties of mesoscopic Nb wires by Ti passivation layers, *Appl. Phys. Exp.* 1, 021701-1~3 (2008).
7. T. Kimura, T. Sato and Y. Otani, Temperature evolution of spin relaxation in NiFe/Cu lateral spin valve, *Phys. Rev. Lett.* 100, 066602-1~4 (2008).
8. Y. Togawa, T. Kimura, K. Harada, T. Matsuda, A. Tonomura, Y. Otani and T. Akashi : Current-excited magnetization reversal under in-plane magnetic field in a nanoscaled ferromagnetic wire *Appl. Phys. Lett.* 92, 012505 (2008).
9. T. Kimura, Y. Otani and L. Vila : Spin current absorption and spin Hall effect in ferromagnetic/nonmagnetic hybrid structures *J. Appl. Phys.* 103, 07F310 (2008).
10. L. Vila, T. Kimura and Y. Otani : Evolution of the spin Hall effect in Pt nanowires: Size and temperature effects, *Phys. Rev. Lett.* 99, 226604 (2007).
11. T. Kimura and Y. Otani: Large spin accumulation in a Permalloy/Silver lateral spin valve, *Phys. Rev. Lett.* 99, 196604-1~4 (2007).
12. T. Yang, A. Hirohata, L. Vila, T. Kimura and Y. Otani : Vertical stack of Co nanorings with current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance: Experiment and micromagnetic simulation, *Phys. Rev. B* 76, 172401-1~4 (2007).
13. T. Kimura, Y.C. Otani and P.M. Levy : Electrical control of the direction of spin accumulation, *Phys. Rev. Lett.* 99, 166601-1~4 (2007).
14. T. Kimura and Y. Otani : Magnetization process of single magnetic ring detected by nonlocal spin valve measurement, *J. Appl. Phys.* 101, 126102 (2007).
15. T. Yang, A. Hirohata, T. Kimura and Y. Otani : Domain formation induced by perpendicular spin injection, *J. Magn. Mater.* 310, e690~e692 (2007).
16. T. Ishida, T. Kimura and Y. Otani : Spin-current induced vortex displacement and annihilation in micro-scale Permalloy disk, *J. Magn. Mater.* 310, 2431~2432 (2007).

17. T. Kimura, Y. Otani, T. Sato, S. Takahashi and S. Maekawa : Room temperature reversible spin Hall effect, Phys. Rev. Lett. 98, 156601 (2007).
18. T. Kimura, Y. Otani H. Masaki, T. Ishida, R. Antos and J. Shibata : Vortex motion in chirality-controlled pair of magnetic disks, Appl. Phys. Lett. 90, 132501 (2007).
19. T. Kimura and Y. Otani : Spin transport in lateral ferromagnetic/nonmagnetic hybrid structures (invited), J. Phys.: Condens. Matter: Special Issue on Spin Electronics 19, 165216 (2007).
20. T. Yang, A. Hirohata, M. Hara, T. Kimura, and Y. Otani : Current-induced vortex-vortex switching in a nanopillar comprising two Co nano-ring, Appl. Phys. Lett. 90, 092505 (2007).
21. T. Kimura and Y. Otani : Domain wall nucleation assisted by nonlocal spin injection, J. Phys. D: Appl. Phys.: Special Issue 40, 1285~1288 (2007).
22. T. Yang, A. Hirohata, T. Kimura and Y. Otani : Manipulating spin current in the magnetic nanopillar, J. Nanosci. Nanotechnol.: Special Issue on Nanotechnology for Information Storage 7, 259~264 (2007).

[学会発表](計 36 件)

国内会議(計 22 件)

1. 諸田 美砂子, 新見 康洋, 木村 崇, 大谷 義近, Cyrile Deranlot, Albert Fert, CuIr 細線における外因的スピンホール効果, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月.
2. 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近, オーミック接合とトンネル接合から成る複合面内スピンバルブ素子における Hanle 効果, 本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月.
3. 諸田 美砂子, 木村 崇, 大谷 義近, Cyrile Deranlot, Albert Fert CuIr 細線における外因的スピンホール効果, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月.
4. 大西 紘平, 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷

義近超伝導細線におけるスピンホール効果, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月.

5. 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近, 面内スピンバルブにおける Hanle 効果 - 強磁性端子材料依存性 -, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月.
6. 諸田 美砂子, 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近, 非磁性金属のスピン緩和とスピンホール効果, 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月.
7. 正木 博明, 坂田 裕美, 木村 崇, 大谷 義近非対称磁気円盤における磁気渦の静的, および動的的特性, 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月.
8. 坂田 裕美, 正木 博明, 木村 崇, 大谷 義近連結磁気円盤における磁気渦並進運動の電気的検出, 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月.
9. 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近面内スピンバルブにおける Hanle 効果の接合抵抗依存性, 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月.
10. 大西 紘平, 木村 崇, 大谷 義近, 非磁性/超伝導接合特性に及ぼすスピン蓄積効果, 日本物理学会第 62 回年次大会, 北海道大学, 2007 年 9 月.
11. T. Yang, A. Hirohata, T. Kimura & Y. Otani A hybrid spin-valve structure to produce strong nonlocal spin current, 第 31 回日本応用磁気学会学術講演会, 学習院大学, 2007 年 9 月.
12. 木村 崇, 大谷 義近, Py/Ag プレーナー スピンバルブ素子におけるスピン依存伝導, 第 31 回日本応用磁気学会学術講演会, 学習院大学, 2007 年 9 月.
13. Vila Laurent, 木村 崇, 大谷 義近, 金属系ナノ構造におけるスピンホール効果, 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学, 2007 年 9 月.
14. 木村 崇, 大谷 義近スピン流関連現象の基礎と応用の展望(招待講演), 平成 20 年度 第 4 回スピントロニクス技術分科会, 電子情報技術産業協会, 東京, 2008 年 10 月.
15. 木村 崇, 大谷 義近, 面内配列 強磁性/

非磁性複合素子におけるスピン依存伝導(招待講演),日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008 年 9 月.

16. 諸田 美砂子, 木村 崇, 大谷 義近遷移金属におけるスピンホール効果の起源の実験的探索,日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008 年 9 月.
17. 大西 紘平, 木村 崇, 大谷 義近超伝導細線におけるスピン注入誘起準粒子の緩和過程,日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008 年 9 月.
18. 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近非磁性細線で観測される Hanle 効果へのオーミック接合した強磁性体端子の影響,日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008 年 9 月.
19. 諸田 美砂子, 木村 崇, 大谷 義近 Mo ナノ細線におけるスピンホール効果,第 32 回日本磁気学会学術講演会, 東北学院大学, 2008 年 9 月.
20. 佐藤 孝哉, 大西 紘平, 木村 崇, 大谷 義近非磁性体金属中のスピン緩和過程の温度依存性~フォノン、表面散乱の効果~,日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学, 2008 年 3 月.
21. 大西 紘平, 佐藤 孝哉, 木村 崇, 大谷 義近常伝導, 超伝導状態における Nb 細線のスピンホール効果,日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学, 2008 年 3 月.
22. 木村 崇ナノ微細磁気構造とスピン物性(招待講演),ナノ学会 第 5 回大会, つくば, 2007 年 5 月.

国際会議 (計 14 件)

1. T. Kimura, Electrical detection of spin Hall effects in 3d, 4d transition metals,International Workshop on Spin Currents, Sendai, 2010. 2 (Invited)
2. T. Kimura, Electrical detection of spin Hall effects in metallic systems, 449.Wilhelm and Else Heraeus Seminar, Bad Honnef, Germany 2010. 1 (Invited)
3. T. Kimura, Manipulation of spin currents in metallic systems, InternationalConference on Magnetism 2009, Karlsruhe, Germany, 2009. 7 (Invited)

4. K. Ohnishi, T. Kimura & Y. Otani "Pure Spin Current Injection through Superconductive/Normal Metal Ohmic Interface,"OIST Workshop, Okinawa, Japan, May 2009.
5. K. Ohnishi, T. Kimura & Y. Otani "Pure spin current injection through superconductive/normal metal ohmic interface,"
6. 2009 APS March Meeting, Pittsburgh, USA, March 2009.
7. T. Kimura, & Y. Otani "Manipulation of spin currents and spin Hall effects in metallic systems(invited),"The23rdNishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop "Spin Transport in Condensed Matter," Kyoto University, November 2008.
8. J. Laloe, T. Yang, Y. Fukuma, T. Kimura, M. Morota, & Y. Otani "Spin-current-induced dynamics in ferromagnetic nanopillars of lateral spin-valve structures,"53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Austin, USA, November 2008.
9. M. Morota, K. Ohnishi, T. Kimura, & Y. Otani"Spin Hall effects in Nb, Mo, Pd, and Pt nanowires,"53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Austin, USA, November 2008.
10. T. Kimura & Y. Otani "Manipulation of spin current and spin Hall effects in metallic systems(invited),"SPINSWITCH Workshop "Spin Momentum Transfer," AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland, September 2008.
11. T. Yang, T. Kimura & Y. Otani" Pure-spin-current-induced magnetization switching(invited),"SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, USA, August 2008.
12. T. Kimura & Y. Otani"Spin current diffusion in lateral spin valve structure and excitation of vortex resonance in magneto-statically coupled disks(invited),"IBM Almaden Research Center, San Jose, USA, July 2008.

13. Y. Otani & T. Kimura "Spin-current generation and manipulation in metallic nano-structures(invited)," Indo-Japan Workshop on Novel Magnetic Ordering in Nanostructured Materials, University of Tokyo, Japan, June 2008.
14. T. Kimura, Y. Otani & L. Vila "Spin current absorptions and spin Hall effects in ferromagnetic/nonmagnetic hybrid structures(invited),"52nd Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM 2007), Tampa, USA, November 2007.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

<http://inamori-frontier.kyushu-u.ac.jp/electronics/>.

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者 木村 崇  
( 教授 )

研究者番号：80360535

(2)研究分担者  
( )

研究者番号：

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：