

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601  
研究種目：特別推進研究  
研究期間：2011～2015  
課題番号：23000010  
研究課題名（和文） 不揮発性および再構成可能な機能をもつ半導体材料と  
デバイスの研究開発  
研究課題名（英文） Semiconductor Materials and Devices with  
Nonvolatile and Reconfigurable Functions  
研究代表者  
田中 雅明 (TANAKA, Masaaki)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：30192636  
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：420,800,000 円

## 研究成果の概要（和文）：

半導体材料とデバイス構造中に磁性元素や強磁性材料を取り込み、キャリアの電荷輸送に加えて「スピン自由度」をも活用する新しい強磁性半導体および強磁性体/半導体複合構造材料を作製し、様々な物性機能を発現させることに成功した。それらの材料を用いたスピン自由度による機能を有する新しい半導体スピントロニクスデバイス（スピントランジスタ）を提案・作製し、その動作原理を実証した。これらの材料やデバイスの研究開発によって、不揮発性メモリ機能と合わせて再構成可能な論理回路に応用できる道筋を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

By introducing magnetic atoms and materials into semiconductor materials and devices, we have successfully created new ferromagnetic semiconductors and ferromagnet/semiconductor hybrid structures to utilize not only charge transport of carriers but also spin degrees of freedom, and have realized a variety of new functionalities. Using these materials, we have designed and fabricated new semiconductor spintronics devices, in particular spin transistors, with spin-related functions, and have proved their device operation principles. Our results pave the way to the applications to non-volatile memory and reconfigurable logic circuitry.

研究分野： 工学 応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学  
工学 電気電子工学 電子・電気材料工学

キーワード： スピン スピントロニクス 磁性半導体 共鳴トンネル効果  
バンドエンジニアリング スピン依存伝導 トンネル磁気抵抗効果  
スピントランジスタ

1. 研究開始当初の背景

今日の情報化社会を支えている半導体デバイスでは、キャリアの電荷輸送を用いた電子デバイスと光デバイスが作製され、エレクトロニクスや情報技術を支えてきた。一方、キャリアの持つもう1つの自由度であるスピンについては、半導体中で積極的に利用されることはなかった。しかし、ここ数十年の間に、スピンの影響が顕著に現れる様々な新材料が半導体をベースに作製できるようになり、興味深い物性が明かにされつつある[最近の研究状況は、田中雅明(総合報告)「半導体におけるスピン生成—半導体スピントロニクスの最近の進展」応用物理 78 巻 第3号, pp. 205-216 (2009); および M. Tanaka, M. Yokoyama, P. N. Hai, and S. Ohya (Invited review), "Properties and functionalities of MnAs/III-V hybrid and composite structures", Semiconductors and Semimetals, Vol. 82, pp. 455-485 (Academic Press, November 2008) を参照]。本研究者は、1990 年代初めに磁性体と半導体の一体化・融合に関する研究を開始し以来約 20 年間にわたって、III-V 族、IV 族ベースの材料物性、デバイス、論理回路の提案など、スピントロニクス分野で先導的研究を行っており、この分野の国際的な発展に貢献している。

2. 研究の目的

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取り込み、キャリアの電荷輸送に加えて「スピン自由度」をも活用する新しい機能材料やデバイスをつくる。スピン自由度による機能を有する新しい半導体デバイス構造を提案・解析し、不揮発性メモリ機能と合わせて、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する(書き換える)ことが可能な半導体デバイスを試作して動作を実証する。

3. 研究の方法

平成 23 年度に新たに III-V 族磁性半導体、磁性金属等の薄膜成長用分子線エピタキシー(MBE)装置を設計・製作し、立ち上げを行った。平成 24 年度初めには立ち上げと調整を終了し、以後順調に新しい III-V 族ベースのスピン機能材料の成長を行い、半導体スピン機能材料とデバイスの研究を行った。

4. 研究成果

材料形成と物性機能の制御を目指した基礎研究、特に III-V 族および IV 族ベースの磁性半導体、半導体と整合性の良い強磁性金属とヘテロ構造のエピタキシャル成長、評価、物性制御の研究を中心に行い、多くの成果を得た。代表的な成果のみを以下に挙げる。

(1) 共鳴トンネル分光法(図1)によって、III-V 族強磁性半導体 GaMnAs 量子井戸における共鳴準位を系統的に観測・解析した。電気的性質や強磁性転移温度にかかわらず

GaMnAs のフェルミ準位  $E_F$  は従来の通説とは異なり禁制帯中に存在すること、価電子帯スピン分裂はわずかであること、共鳴トンネル効果によって磁気抵抗が大きく増大することを示した。また、 $E_F$  の Mn 濃度依存性を初めて明かにした。本研究により、これまで論争があり統一的理解がなかった GaMnAs, (InGaMn)As の価電子帯構造を明らかにした(図2)。さらに、GaMnAs のフェルミ準位、価電子帯と不純物バンドを光電子分光により観測し、強磁性発現機構を示した。

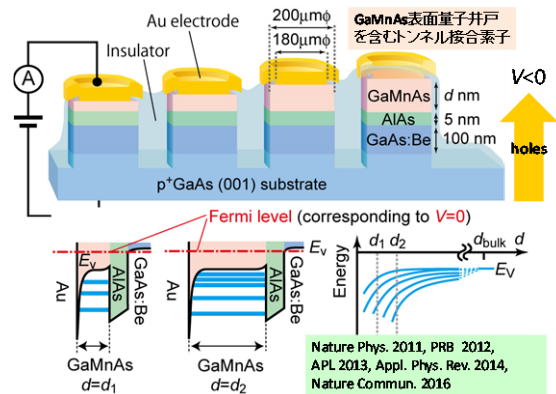


図1 III-V 族強磁性半導体 GaMnAs 量子井戸における共鳴準位を系統的に観測・解析

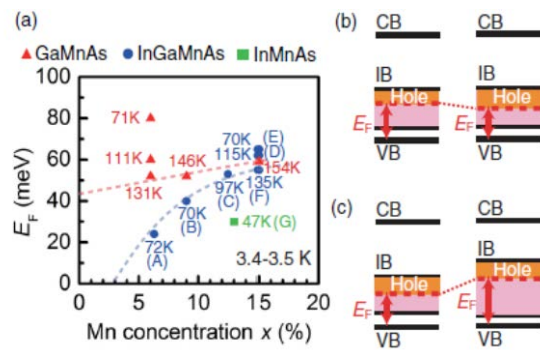


図2 共鳴トンネル分光法で求めた様々な Mn 組成をもつ GaMnAs, InGaMnAs, InMnAs のフェルミ準位の位置(価電子帯上端を 0 としている)。いずれも禁制帯中にあることがわかる。

(2) これまで最も研究されてきた Mn 系キャリア誘起強磁性半導体 (In, Mn)As や (Ga, Mn)As では磁性元素 Mn が局在スピンとアクセプタの役割を同時に果たすので常に p 型であり、n 型はできない。本研究では、低温 MBE より Fe を 9% までドーブした単結晶で閃亜鉛鉱(Zinc Blende)型構造をもつ n 型 (In, Fe)As の作製に成功した(図3)。Fe 原子が In サイトを置換し 3 価であるためドナーやアクセプターとならず中性状態であること、また低温成長により Be がダブルドナーとして働くことを示した。これによって局在スピン濃度と独立に電子濃度を制御することを可能にした。(In, Fe)As の電子キャリアは伝導帯に存在し有効質量は 0.03-0.17 $m_0$

と軽いことを明らかにした。(In,Fe)As は初めての n 型キャリア誘起 III-V 族強磁性半導体であり、学術上、応用上ともに有望な物質である。

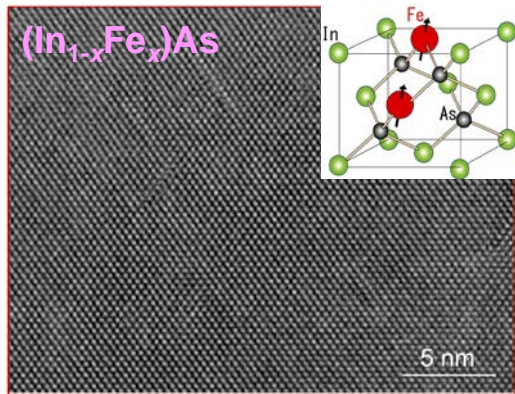


図3 GaAs(001)基板上に低温 MBE 成長した n 型強磁性半導体(In<sub>0.909</sub>,Fe<sub>0.091</sub>)As の透過電子顕微鏡(TEM)格子像。右上に示す閃亜鉛鉱型結晶構造をもつ混晶半導体であることがわかる。

(3) IV 族強磁性半導体 GeFe のキュリー温度  $T_c$  が最高で 220 K という IV 族における従来報告値を大きく超える値を得た。また、Fe 濃度揺らぎにより、室温強磁性をもつナノスケールドメインが存在することを見出した。

(4) GaAs:MnAs ナノ微粒子含むヘテロ構造を作製し、強磁性微粒子系で初めてトンネル異方性磁気抵抗効果 (TAMR) を観測し、不均一系に現れるスピン依存伝導特性を明らかにした。

(5) GaMnAs をアニールし自己組織化によって強磁性 MnAs 微粒子を作製する際に、レーザー照射によって MnAs 微粒子のサイズを制御できる (成長を抑制できる) ことを示した。

(6) 強磁性混晶半導体の相図を作成し、均一な強磁性微粒子の形成に成功した。強磁性混晶半導体のスピノーダル分解およびバイノーダル分解を含む相図を理論と実験によって求め、これを III-V 族強磁性半導体 GaMnAs および IV 族強磁性半導体 GeMn に適用し、均一なサイズの強磁性 MnAs 微粒子および強磁性 GeMn ナノカラム構造を作製する方法を提案・実証した。

(7) 磁性不純物の添加によりキャリア正孔のコヒーレンスが回復する特異な現象を初めて観測した。半導体 (GaAs) への磁性不純物 (Mn) の添加量を増やしたところ、強磁性への相転移に伴い価電子帯正孔の散乱が抑制

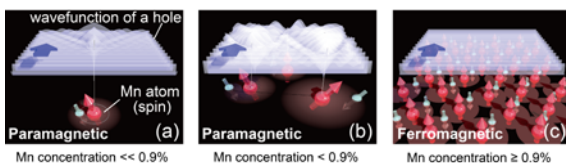


図4 電子 (正孔) の波動関数の散乱が磁性不純物マンガン(Mn)の濃度の増加によって抑制され秩序が回復する様子。

され秩序が回復するという従来の固体物理学では予測できない特異な現象を発見した (図4)。これは、強磁性転移に伴いスピンの向きが揃うことにより生じた Mn ドープ GaAs における強い交換相互作用を介して引き起こされる現象であると考えられる。この現象は、将来、半導体をベースとした強磁性薄膜中の電子や正孔のコヒーレンスを生かした高速な量子スピントロニクスデバイスの実現につながるものと期待される。

(8) InAs/(In,Fe)As/InAs 三層からなる量子井戸を作製し、表面エッチングすることにより、電子の波動関数を膜厚方法にシフトさせ (In,Fe)As 層との重なりを変えることにより、キュリー温度  $T_c$  を変化させることに成功した。これは n 型強磁性半導体 (In,Fe)As を用いた波動関数工学の最初の実践である。

(9) 同様の試料で電界効果トランジスタを作製し、ゲート電界による電気的な磁性制御 (図5) に成功した。電子の波動関数を動かし (In,Fe)As 層との重なりを変えることにより、 $T_c$  を約 2 倍 (13K → 25K) 変化させることを示した。n 型強磁性半導体を用いた波動関数工学による電気的な磁性制御の最初の実践である。

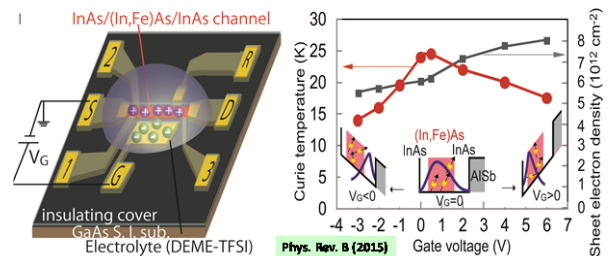


図5 InAs/(In,Fe)As/InAs 三層構造からなる量子井戸をチャンネル、電解液による電気二重層をゲートとする電界効果トランジスタ (FET) のデバイス構造。ゲート電界を印加することにより、電子キャリアの波動関数を動かし、(In,Fe)As 層との重なりを変え、キュリー温度  $T_c$  を約 2 倍 (13K → 25K) 変化させることに成功した。

(10) GaAs に Mn を 1% 程度添加した GaMnAs を p 型電極、GaAs に Si を添加した n 型 GaAs を n 型電極とする p+n 接合ダイオードに逆バイアスを印加してホットキャリアで Mn の d 軌道を励起することにより、室温で可視光 ( $E_1=1.89$  eV and  $E_2=2.16$  eV, reddish-yellow) の電界発光を得た。これは GaAs に添加した Mn の d-d 遷移によるものであり、磁性半導体では初めての室温で動作する電界発光素子 (LED) である。発光スペクトルから、光学遷移には p-d 混成した準位が関わっており、共鳴トンネル分光法と光電子分光で明らかにした GaMnAs のバンド構造と整合することが分かった。

(11) さらに、間接遷移型半導体であり電子デバイスや LSI の基本材料である Si で発光素子ができれば、様々な応用が期待できる。

上記と同様に、p<sup>+</sup>型 Si:Mn と n 型 Si から成る p+n 接合ダイオードにおいて、室温で可視光 ( $E_1=1.75$  eV and  $E_2=2.30$  eV) の電界発光を得た (図6)。これは IV 族磁性半導体では初めての室温で動作する電界発光素子(LED)である。

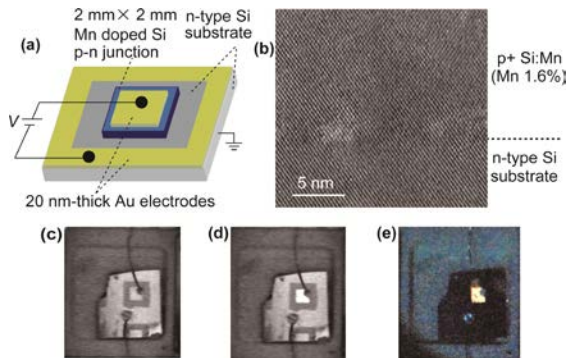


図6 作製した p<sup>+</sup>型 Si:Mn と n 型 Si から成る p+n 接合発光ダイオード(LED)のデバイス構造、p<sup>+</sup>型 Si:Mn 層の TEM 格子像。室温で可視光 ( $E_1=1.75$  eV and  $E_2=2.30$  eV) の電界発光を得た。

(12) III-V 族強磁性半導体で最高の  $T_c$  (= 230 K) もつ (Ga, Fe)Sb の創成とその物性の解明を行い、さらに (Ga, Fe)Sb の Fe 濃度を 23%以上を高めることにより室温強磁性半導体の実現に成功した。本研究の成果は、Applied Physics Letters 誌 (Issue of May 9, 2016) に出版され、同誌の FEATURED ARTICLE に選ばれ、表紙に (Ga, Fe)Sb の結晶構造図が掲載された (図7)。同時に、AIP Publishing のハイライト記事 AIP Publishing in the News にも掲載された。

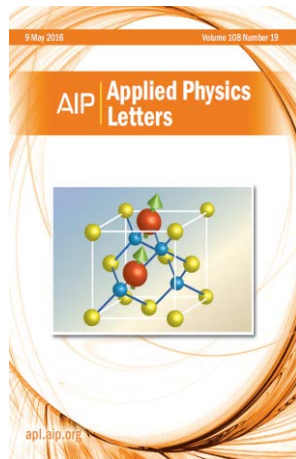


図7 Applied Physics Letters 誌の表紙に掲載された室温強磁性半導体 (Ga, Fe)Sb の結晶構造。

(13) 強磁性半導体ヘテロ接合 GaMnAs/GaAs/GaMnAs からなる縦型構造を有する Spin-MOSFET を作製し (図8)、その基本動作を実証した。電流-電圧特性を磁化配置及びゲート電界によって制御すること (スピントランジスタとしての動作) に成功し、60%にも及ぶ磁気抵抗比を観測した。この磁気抵抗比はこれまでに横型 Spin-MOSFET で得られた値 (0.1%以下) に比べて著しく大きい値である。素子サイズが 200  $\mu\text{m}$  と大きいためゲート電圧による変調は小さいが、微細化することで改善が期待できる。

スピン依存トンネル伝導を用いた

縦型 Spin MOSFET

Kanaki, Ohya, Tanaka, APL 2015

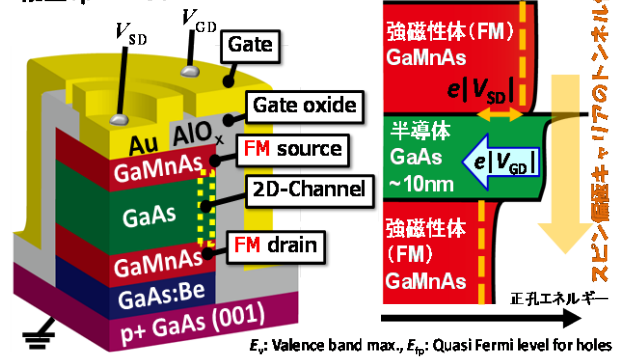


図8 III-V 族強磁性半導体 (GaMnAs)/GaAs/GaMnAs からなる超薄膜ヘテロ構造を用いた縦型 Spin-MOSFET のデバイス構造とバンド図。スピン依存トンネル伝導をサイドゲートで制御し、さらに GaMnAs の磁化を変えることによってドレイン電流を制御できるスピントランジスタとしての動作を示す。

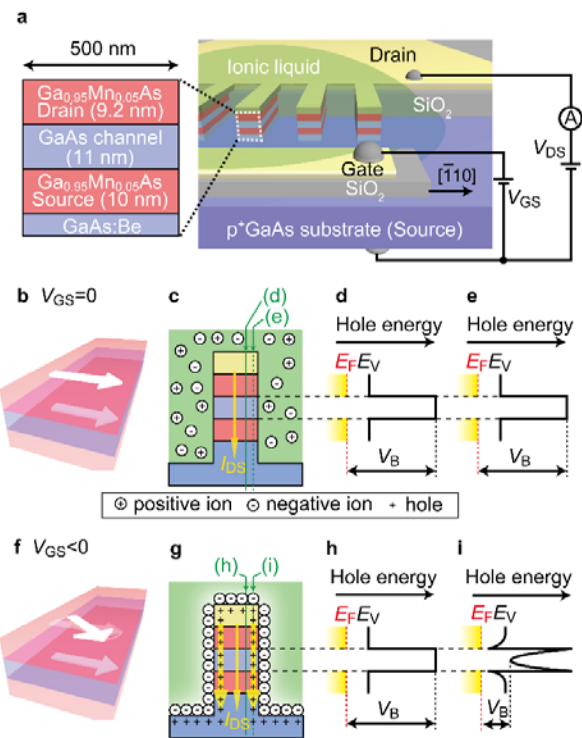


図9 幅 500nm に微細加工した GaMnAs/GaAs/GaMnAs 超薄膜ヘテロ構造を用いた縦型 Spin-MOSFET のデバイス構造とバンド図。

(14) 同様の GaMnAs/GaAs/GaMnAs からなる強磁性半導体ヘテロ接合を微細加工し、幅 500nm の縦型 Spin-MOSFET を作製し (図9)、その基本動作を実証した。大きな磁気抵抗比とともに、ゲート電圧による電流変調特性を大幅に改善した。さらにサイドゲート電圧によって素子全体の磁気異方性を変えられることを示した。電圧で磁気異方性を変えることは、低消費電力で動作するスピンドバイス実現の可能性を開くものである。

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) 代表的なもののみ記載。

[雑誌論文] (計 44 件) すべて査読有り。

- 1) Iriya Muneta, Shinobu Ohya, Hiroshi Terada and Masaaki Tanaka, "Sudden restoration of the band ordering associated with the ferromagnetic phase transition in a semiconductor", Nature Communications, in press (2016). Doi: 10.1038/ncomms12013
- 2) Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb", Appl. Phys. Lett. **108**, pp.192401/1-4 (2016). DOI: 10.1063/1.4948692
- 3) Yuki K. Wakabayashi, Shoya Sakamoto, Yukiharu Takeda, Keisuke Ishigami, Yukio Takahashi, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Room temperature local ferromagnetism and nanoscale domain growth in the ferromagnetic semiconductor GeFe", Scientific Reports **6**, pp.23295/1-9 (2016). Doi: 10.1038/srep23295
- 4) Pham Nam Hai, Daiki Maruo, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "Continuous reddish-yellow visible-light emission at room temperature in manganese-doped silicon light-emitting diodes" Phys. Rev. **B93**, pp.094423/1-6 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.094423
- 5) Toshiki Kanaki, Hirokatsu Asahara, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Spin-dependent transport properties of a GaMnAs-based vertical spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor structure", Appl. Phys. Lett. **107**, pp.242401/1-4 (2015). Doi: 10.1063/1.4937437
- 6) T. Dietl, K. Sato, T. Fukushima, A. Bonanni, M. Jamet, A. Barski, S. Kuroda, Masaaki Tanaka, Pham Nam Hai, H. K. Yoshida, "Spinodal nanodecomposition in semiconductors doped with transition metals", Reviews of Modern Physics **87**, pp.1311-1377 (2015). DOI: 10.1103/RevModPhys.87.1311
- 7) S. Sato, R. Nakane, and M. Tanaka, "Origin of the broad three-terminal Hanle signals in Fe/SiO<sub>2</sub>/Si tunnel junctions", Appl. Phys. Lett. **107**, pp.032407/1-5 (2015). Doi: 10.1063/1.4926969
- 8) Le Duc Anh, Pham Nam Hai, Yuichi Kasahara, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka, "Modulation of ferromagnetism in (In,Fe)As quantum wells via electrically controlled deformation of the electron wavefunctions", Phys. Rev. **B92**, pp.161201/1-5(R) (2015). Doi: 10.1103/PhysRevB.92.161201
- 9) Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "Magnetic properties and intrinsic ferromagnetism in (Ga,Fe)Sb ferromagnetic semiconductors", Phys. Rev. **B92**, pp.144403/1-14 (2015). Doi: 10.1103/PhysRevB.92.144403
- 10) M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Takeda, A. Fujimori, Y. Senba, H. Ohashi, A. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai, M. Tanaka, Y. Harada, and M. Oshima, "Electronic Excitations of Magnetic Impurity State in Diluted Magnetic Semiconductor (Ga,Mn)As", Phys. Rev. Lett. **112**, 107203/1-4 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.107203
- 11) R. Nakane, Y. Shuto, H. Sukegawa, Z.C. Wen, S. Yamamoto, S. Mitani, M. Tanaka, K. Inomata, and S. Sugahara, "Fabrication of pseudo-spin-MOSFETs using a multi-project wafer CMOS chip", Solid State Electronics, **102**, pp.52-58 (2014). Doi:10.1016/j.sse.2014.06.004
- 12) Masaaki Tanaka, Shinobu Ohya, and Pham Nam Hai (invited), "Recent progress in III-V based ferromagnetic semiconductors: Band structure, Fermi level, and tunneling transport", Applied Physics Reviews **1**, pp.011102/1-26 (2014). DOI: 10.1063/1.4840136
- 13) Iriya Muneta, Hiroshi Terada, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Anomalous Fermi level behavior in GaMnAs at the onset of ferromagnetism", Appl. Phys. Lett. **103**, pp.032411/1-4 (2013). DOI: 10.1063/1.4816133.
- 14) Shinobu Ohya, Iriya Muneta, Yufei Xin, Kenta Takata, and Masaaki Tanaka, "Valence-band structure of quaternary alloy ferromagnetic semiconductor (InGaMn)As", Phys. Rev. **B86**, pp.094418/1-8 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.094418
- 15) Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Shyam Mohan, Tsuyoshi Tamegai, Masaya Kodzuka, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, and Masaaki Tanaka, "Growth and characterization of n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As", Appl. Phys. Lett. **101**, pp.182403/1-5 (2012). DOI: 10.1063/1.4764947
- 16) Shinobu Ohya, Kenta Takata, and Masaaki Tanaka, "Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs", Nature Physics **7**, pp.342-347 (2011). DOI: 10.1038/NPHYS1905

[学会発表] (計 310 件)

国際会議 124 件 内 招待講演 34 件

国内学会研究会等 186 件 内 招待講演 20 件

- 1) Masaaki Tanaka (invited), "Epitaxial Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures: Control of Ferromagnetism by Wavefunction Engineering", 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya, August 7-12, 2016.
- 2) Masaaki Tanaka (invited), "Wavefunction engineering using n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As", Workshop on Computational Nano-Materials Design and Realization for Energy-Saving and Energy-Creation Materials, Osaka University, Toyonaka, March 25- 26, 2016.
- 3) Masaaki Tanaka, Pham Nam Hai, and Le Duc Anh (invited), "Continuous visible-light emission at room temperature in Mn-doped GaAs and Si light-emitting diodes", SPIE Nano Science + Engineering, Spintronics Symposium, San Diego, August 9-13, 2015.
- 4) Masaaki Tanaka, Le Duc Anh, Pham Nam Hai (invited), "Ferromagnetic semiconductors and heterostructures for semiconductor spintronics: New n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor and its quantum wells", Energy, Material, Nanotechnology Meeting 2015, Cancun, Mexico, June 8-11, 2015.
- 5) Masaaki Tanaka, Pham Nam Hai, and Le Duc Anh (invited), "Recent progress in III-V based ferromagnetic semiconductors: N-type (In,Fe)As and its heterostructures", SPIE Nano Science + Engineering, Spintronics Symposium, San Diego, USA, 17-21 August 2014.

〔図書〕 (計 6 件)

- 1) 第 19 回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会, 19th Conference on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors PASPS-19, PASPS-19 実行委員会: 田中雅明、大矢忍、中根了昌、2014 年 12 月 15 日発行.
- 2) 田中雅明 「スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線 第 21 章 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—」普及版 シーエムシー出版、2015 年 8 月発行. ISBN978-4-7813-1026-8 C3054
- 3) 田中雅明 "半導体スピントロニクス: 現状と展望", 「スピントロニクスの新しい展望」特集 化学工業 Vol. 67(No. 3), pp. 165-172, 2016 年 3 月号.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 発光材料、発光材料の製造方法、発光素子、及び発光デバイス  
発明者: ファムナムハイ、田中雅明

権利者: 東京大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2014-017176  
出願年月日: 平成 26 年 1 月 31 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

受賞 (抜粋)

- ・ 田中雅明 平成 24 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 (研究部門) 「半導体スピントロニクス材料とデバイスの研究」  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/24/04/1319413.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/24/04/1319413.htm)
- ・ ファムナムハイ (Pham Nam Hai) 第 26 回安藤博記念学術奨励賞 2013 年 6 月 29 日 「新型キャリア誘起強磁性半導体の研究」  
<http://www.ando-lab.or.jp/rekidai-6.html>
- ・ 大矢忍 2015 年 4 月 12 日 平成 27 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞「スピン自由度を生かした半導体バンドエンジニアリングの研究」  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/27/04/1356509.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/27/04/1356509.htm)
- ・ 田中雅明 2015 年 9 月 応用物理学会フェロー表彰受賞「半導体スピントロニクス材料とデバイスの研究」 Research on Materials and Devices for Semiconductor Spintronics

・ ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 雅明 (TANAKA, Masaaki)  
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

中根 了昌 (NAKANE, Ryosho)  
東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授  
研究者番号: 50422332

ファム ナムハイ (Pham Nam Hai)  
東京工業大学・工学院・准教授  
研究者番号: 50571717

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

クリス パルムストロム (PALMSTROM, Chris)  
カリフォルニア大学・材料科学科・教授