

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：19048018

研究課題名（和文） スピン偏極電流制御デバイス

研究課題名（英文） Spin-polarized-current-controlled 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）：従来の半導体デバイスや集積回路では持ち得なかった「不揮発性」と「再構成可能性」の機能をもつ材料とデバイス、特に**スピン偏極電流制御デバイス**を実現する。半導体材料あるいはデバイス構造中に磁性元素や強磁性材料を構成要素として取り込み、キャリアの電荷輸送に加えてスピン自由度、特に「スピン偏極電流」を活用する新しい機能材料やデバイスをつくる。具体的には、1) 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、2) IV 族半導体をベースとした MOSFET 型のスピンドバイス、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の材料プロセス基盤技術を確立し、素子を試作実現する。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to create materials and devices with nonvolatile memory and reconfigurable functions, in particular, spin-polarized-current-controlled devices. By introducing magnetic elements and ferromagnetic materials into semiconductors and device structures, we fabricate new functional materials and devices that use spin degrees of freedom as well as charge transport of carriers, particularly spin-polarized currents. More specifically, we establish the basic material and process technologies of, 1) III-V based heterojunction-type spin transistors, 2) group-IV based MOSFET-type spin devices, and 3) single-electron spin transistors based on ferromagnetic nanoparticles/semiconductor granular materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	11,000,000	0	11,000,000
2008 年度	13,800,000	0	13,800,000
2009 年度	14,000,000	0	14,000,000
2010 年度	11,200,000	0	11,200,000
年度			
総計	50,000,000	0	50,000,000

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

スピン自由度を用いた新しい材料、物性、デバイスに関する分野「スピントロニクス」の研究は世界的に盛んになりつつあり、一部は実際にハードディスクや MRAM の開発として実を結びつつある。しかしながら研究の方向が一部では物理的興味に偏り、情報処理技術の根幹をなす半導体エレクトロニクスにどのように融合するか？という核心的な点について明示されることはなかった。本研究では、これまでの本申請者らによる材料物性・デバイス研究の実績をベースとして、従来の半導体デバイスや集積回路では持ち得なかった「不揮発性」と「再構成可能性」の機能をもつ材料とデバイスをつくりその動作を実証することにより、不揮発性および再構成可能な機能をもつスピン機能材料とスピン偏極電流制御デバイスを開発しようとするものである。応募者らは過去十数年間、半導体と磁性体の融合研究、電子材料の基礎物性とデバイス工学に跨る領域の開拓を行ってきた中で、磁性（スピン）のもつ機能（情報の不揮発性、書き換え可能）と半導体デバイスのもつ特長（増幅可能、高速、高集積、微細加工）の両方を生かした研究開発の重要性を認識し、本申請に至った。

## 2. 研究の目的

従来の半導体デバイスや集積回路では持ち得なかった「不揮発性」と「再構成可能性」の機能をもつ材料とデバイス、特にスピン偏極電流制御デバイスを創製する。半導体材料あるいはデバイス構造中に磁性元素や強磁性材料を構成要素として取り込み、キャリアの電荷輸送に加えてスピン自由度、特に「スピン偏極電流」を活用する新しい機能材料やデバイスをつくる。具体的には、1) 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、2) IV族半導体をベースとしたMOSFET型のスピンドバイスタ、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実現する。これらのスピントランジスタにおける共通の特長は、トランジスタ動作可能な3端子デバイスであると同時に、デバイス内部に含む2つの強磁性層の磁化の向き（平行磁化か反平行磁化か）によって、スピン偏極電流を制御し、出力特性を不揮発的に変えることができる点である。このように作製後に出力特性が可変であるという特長を生かし、これらのスピントランジスタを用いた超高密度の不揮発性メモリや再構成可能な論理回路を提案・設計

する。

## 3. 研究の方法

研究代表者（田中）と分担者（大矢）は同じ研究室に属しているため、一体の組織で研究を行う。田中は全体の総括と主にIV族系デバイス・材料、大矢はIII-V族系デバイス・材料を担当するが、これに縛られることなく相互に密接に協力して研究を行う。田中および大矢の指導のもとで、東京大学工学系研究科博士課程および修士課程の大学院生4-6名が参加する。

平成19年度には、不揮発性メモリ機能および再構成可能な機能をもつデバイス作製のための材料形成および物性機能の制御を目指した基礎研究を行う。特に、デバイスの構成要素であるIII-V族およびIV族ベースの磁性半導体、III-V族およびIV族半導体と整合性の良い強磁性金属とそのヘテロ構造のエピタキシャル成長による形成、評価、物性制御の研究が中心である。

平成20年度以降には、材料（複合ヘテロ構造、ナノ構造）形成技術の確立、その物性制御、スピン依存伝導の研究、III-V族半導体をベースと接合型スピントランジスタ、IV族半導体をベースとしたMOS型スピントランジスタ、強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の試作、不揮発性メモリ機能と再構成可能な機能の設計と解析を行う。

## 4. 研究成果

(1) III-V族強磁性半導体ヘテロ接合をベースとした接合型スピントランジスタの研究

(1-1) 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、世界最高レベルの強磁性転移温度 $T_c$ を得ることに成功した。

(1-2) 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。

(1-3) 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。

(1-4) 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

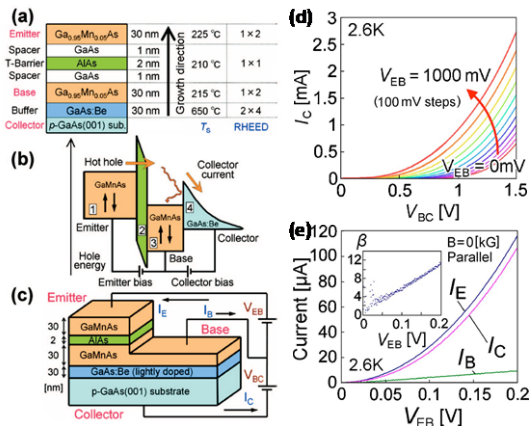


図1 (a)3端子接合型スピントランジスタ構造と (b)その価電子帯バンド図、(c)作製したデバイス構造。(d)ベース接地で測定したコレクタ電流のベース・コレクタ電圧依存性、エミッタ・ベース電圧を変えてプロット。トランジスタ動作を確認した。(e)コレクタ電流 $I_C$ 、エミッタ電流 $I_E$ 、ベース電流 $I_B$ とベース・エミッタ電圧 $V_{EB}$ の関係、挿入図は電流増幅率。[Appl. Phys. Lett. 2007]

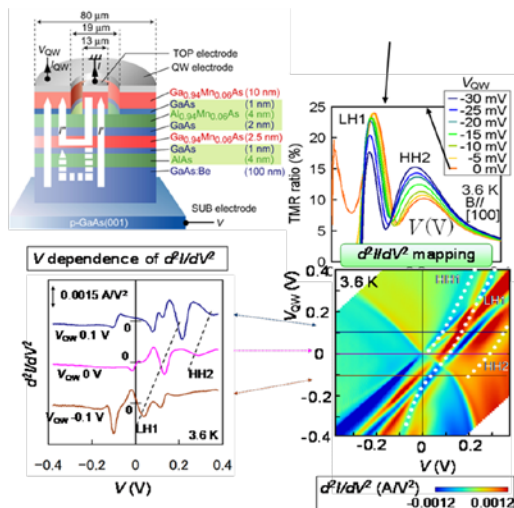


図2 GaMnAs 量子井戸 2 重障壁構造を用いて 3 端子構造を作製した。AlMnAs を障壁に用いることで TMR がさらに増大した。量子井戸電極のバイアス電圧  $V_{GW}$  を変えることで、GaMnAs 量子井戸(膜厚 2.5 nm)の共鳴準位(量子準位)を制御すること、および TMR を変調することが出来た。[Appl. Phys. Lett. 2010.]

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。

(1-5) 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 1)。

(1-6) 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 2)。

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。

(2) 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 型スピンドバイスの研究

(2-1) 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。(2-2) Mn ドープ Ge ( $Ge_{1-x}Mn_x$ ) 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。

(2-3) 磁性半導体  $Ge_{1-x}Mn_x$  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  $Ge_{1-y}Mn_y$  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  $Ge_{1-x}Mn_x$  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。

(2-4) 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

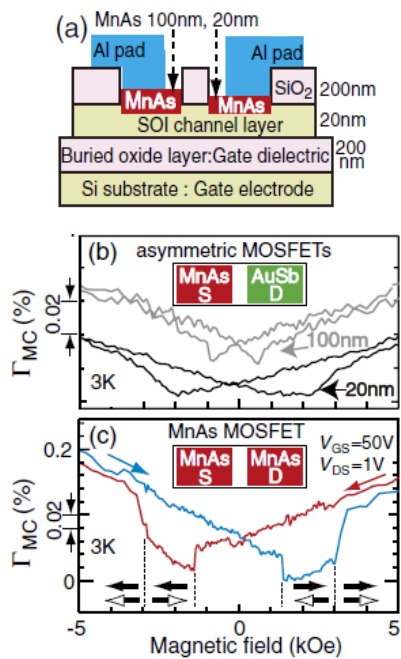


図3 (a)強磁性 MnAs をソース・ドレイン用い試作したバックゲート構造スピンス MOSFET の断面図。(b)ソースを強磁性 MnAs、ドレインを非磁性 AuSb とした MOSFET、(c) ソース・ドレインともに強磁性 MnAs としたスピンス MOSFET において、定バイアス条件でデバイス面内方向に磁場を掃引したときのドレイン電流の磁場依存性。縦軸は磁気電流比  $\Gamma_{MC}$  [%] で表している。測定温度は 3K。[Proc. Device Research Conf. 2008; Jpn. J. Appl. Phys. 2010.]

ンフィギャ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。

(2-5) 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ス MOSFET を作製し、シリコン MOS 反転層へのスピンス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、スピンス MOSFET の動作原理を示した (図 3)。

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。

(3) 強磁性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

(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。

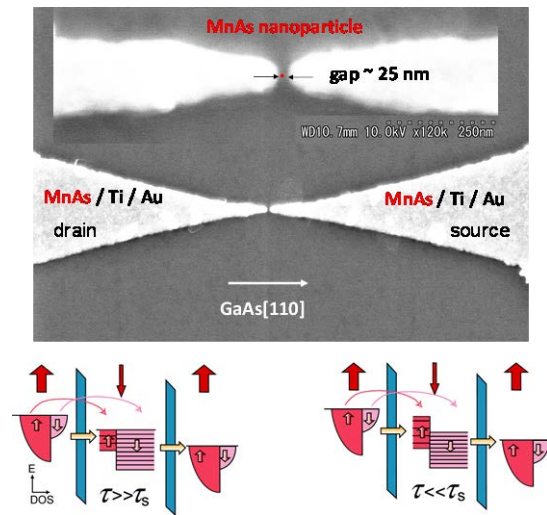


図4 強磁性金属 MnAs ナノ微粒子 (直径 ~ 5 nm) を含む単電子スピントランジスタ構造と (b) GaAs 中に埋め込まれた MnAs ナノ微粒子のスピンス依存伝導機構。[Nature Nanotechnology 2010.]

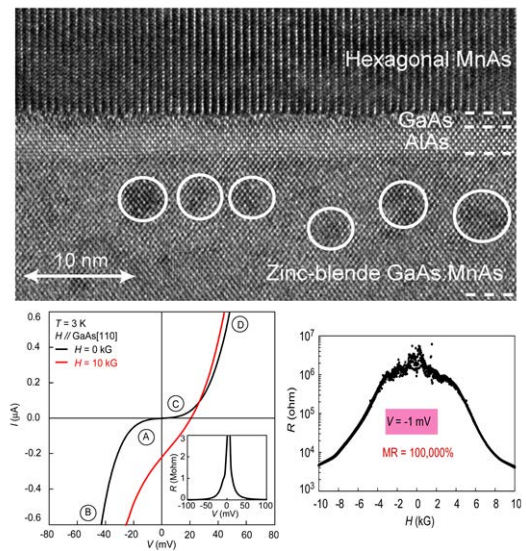


図5 作製した磁気トンネル接合素子の構造 (高分解能の透過型電子線顕微鏡で断面観察した格子像。白丸が直径約 2 - 3nm 程度の閃亜鉛鉱型 MnAs 微粒子。下の図はスピンス起電力と巨大磁気抵抗を示す。[Nature 2009])

(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 ~ 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ス緩和時間 (10  $\mu$ s) ( $\mu$ 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ス緩和時間として最も長く、最近報告された Co 微粒子のスピンス緩和時間より 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 (図 4)。(3-3) 閃亜鉛鉱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 5)。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 60 件)

発表論文 60 編のうち、代表的な論文 16 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) H. Katayama-Yoshida, K. Sato, T. Fukushima, M. Toyoda, H. Kizaki and V. A. Dinh, "Computational nano-materials design for the wide band-gap and high-Tc semiconductor spintronics", *Semiconductors and Semimetals* 82, 433-454 (2008).
- 10) Y. Takeda, M. Kobayashi, T. Okane, T. Ohkuchi, 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).
- 11) 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).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) 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).
- 15) 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).
- 16) K. Sato and H. Katayama-Yoshida, "Design of colossal solubility of magnetic impurities for semiconductor spintronics by the co-doping method", *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L1120-L1122 (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190件、招待講演・依頼講演は多数あり。

[図書] (計5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) 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) 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. .
- 5) 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]

○出願状況 (計1件)

名称：磁気-電気のエネルギー変換装置、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.u-tokyo.ac.jp/coe/english/achievements/report01.html>

受賞

1. 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。
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 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、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

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

吉田 博 (YOSHIDA HIROSHI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：30133929

佐藤 和則 (SATO KAZUNORI)

研究者番号：60379097

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授