

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2006～2010

課題番号：18106007

研究課題名(和文) リコンフィギャラブル・ナノスピンドバイス

研究課題名(英文) Reconfigurable Nano-Spin Devices

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)：本研究では、従来の半導体デバイスでは不可能であったリコンフィギャラブルな機能をもつナノスピンドバイスの基盤技術を開発することを目指した。スピン自由度を有する新しい半導体デバイス構造を提案し、柔軟な情報処理機能、すなわちハードウェアを作製した後で機能を再構成(書き換える)することが可能(リコンフィギャラブル)な半導体デバイスを試作し、その動作原理を示した。スピン機能材料の研究開発を行うとともに、大きく分けて次の3タイプのスピンドバイス；(1) IV族半導体をベースとしたMOSFET型(プレーナ型)のスピンドバイス、(2) III-V族半導体をベースとした接合型スピントランジスタ、(3)磁性金属微粒子と半導体からなる複合構造をベースとした単電子スピントランジスタを作製し、その動作原理を示した。

研究成果の概要(英文)：We aimed at the development of basic technologies for reconfigurable nano-scale spin devices that cannot be realized by the conventional semiconductor device technology. We proposed new semiconductor-based device structures with spin-degrees of freedom, and fabricate the reconfigurable devices (in which the device functions can be reprogrammed after fabricating the devices), and demonstrated the device operation principles. We studied the following three types of spin devices.

(1) Group-IV-semiconductor based MOSFET planer-type spin devices

(2) III-V-semiconductor based heterojunction spin devices

(3) Single-electron type spin transistors based on hybrid materials consisting of ferromagnetic nano-particles and semiconductors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2007年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
2008年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2009年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2010年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
総計	77,900,000	23,370,000	101,270,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：スピンドバイス

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスの屋台骨を支えているシリコンデバイス・集積回路は、過去 30 年以上にわたって微細化・高集積化の一途をたどってきたが、微細化による高性能化が極限近くにまで進んでおり、あと 10 年程度で限界に達することは明らかである。さらに、通常の半導体では不揮発的な情報の読み書きを高速に行えないため、低速な（しかも機械動作を含むため信頼性が低く電力を食う）ハードディスクなどの外部記録装置を併用しなくてはならず、情報通信・情報処理技術の自由度は必ずしも十分ではない。大容量化、高速化、低消費電力化、高信頼性等、さまざまな情報処理に対する要求が急速に高まりつつある中、従来の半導体エレクトロニクスは早晩限界に達する恐れがある。

2. 研究の目的

本研究はこのような閉塞状況を少しでも打破するために、従来の半導体デバイスでは不可能であったリコンフィギャラブルな機能をもつナノスピンドバイスを開発しようとするものである。本研究計画では、スピン自由度を有する新しい半導体デバイス構造を提案し、柔軟な情報処理機能、すなわちハードウェアを作製した後で機能を再構成（書き換える）することが可能（リコンフィギャラブル）な半導体デバイスを試作し、その動作を示すことを目的としている。具体的には、材料開発からはじめ、次の3つのタイプのデバイスを試作する。

- (1) IV 族半導体をベースとした MOSFET 型のスピンドバイス（スピン MOSFET）
- (2) III-V 族半導体をベースとした接合型スピントランジスタ
- (3) 磁性金属微粒子と半導体からなる複合構造をベースとした単電子スピントランジスタ

3. 研究の方法

本研究では、すでに存在する材料やデバイスを単に組み合わせるのではなく、1) IV 族半導体ベース、2) III-V 族半導体ベース、3) 強磁性微粒子、といったスピン機能材料のそれぞれにおいて、結晶成長による新材料や新しいヘテロ構造・ナノ構造の作製、物性評価・探索と制御、デバイスプロセスの開発と試作、デバイス物理の探索と確立を目指した研究を一貫して行い、リコンフィギャラブルな機能をもつナノスピンドバイスの基盤技術を確立することを目指している。

4. 研究成果

(1) IV 族ベース磁性半導体および IV 族半導体をベースとした MOSFET 型のスピンドバイス（スピン MOSFET）の研究成果

(1-1) 新しい IV 族強磁性半導体 GeFe の創成に成功し、詳細な構造評価と磁気光学効果の実験から、ダイヤモンド型半導体のバンドがスピン分裂して強磁性となっている真の強磁性半導体であることを示した。これは、IV 族半導体としては初めて真の強磁性半導体であることが示された材料である。(1-2) Mn ドープ Ge ($\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$) は Si テクノロジーと整合性の高い IV 族ベース強磁性半導体として期待される。磁性半導体 GeMn の強磁性の起源が、スピノダル分解によってできる Mn 組成が高いナノスケールのコラム構造にあることを明らかにした。また、強磁性の起源であるアモルファス強磁性半導体 GeMn の薄膜作製に成功し、その基本物性を明らかにした。

(1-3) 磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ の Ge (100) 基板上への MBE 成長では基板温度が高温の場合は様々な強磁性の化合物クラスターが薄膜内に形成される。一方で低温成長ではアモルファス $\text{Ge}_{1-y}\text{Mn}_y$ が [100] 方向に細長く伸びたナノカラム状に偏析、Mn の不均一化を十分に抑える事は困難である。しかし、成長の面方位を変える事で成長カイネティクスが大きく変化し、Mn の偏析及びナノカラム形成を抑止できることを示した。 Ge (111) 基板上に様々な条件で成長した $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ 薄膜における MCD 測定と TEM 観測による構造評価を行った結果、結晶欠陥は多いもののナノカラム状の偏析は抑えられており、この系で

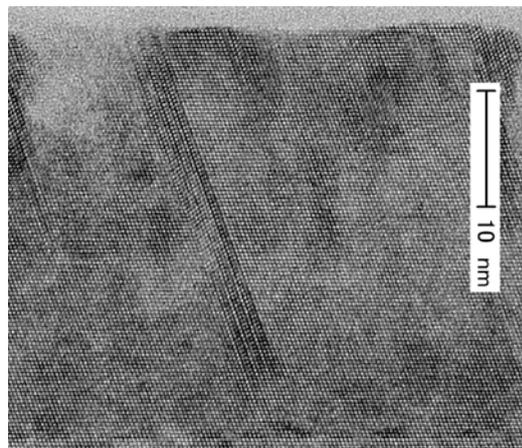


図 1 Ge(111) 基板上に成長した $\text{Ge}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}$ 薄膜の断面 TEM 格子像。この系で初めて均一な混晶強磁性半導体を得ることに成功した。[Appl. Phys. Exp. 2010.]

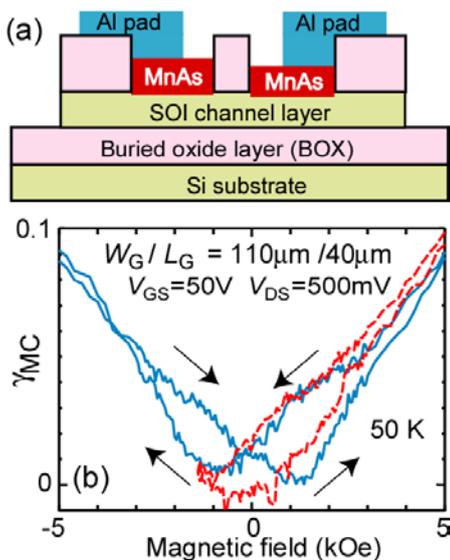


図2 (a)強磁性 MnAs をソース・ドレイン用い試作したバックゲート構造スピン MOSFET の断面図。(b)定バイアス条件でデバイス面内方向に磁場を掃引したときのドレイン電流の磁場依存性。縦軸は磁気電流比 γ_{MC} [%]で表している。測定温度は 50K。実線、破線は各々メジャー、マイナーループを表す。[Proc. Device Research Conf. 2008; Jpn. J. Appl. Phys. 2010.]

初めて均一な $Ge_{1-x}Mn_x$ 磁性半導体混晶を得ることに成功した(図1)。

(1-4) IV 族半導体をベースとしたスピン MOSFET の動作解析を行い、NAND/NOR、AND/OR、二入力対称関数など、種々のリコンフィギュラブル論理回路を提案した。また、回路シミュレーションによりそれらの動作を示した。

(1-5) SOI 基板上に強磁性 MnAs ソース・ドレインを用いたバックゲート構造スピン MOSFET を作製し、シリコン MOS 反転層へのスピン注入と検出に成功した。良好な電気的特性と磁性層の磁化によりチャネル抵抗が変化する磁気輸送特性を合わせ持つ MOSFET を作製し、スピン MOSFET の動作原理を示した(図2)。

以上は、IV 族スピントロニクスという新しい分野の創出と発展に寄与する成果である。

(2) III-V 族強磁性半導体および III-V 族強磁性半導体ヘテロ構造をベースとした接合型スピントランジスタの研究成果

(2-1) III-V 族ベース・スピン機能半導体材料 (GaMnAs, InGaMnAs) については、Mn 添加濃度を飛躍的に高めること、世界最高レ

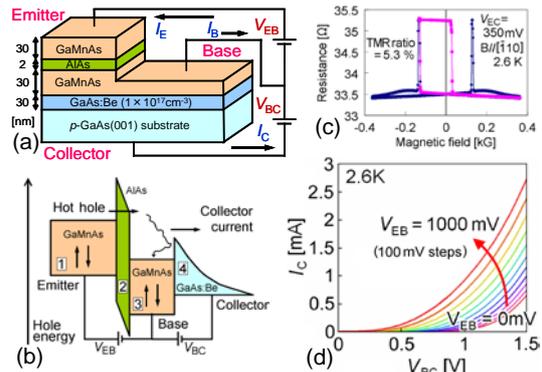


図3 (a) 3 端子接合型スピントランジスタ構造と(b)その価電子帯バンド図。(c) エミッタ-コレクタ間で測定した抵抗の磁場依存性で磁気抵抗(TMR)が明瞭に観測されている。(d) ベース接地で測定したコレクタ電流のベース・コレクタ電圧依存性。エミッタ・ベース電圧を変えてプロット。トランジスタ動作を確認した。[Appl. Phys. Lett. 2007]

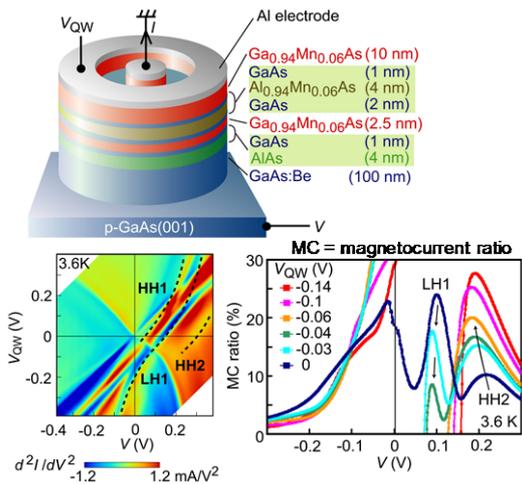


図4 GaMnAs 量子井戸 2 重障壁構造を用いて 3 端子構造を作製した。AlMnAs を障壁に用いることで TMR がさらに増大した。量子井戸電極のバイアス電圧 V_{QW} を変えることで、GaMnAs 量子井戸(膜厚 2.5 nm)の共鳴準位(量子準位)を制御すること、および TMR を変調することが出来た。[Appl. Phys. Lett. 2010.]

ベルの強磁性転移温度 T_c を得ることに成功した。

(2-2) 二重障壁からなる強磁性トンネル接合素子を作製し、強磁性半導体ヘテロ構造において初めて共鳴トンネル効果によるトンネル磁気抵抗効果の増大を観測した。

(2-3) 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の中ではなく、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。

(2-4) 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した。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。

(2-5) 強磁性半導体ヘテロ接合を用いて初めて、磁気抵抗効果と電流増幅機能を合わせ持つ接合型スピントランジスタの原理的動作に初めて成功した (図 3)。

(2-6) 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 3 端子化して GaMnAs 超薄膜量子井戸に電極を付け、量子準位を電圧によって制御することに成功した (図 4)。

以上は、III-V 族をベースとした半導体スピントロニクスの発展に寄与する成果である。

(3) 磁性金属微粒子と半導体からなる複合構造と単電子スピントランジスタの研究成果

(3-1) 磁性混晶半導体におけるバイノーダル曲線とスピノーダル曲線を求める方法を提案し、実際に GaMnAs に適用してそれらを求めた。相分離を起こしやすい物質 (GeMn など) と起こしにくい物質 (GaMnAs など) の違いを明らかにした。さらに、スピノーダル分解を利用して、均一で規則的な MnAs 微粒子を得る方法を開発し実証した。

(3-2) 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 \sim 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

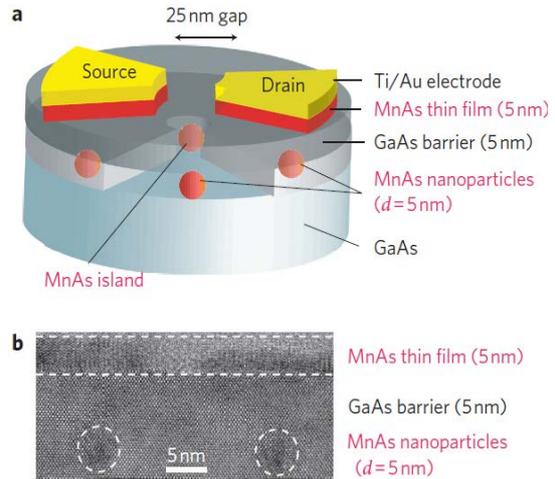


図5 (a)強磁性金属 MnAs ナノ微粒子 (直径 \sim 5 nm) を含む単電子スピントランジスタ構造と (b) GaAs 中に埋め込まれた MnAs ナノ微粒子の断面 TEM 像。[Nature Nanotechnology 2010.]

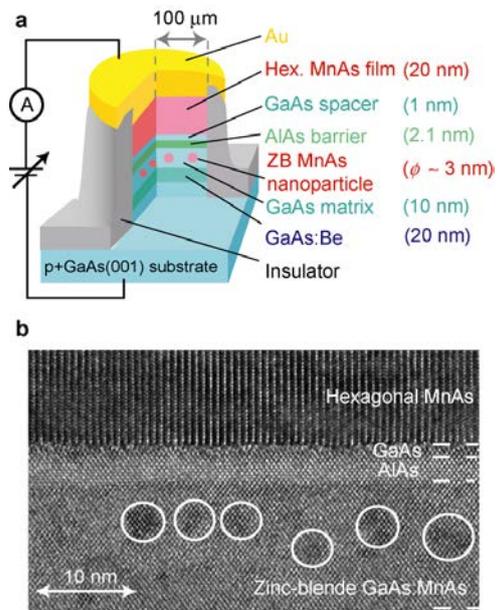


図6 a 作製した磁気トンネル接合素子の構造 b 磁気トンネル接合素子を高分解能の透過型電子線顕微鏡で断面観察した格子像。白丸が直径約 2 - 3nm 程度の閃亜鉛鉱型 MnAs 微粒子。[Nature 2009.]

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 (約 100 倍)、バルク金属と比べると 7 桁 (約 10,000,000 倍) 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 (図 5)。(3-3) 閃亜鉛鋳型結晶構造をもつ強磁性 MnAs のナノ微粒子を含む磁気トンネル接合デバイスにおいて、静磁場を与えるだけで起電力が発生する「スピン起電力」とクーロンブロック効果による 100,000% を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現した。このことは、磁気エネルギーを電気エネルギーに変換する新しい原理の実証を意味するとともに、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。この研究成果は、高感度の磁気センサやスピン起電力を利用した新規デバイス応用への道を拓くものである (図 6)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 51 件)

発表論文 51 編のうち、代表的な論文 14 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) Shinsuke Yada, Ryohei Okazaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Single-Crystalline Ferromagnetic Alloy Semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ Grown on Ge (111)", *Applied Physics Express* 3, pp.123002/1-3 (2010).
- 4) 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).
- 5) Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Long spin-relaxation time in a single metal nanoparticle", *Nature Nanotechnology* 5, pp.593-596 (2010).
- 6) 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).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) 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 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ studied by x-ray magnetic circular dichroism", *Phys. Rev. Lett.* 100, 247202 (2008).
- 10) Pham Nam Hai, Yusuke Sakata, Masafumi Yokoyama, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Spin valve effect by ballistic transport in ferromagnetic metal(MnAs) / semiconductor (GaAs) hybrid heterostructures", *Phys. Rev. B* 77, 214435/1-6 (2008).
- 11) 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).
- 12) S. Ohya, P. N. Hai, Y. Mizuno, and M. Tanaka, "Quantum-size effect and tunneling magnetoresistance in ferromagnetic-semiconductor quantum heterostructures", *Phys. Rev. B* 75, pp.155328/1-6 (2007).
- 13) 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).
- 14) 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 308 件)

国際会議発表 118 件 (うち招待講演 29 件)

下記 2 件はプレナリー講演

- ◇ 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.*
- ◇ 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 (MML2010), Berkeley, USA, September 19-24, 2010.*

その他、国内学会等での発表は 190 件、招待講演・依頼講演は多数あり。

〔図書〕(計7件)

- 1) 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. .
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 田中雅明「スピントロクス関連半導体材料」物質材料分野俯瞰ワークショップ報告書、科学技術振興機構研究開発戦略センター、2008年12月発行.
- 5) 田中雅明 "強磁性半導体ヘテロ構造ー スピン依存トンネル現象を中心にー" 『スピントロクスの基礎と材料・応用技術の最前線』 CMC出版 (2009年6月30日発行)
- 6) Masaaki Tanaka and Shinobu Ohya, "Spintronic Devices Based on Semiconductors", Comprehensive Semiconductor Science and Technology, Vol.6, pp.540-562, Elsevier (Amsterdam), February 2011.
- 7) 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.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：磁気-電気のエネギー変換装置、起電力発生装置、および磁気センサー装置
発明者：ファムナムハイ、大矢忍、田中雅明、Stewart E. Barnes、前川禎通
権利者：東京大学
種類：特許
番号：61/158128
出願年月日：2009年3月7日
国内外の別：国内およびPCT特許仮出願(出願番号61/158128)

○取得状況(計1件)

名称：論理回路および単電子スピントランジスタ
発明者：ファムナムハイ、菅原聡、田中雅明
権利者：科学技術振興機構
種類：特許
番号：特許第4574675号
取得年月日：2010年8月27日
国内外の別：国内および米国

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

<http://www.youtube.com/watch?v=d6FoISeLR3k>

<http://www.u-tokyo.ac.jp/coe/english/achievements/report01.html>

受賞

1. 第3回日本学術振興会賞 田中雅明、2007年3月
2. 第20回先端技術大賞(学生部門最優秀賞) ファムナムハイ、2006年7月
3. 応用物理学会講演奨励賞、大矢忍、2007年3月
4. 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008) Young Researcher Award、Pham Nam Hai 2009年9月 41st SSDMにて受賞式.
5. 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 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.

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

大矢 忍 (OHYA SHINOBU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：20401143

(3) 連携研究者

菅原 聡 (SUGAHARA SATOSHI)

研究者番号：40282842

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・

准教授

中根 了昌 (NAKANE RYOSHO)

研究者番号：50422332

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師

ファムナムハイ

東京大学・大学院工学系研究科・特任助教

研究者番号：50571717