

機関番号：12601

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048019

研究課題名（和文） スピン流と機能制御 調整班

研究課題名（英文） Control of spin currents and functions

研究代表者

田中 雅明 (TANAKA, MASAOKI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30192636

研究成果の概要（和文）：本研究は、特定領域研究「スピン流の創出と制御」の中の研究項目 A05「スピン流と機能・制御 調整班」である。本研究課題では、スピン流にかかわるさまざまな物理的信号の制御や変換の原理とその機能を探索し、新規デバイスの提案とその機能の実証研究を行った。領域内の各班と連携しつつ、スピン偏極電流制御デバイス、スピン流高周波・熱デバイス、光スピントロニクス機能デバイス、スピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計の理論、計4グループで研究を行った。さらに、スピン流と機能・制御に関する研究動向調査や研究戦略の策定を行い、班内における情報交換や共同研究を促進させた。2010年8月には、第6回「半導体におけるスピン関連現象の物理と応用」国際会議を主催者として開催し（議長：田中雅明、本研究代表者）、この分野の国際的な発展に貢献した。

研究成果の概要（英文）：This research members are the leaders of each group in A05 “Functions and Control of Spin Currents”. We explored principles of control and transformations of various signals and their functions, and proposed new devices and realized their operations. Cooperating with other groups, we studied spin-polarized-current-controlled devices, spin current, microwave and thermal devices, optical spintronics devices, spin-current-induced magnetization reversal devices, and theories and designs. Furthermore, we enhanced exchange of ideas and collaborations. We organized the 6th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) in Tokyo, August 2010 (Conference chair: Masaaki Tanaka), and contributed the worldwide advance of this field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	3,700,000	0	3,700,000
2009年度	3,700,000	0	3,700,000
2010年度	2,800,000	0	2,800,000
年度			
総計	12,000,000	0	12,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：スピン流デバイス

1. 研究開始当初の背景

スピン自由度を制御し将来の材料機能やデバイス体系をつくろうとする「スピントロニクス」の研究が盛んに行われているが、21世紀に入りスピンの流れすなわち「スピン流」と呼ばれる新たな概念が登場した。スピン偏極電流はスピン流の一種であるが、電荷の流れを伴わないスピン流も存在する。一般的にスピン流は、スピンの注入あるいは蓄積という現象を通して生成するが、生成したスピン流は、時間軸で考えれば緩和、空間軸で考えれば拡散を通して消滅する。スピン流の研究は始まったばかりであり、スピン流の生成と消滅のプロセスの詳細は、ほとんど未解明である。

2. 研究の目的

本研究課題「スピン流と機能・制御」(A05班)では、スピン流にかかわるさまざまな物理的信号の制御や変換の原理とその機能を探査し、新規デバイスの提案とその機能の実証(デモンストレーション)の研究、および研究テーマ間の調整を行う。本特定領域内の各班と連携しつつ、スピン偏極電流制御デバイス、スピン流高周波・熱デバイス、光スピントロニクス機能デバイスの3実験グループと、スピン流機能と制御法のデザインおよびスピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計の理論・設計2グループ、計5グループで研究を行う。スピン流と機能・制御に関する研究動向調査や研究戦略の策定を行い、班内における情報交換や共同研究を促進させる。

3. 研究の方法

本研究課題「スピン流と機能・制御」(A05班)では、スピン流にかかわるさまざまな物理的信号の制御や変換の原理とその機能を探査し、新規デバイスの提案とその機能の実証(デモンストレーション)の研究とその調整を行う。本特定領域内のA01~A04の各班と連携しつつ、スピン偏極電流制御デバイス、スピン流高周波・熱デバイス、光スピントロニクス機能デバイスの3実験グループと、スピン流機能と制御法のデザインおよびスピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計の理論・設計2グループ、計5グループで研究を行う。

平成19年度には、共同研究体制と役割分担・協力を固め、スピン流と機能・制御に関する研究動向調査や研究戦略の策定を行う。

平成20年度以降に、スピン流と機能・制御に関する研究動向調査を続けつつ、動向の変化に即した研究戦略の調整を行い、班内における情報交換や共同研究を促進させる。

4. 研究成果

(1) 強磁性半導体における磁性原子間の相互作用の解明

東大藤森グループと東大田中グループは原子力機構量子ビーム応用研究部門と共同で、SPring-8の放射光を用いたX線磁気円二色性の測定により、強磁性半導体ガリウムマンガン砒素($\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$)中のマンガン(Mn)原子間の磁気的相互作用を調べることに成功した。半導体の格子間位置にはいった一部のMn原子が、強磁性を担うガリウム(Ga)を置換したMn原子に反強磁性的に結合して、強磁性特性を低下させていることがわかった。この結果は、より高機能の強磁性半導体材料の開発に重要な指針を与えるものである。

(2) 電気・磁気変換の新原理「スピン起電力」の実現に成功—ナノデバイスにおける新しい電磁気学と超巨大磁気抵抗効果の発見

田中グループ、前川グループおよび米国マイアミ大学 S.E. Barnes の研究グループは、強磁性体 MnAs のナノスケール微粒子を含む磁気トンネル接合において静磁場を印加するだけで起電力が発生する「スピン起電力」効果を観測した。本研究は、1831年に発見された電磁気学の基本法則の1つであるファラデーの電磁誘導の法則が成り立たない実験結果を初めて明瞭に示したものであり、このような磁性ナノ構造で観測される量子力学的なスピンの効果を説明するためには、ファラデーの電磁誘導の法則を拡張する必要があることを示唆している。さらにこの「スピン起電力」により、100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現しました。これにより、磁気エネルギーから電気エネルギーへの効率的な変換が可能になり、新しいタイプの電池(スピン電池)や超高感度磁気センサーとしての応用が期待される。

(3) MnAs 金属ナノ微粒子で長いスピン緩和時間を観測

GaAs 半導体マトリックス中に分散する六方晶の結晶構造をもつ強磁性金属 MnAs ナノ微粒子(直径 ~ 5 nm)を含む単電子スピントランジスタ構造を作製し、微粒子における極めて長いスピン緩和時間(10 μ s)(μ s=マイクロ秒)を観測した。この値はこれまで報告された金属ナノ微粒子のスピン緩和時間として最も長く、最近報告された Co 微粒子のスピン緩和時間より2桁、バルク金属と比べると7桁も長い値である。この成果は、強磁性微粒子の超高密度スピンメモリや再構成可能なスピントランジスタ等、次世代のスピントロニクス・デバイスへの応用につながる

と期待される。

(4) 共鳴分光による強磁性半導体 GaMnAs の価電子帯構造の解明

強磁性半導体 GaMnAs の超薄膜を量子井戸として 2 重障壁共鳴トンネルダイオード構造を作製し、共鳴トンネルスペクトロスコピーというユニークな手法を用いて、GaMnAs の価電子帯構造とフェルミ準位の位置を明らかにした。GaMnAs のフェルミ準位の位置についてはここ数年論争があったが、従来のモデルで考えられているような価電子帯ではなく、禁制帯中の不純物バンド中に存在すること、共鳴トンネル効果によりトンネル磁気抵抗が明瞭に増大する現象などを実験的に示した。

(5) 強磁性半導体 GaMnAs におけるフェルミ準位の位置とバンド構造を系統的に解明

高精度のエッチング手法と共鳴トンネル分光法を組み合わせたユニークな方法を開発し、様々な強磁性半導体 GaMnAs 試料において、フェルミ準位の位置とバンド構造を系統的に明らかにすることに成功した。特に GaMnAs のフェルミ準位の位置は、これらの材料系における強磁性発現機構を理解する上で極めて重要であり、その解明が切望されてきた。得られた結果は、今まで 10 年以上にわたって一般的に受け入れられてきたこれらの系のバンド構造の理解とは大きく異なっており、今後これらの材料系の研究を進める上で、また、これらの材料系を用いた次世代スピントロニクス素子を実現する上で、重要な指針になると期待される。

(6) エピタキシャル MnSb を用いた半導体光アイソレータ

東京農工大学の清水大雅、東京工業大学の宗片比呂夫教授 (A03 班計画研究)、東京大学の中野義昭教授 (研究分担者) の共同研究で、エピタキシャル強磁性金属 MnSb を用いた半導体光アイソレータの研究を行った。キュリー温度が室温より十分高く、大きな磁気光学効果を有し、光導波路デバイスに適した結晶磁気異方性をもつ MnSb のエピタキシャル成長を実現し、半導体光アイソレータに応用することに成功した。この研究成果によって、半導体光アイソレータの消光比 12dB/mm の実現と、80 度までの高温動作に成功した。

(7) 磁化状態で発振状態を制御可能な非相反半導体レーザの実現

磁化状態で発振状態を制御可能な非相反半導体レーザの実現に成功した。このことによって、非相反偏光回転に基づく半導体光アイソレータの実現 (Appl. Phys. Express 2010) や、一方向発振リングレーザの実現に

成功した。非相反半導体レーザでは光の強度やモード分布を磁化反転によって制御することができ、再構成可能な光バッファリングメモリや非線形光デバイス、高速の光信号処理/記録に応用することが可能になる。

(8) スピン流の超高速ダイナミクス、スピン流高周波・熱デバイスの研究

強磁性層間の反強磁性的な磁気結合を利用して 20GHz を超える磁気共鳴モードをつくり、このモードを電流の直接通電により誘起することに成功した。ボルツマン方程式に基づく理論を構築し、強磁性体中の熱勾配によりスピン流が発生すること、非平衡なスピン波により大きなゼーベック効果が期待できることを示した。さらに、拡散的なスピン流の発生に伴うエネルギーの散逸についての理論を構築した。さらに、トンネル磁気抵抗素子が半導体を超える高周波の整流作用を示すことを実証した。

(9) サブミクロンサイズの磁気円盤中に現れる磁気渦のダイナミクス、磁化反転

近年サブミクロンサイズの磁気円盤中に現れる磁気渦は、スピン電流を用いることでその中心の磁化構造を反転できることが示された。本研究ではシミュレーションを用いて、この磁化反転の解析と、本機構を用いたデバイスの動作条件について調べた。

① 電流磁界効果

スピン電流による磁化操作では、スピントルクの効果以外にスピン電流が作る磁界による影響も指摘されている。シミュレーション解析結果より、電流密度が 10^{11} A/cm² 程度の場合、電流磁界の効果はほとんど見られないが、 10^{12} A/cm² 以上では、電流磁界の効果が非常に大きく、反転電流が半減することを示した。(K. Yamada, et. al., Appl Phys. Lett. 93, 152502 (2008)等)。

② 反転電流の低減

円盤形状とその向きを調整することにより、反転電流を低減可能であることを示した。(K. Yamada, et. al., Appl. Phys. Lett. 96, 192508 (2010))

③ デバイスの動作条件

本機構を用いたデバイスが安定動作するためには、磁化反転後に単磁区構造が現れずに磁気渦構造が出現する必要がある。このための条件を示した。

④ シミュレーションの高速化

本現象のシミュレーションには、最大で数ヶ月程度の計算時間が必要であったため、graphic processor unit を用いた高速計算手法を開発した。計算精度の低下なしに最大で 1.5 倍程度の高速化を実現し、短時間でのシミュレーション解析を可能とした (T. Sato, and Y. Nakatani, J. of the Magnetic Society

of Japan, 2011)。

(10) 国際会議の開催

第6回「半導体におけるスピン関連現象の物理と応用」国際会議 (6th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI)) を2010年8月1日~4日に東京大学本郷キャンパスにて開催した。Conference Chairは田中(本研究代表者)が務め、本特定領域研究が共催した。本国際会議は半導体スピントロニクス分野で最大の国際会議の1つであり、国内外(約20カ国)から約200名の参加者を得て、半導体におけるスピン関連現象の物理と応用に関する多くの最新の研究成果が発表され、活発な討論が行われた。本特定領域のメンバー(若手研究者や大学院学生を含む)の多くが参加・発表し、国際会議に貢献した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計80件)

発表論文80編のうち、代表的な論文20編を記す。

- 1) S. Ohya, Kenta Takata, and M. Tanaka, "Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs", Nature Physics 7, pp.342-347 (2011).
- 2) Pham Nam Hai, Shinsuke Yada and Masaaki Tanaka, "Phase decomposition diagram of magnetic alloy semiconductor", J. Appl. Phys. 109, pp.073919/1-9 (2011).
- 3) A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, "Boltzmann approach to dissipation produced by a spin-polarized current", Phys. Rev. B83, 012401-1-4 (2011).
- 4) H. Shimizu, Y. Kono, S. Goto, and T. Mori, "Demonstration of a Magnetically Controllable Fabry-Perot Laser and an Unidirectional Ring Laser Utilizing a Nonreciprocal Semiconductor Optical Amplifier", Applied Physics Express 4, 022201/1-3 (2011).
- 5) S. Ishibashi, T. Seki, T. Nozaki, H. Kubota, S. Yakata, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekaw, D. D. Djayaprawir, and Y. Suzuki, "Large Diode Sensitivity of CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions", Appl. Phys. Exp. 3073001/1-3 (2010).
- 6) Takeshi Seki, Hiroyuki Tomita, Teruya Shinjo, and Yoshishige Suzuki, "rf auto-oscillations in antiferromagnetically coupled layers with different coupling strengths", Appl. Phys. Lett. 97, 162508/1-3 (2010).
- 7) R. Nakane, T. Harada, K. Sugiura, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Magnetoresistance of a Spin Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor with Ferromagnetic MnAs Source and Drain Contacts", Jpn. J. Appl. Phys. 49, pp.113001/1-3 (2010).
- 8) Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Long spin-relaxation time in a single metal nanoparticle", Nature Nanotechnology 5, pp.593-596 (2010).
- 9) Shinobu Ohya, Iriya Muneta, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Valence-Band Structure of the Ferromagnetic Semiconductor GaMnAs Studied by Spin-Dependent Resonant Tunneling Spectroscopy", Phys. Rev. Lett. 104, pp.167204/1-4 (2010).
- 10) Shinobu Ohya, Iriya Muneta, and Masaaki Tanaka, "Quantum-level control in a III-V-based ferromagnetic-semiconductor heterostructure with a GaMnAs quantum well and double barriers", Appl. Phys. Lett. 96, 052505/1-3 (2010).
- 11) H. Shimizu, S. Goto, and T. Mori, "Optical Isolation Using Nonreciprocal Polarization Rotation in Fe-InGaAlAs/InP Semiconductor Active Waveguide Optical Isolators", Applied Physics Express 3, 072201/1-3 (2010).
- 12) H. Shimizu, and S. Goto, "Fabrication and Characterization of Evanescent Semiconductor Optical Isolators with Small Gain Saturation Effect", Japanese Journal of Applied Physics 49, 122201 (2010).
- 13) K. Yamada, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, "Current-induced switching of magnetic vortex core in ferromagnetic elliptical disks", Appl. Phys. Lett. 96 192508 (2010).
- 14) Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, Stewart E. Barnes, Sadamichi Maekawa, "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions", Nature 458, pp.489-492 (2009).
- 15) Y. Takeda, M. Kobayashi, T. Okane, T. Ohkochi, J. Okamoto, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Tanaka, J. Okabayashi, M. Oshima, S. Ohya, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Nature of magnetic coupling between Mn ions in as-grown Ga1-xMnxAs studied by x-ray magnetic circular dichroism", Phys. Rev. Lett. 100, 247202 (2008).
- 16) S. Kasai, P. Fischer, Mi-Y. Im, K. Yamada, Y. Nakatani, K. Kobayashi, H. Kohno, and T. Ono, "Probing the spin polarization of current by soft X-ray imaging of current-induced magnetic vortex dynamics", Phys. Rev. Lett. 101, 237203 (2008).

- 17) Y. Mizuno, S. Ohya, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Spin-dependent transport properties in GaMnAs-based spin hot-carrier transistors", Appl. Phys. Lett. 90, pp.162505/1-3 (2007).
- 18) S. Ohya, P. N. Hai, Y. Mizuno, and M. Tanaka, "Quantum-size effect and tunneling magnetoresistance in ferromagnetic-semiconductor quantum heterostructures", Phys. Rev. B75, pp.155328/1-6 (2007).
- 19) M. Tanaka and S. Sugahara (Invited paper) "Metal-Oxide-Semiconductor Based Spin Devices for Reconfigurable Logic", Invited paper in the Special Issue on Spintronics, IEEE Transactions on Electron Devices Vol. 54, pp.961-976 (2007).
- 20) Pham Nam Hai, S. Sugahara and M. Tanaka, "Reconfigurable Logic Gates Using Single Electron Spin Transistors", Jpn. J. Appl. Phys. 46, pp.6579-6585 (2007).

[学会発表] (計 400 件) 国際会議発表 150 件 (うち招待講演 33 件) 下記は基調講演

- ✦ Masaaki Tanaka (Plenary), "Properties and functionalities of MnAs-nanoparticle / III-V-semiconductor hybrid structures: Spin transport, magnetoresistance, and electromotive force", IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers, Berkeley, USA, September 19-24, 2010.
- ✦ M. Tanaka (Keynote presentation), "Spin dependent transport in III-V magnetic heterostructures", Spintronics 2008, Spin Sensing and Devices, SPIE Optics & Photonics Symposium, San Diego, August 10-14, 2008.

その他、国内学会等での発表は 255 件、招待講演・依頼講演は多数あり。

[図書] (計 10 件)

- 1) Masaaki Tanaka and Shinobu Ohya, "Spintronic Devices Based on Semiconductors", Comprehensive Semiconductor Science and Technology, Vol.6, pp.540-562, Elsevier (Amsterdam), February 2011.
- 2) M. Tanaka, S. Ohya, Y. Shuto, S. Yada, and S. Sugahara, "III-V and Group-IV Based Ferromagnetic Semiconductors for Spintronics", Comprehensive Nanoscience and Technology, Vol.4, pp.447-462, Academic Press (Oxford), February 2011.
- 3) H. Shimizu, INTECH, Advances in Optical and Photonic Devices, Chapter 4 "Monolithic Integration of Semiconductor Waveguide Optical Isolators with Distributed Feedback Laser Diodes", 59-66 (2010).
- 4) T. Amemiya, H. Shimizu, and Y. Nakano,

INTECH, Advances in Optical and Photonic Devices, Chapter 7 "Single Mode Operation of 1.5- μ m Waveguide Optical Isolators Based on the Nonreciprocal-loss Phenomenon", 117-136 (2010).

- 5) 田中雅明 "強磁性半導体ヘテロ構造 — スピン依存トンネル現象を中心に — 『スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線』 CMC 出版 (2009 年 6 月 30 日発行).
- 6) 鈴木義茂 「スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線 第 4 章 スピン注入磁化反転と自励発振」 CMC 出版, pp.42-59 (2009 年 6 月 30 日発行).
- 7) 清水大雅, "スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線 第 33 章 光スピントロニクスデバイス ~集積光非相反デバイス~", pp.397-407, CMC 出版, (2009 年 6 月 30 日発行).
- 8) Masaaki Tanaka, Masafumi Yokoyama, Pham Nam Hai, and Shinobu Ohya, "Properties and Functionalities of MnAs/III-V Hybrid and Composite Structures", Chapter 11 in Semiconductors and Semimetals, Volume 82, pp.455-485, Elsevier, 2008.
- 9) S. Ohya and M. Tanaka, "TMR in Semiconductors", Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials, Vol. 5 Spintronics and Magnetoelectronics, John Wiley & Sons Ltd. (Chichester, UK), 3064 pages, July 2007. .
- 10) Proceedings of the 4th International Conference on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, Special Issue of physica status solidi, 2007, Wiley VCH, edited by M. Tanaka, K.M. Itoh, S. Katsumoto, M. Shirai, and H. Munekata.

[産業財産権]
なし

[その他]
ホームページ等
特定領域「スピン流」
http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/tokutei/public_html/
東京大学 田中・大矢研究室
<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>
東京大学の代表的な研究成果
<http://www.u-tokyo.ac.jp/coe/english/achievements/report01.html>
「半導体におけるスピン関連現象の物理と応用」国際会議 PASPS-VI
<http://www.gakkai-web.net/gakkai/pasps/hp/index.html>

大阪大学 鈴木研究室

<http://www.suzukiylab.mp.es.osaka-u.ac.jp/>

東京農工大学 清水研究室

http://www.tuat.ac.jp/~h-shmz/lab_index_j.htm

電気通信大学 仲谷研究室

http://www.tuat.ac.jp/~h-shmz/lab_index_j.htm

受賞

1. 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008) Young Researcher Award、Pham Nam Hai (田中研究室) 2009年9月 41st SSDMにて受賞式。
2. 東京大学総長賞、総長特別賞、東京大学工学系研究科長賞・最優秀賞 ファムナムハイ (田中研究室) 2009年3月23日 「Spin dependent transport phenomena in III-V semiconductor heterostructures with ferromagnetic MnAs nano-scale particles」に関する一連の研究業績に対して。
3. 応用物理学会講演奨励賞、大矢忍、2007年3月。
4. 第3回日本学術振興会賞 田中雅明、2007年3月。
5. 第20回先端技術大賞 (学生部門最優秀賞) ファムナムハイ (田中研究室)、2006年7月。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 雅明 (TANAKA MASAOKI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30192636

(2) 研究分担者

鈴木 義茂 (SUZUKI YOSHISHIGE)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：50344437

清水 大雅 (SHIMIZU HIROMASA)

東京農工大学・共生科学技術研究科・准教授

研究者番号：50345170

仲谷 栄伸 (NAKATANI YOSHINOBU)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：20207814