

氏名	田中 雅明
所属機関	東京大学大学院工学系研究科
研究題目	超低消費電力デバイスのためのスピントロニクス材料の研究開発
<p>1. 研究の目的</p> <p>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、キャリアが持つもう1つの自由度である「スピン」は、半導体中で積極的に利用されてこなかった。しかし、ここ数十年の間に、スピン物性が顕著に現れる様々な新しい半導体ベースの材料が作製できるようになり、その興味深い性質が明かにされつつある。半導体材料やデバイス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を作ることができれば、シリコンデバイスの微細化による高性能化（ムーアの法則）が限界に達した後でも、新しいエレクトロニクスや情報処理技術を創出することができる。われわれは、スピン自由度による新機能をもつ新しい半導体デバイスを提案・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、すなわち作製した後で機能を再構成することが可能な半導体デバイスの実現を目指しており、この分野の基礎研究で世界をリードしている。しかし、材料開発には課題も多く、中でもn型およびp型の強磁性半導体で、高いキュリー温度を有する材料が求められる。本研究は、このような次世代スピントロニクスのための新しい材料やヘテロ構造の開発とスピントロニクスデバイスの作製を目的としている。</p>	
<p>2. 研究の内容(手法、経過、評価など)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 強磁性半導体 GaMnAs をソースとドレイン電極に GaAs をチャネルに用いたスピントランジスタ (Spin MOSFET) 構造を作製し、横型デバイスと縦型デバイスの両方において、磁気抵抗（磁化が平行か反平行かに応じてドレイン電流とチャネル抵抗が変化）とゲート電圧によるドレイン電流の変化を観測した。すなわち、スピントランジスタとしての基本動作の1つを確認実証した。[Appl. Phys. Express 11, pp. 033003/1-4 (2018).] ● シリコンベースのスピントランジスタ実現のために Fe(3nm)/Mg($d_{Mg} = 0\sim 2\text{nm}$)/MgO(0.8nm)/Si(001) トンネル接合を作製し、強磁性体から Si へのスピン注入と検出を系統的に調べることで、高効率なスピン偏極電子伝導のための設計指針を得た。具体的には、Fe の磁化不活性層の形成を Mg を挿入することによって抑止することが、高効率なスピン偏極電子伝導には必要であることを縦型三端子デバイスの測定によって示し、Mg の最適な膜厚を明らかにした。この結果は、我々が以前に提唱した物理モデルと非常に良い一致を示しており、測定シグナルにより接合の最適化をおこなう評価法を確立した。これによって最適化されたトンネル接合を用いて、最終目標のスピン電界効果型トランジスタに類似の横方向デバイス構造を作製し、測定シグナルがデバイス形状によって変化すること、その物理的起源を明らかにし、定量的評価法を開発した。[Phys. Rev. B 96, pp. 235204/1-10 (2017).] ● n型強磁性半導体(In, Fe)As からなるスピン江崎ダイオードを作製し、そのスピン依存バンド構造を用いて磁気伝導度（磁場による電流の変化）の大きさと符号を電圧で制御することに成功し、半導体デバイス（エサキダイオード）に新たなスピン機能を加えた。本研究成果は、今後の新材料探索とスピントロニクスデバイス応用に向けて大きな進展をもたらすものと期待される。この成果は下記の論文3)で発表し、Applied Physics Letters 誌の注目論文 (FEATURED ARTICLE) に選ばれ、紹介記事が AIP Scilight に掲載された。[Appl. Phys. Lett. 112, pp. 102402/1-4 (2018).] 	

2. 研究の内容(続き)

- 強磁性金属(FM)層/非磁性金属(NM)層から成る2層構造において、スピン軌道相互作用が強いNM層に電流を流しスピンホール効果によりスピン流を発生させそのスピン流をFM層に注入することによってFM層を磁化反転させる技術(スピン軌道トルク(SOT)による磁化反転)が、不揮発性メモリ等のスピンドバイスにおいて注目されている。本研究では、エピタキシャル成長により垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体GaMnAs薄膜をInGaAs/GaAs基板上に形成し、GaMnAs薄膜に電流を流すことによりきわめて高効率(低電流)の磁化反転に成功した。これは単一の磁性層でありながらGaMnAs中のDresselhausスピン軌道相互作用により電流がスピン流に変換され、スピン軌道トルクが働くことによる磁化反転が起こったためである。磁化反転のために必要な電流密度 j_c は $3.43 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ であり、従来研究のSOTによる磁化反転の報告値よりも2桁小さく、低消費電力スピンドバイスの実現に向けて重要な一歩である。[Nature Communications 10, pp.2590/1-6 (2019).]
- SiベースのSpin-MOSFET作製に向けて、ソース電極/半導体チャネル接合と半導体チャネル/ドレイン電極接合における高効率なスピン偏極電子を注入し検出するための設計と作製および評価技術の確立をめざした研究を行った。接合構造は強磁性体(Fe)/マグネシウム(Mg)/トンネル障壁層/半導体(Si)基板であり、トンネル障壁層は SiO_xN_y と MgO/SiO_x の2種類とした。その結果、(1) Si-CMOS技術と整合性の良いアモルファス SiO_xN_y 障壁層はスピン注入に有望な材料であること、(2) SiO_x を MgO とSiの間に挿入することによりトンネル障壁/Si界面準位密度を低減することが高効率なスピン注入に有効であること、を初めて定量的に明らかにした。[Appl. Phys. Lett. 112, pp.182404/1-4 (2018); Phys. Rev. Materials 3, pp.024411/1-9 (2019).]
- 室温以上の高いキュリー温度 T_c をもつ新しいn型強磁性半導体(In,Fe)Sbの作製に初めて成功し、その基本物性を明らかにした。InSbに高濃度のFe(16%)を添加した(InFe)Sb薄膜は、閃亜鉛鉱型結晶構造を保ち、強磁性を示して T_c が335 Kに達し、前年までに本研究で作製した(GaFe)Sbよりも少ないFe濃度で室温強磁性を実現した。従来のMn系強磁性半導体の研究で標準理論とされてきたMean-field Zenerモデルによると、1) n型強磁性半導体においてはs-d交換相互作用が弱いため T_c を1 K以上にはできない、2) p型強磁性半導体において高い T_c を得るためには禁制帯幅が大きいワイドギャップ半導体を使う必要がある、と考えられてきた。これに対して本研究では、Fe添加強磁性半導体の T_c がMean-field Zenerモデルの理論予測と異なる対照的な結果を示す。すなわち、鉄系強磁性半導体では、n型強磁性半導体が実現できただけでなく、その T_c は半導体の禁制帯幅が小さくなればなるほど高くなる傾向があることを示した(本研究で実現した室温強磁性半導体n型(InFe)Sbとp型(GaFe)Sbはこの傾向を示す)。このことは強磁性半導体において長く信じられてきたMean-field Zener標準モデルとは異なる新しい設計モデルの必要性を意味する。[Appl. Phys. Exp. 11, pp.063005/1-4 (2019).]
- スピントロニクスおよび物性物理分野では、不揮発性メモリなどスピンドバイスへの応用の観点から、非磁性/強磁性の二層構造における磁気抵抗効果が注目を集めている。本研究では、InAs量子井戸/室温強磁性半導体GaFeSbの二層から成る半導体ヘテロ構造を実現し、ゲート電極を有する電界効果トランジスタ型のデバイスを作製した。われわれはこの系で従来の二層構造における磁気抵抗効果に比べて100倍以上大きい抵抗変化をもち、かつゲート電界により変調可能な新しい磁気抵抗効果: Proximity Magneto-Resistance (PMR, 近接磁気抵抗効果)を発見した。このPMRの振舞いはmodified Khosla and Fischer modelでほぼ説明できることが分かった。さらに、ゲート電圧を印加しInAs量子井戸中の電子の波動関数の位置を制御ことにより界面の磁気散乱を変調することにも成功しており、スピントロニクスにおける波動関数エンジニアリングという観点からも意義深い結果である。また、磁気抵抗とトランジスタ動作の両方を示す新規デバイスという点でも有望である。[Nature Physics, in press.]

3. 研究の結論、今後の課題

(1) III-V 族系スピン機能ヘテロ構造材料の開発： 1) GaMnAs 超薄膜・量子井戸を含む共鳴トンネル素子を作製し、本研究チームが開発した強磁性半導体の共鳴トンネル分光法を用いてその電子状態と磁気異方性を調べた。2) 強磁性半導体の量子井戸薄膜の膜厚を変えて正孔の量子閉じ込め効果の強さを変えることにより、バイアス電圧によって磁化の向きやすい方向（磁化容易軸、磁気異方性）を人工的に制御できる新たな可能性を示した。これは将来のスピン트로ニクスを用いたデバイスにおいて、低い消費電力で磁化を制御できる新方式の実現につながる成果である。

(2) IV 族系スピン機能ヘテロ構造材料の開発とデバイス応用： 強磁性金属/絶縁膜/Si からなるトンネル接合において、スピン注入と検出、輸送の理論を確立し、強磁性金属/絶縁膜の界面に形成される dead layer の抑制が重要であることを実験により実証した。薄い Mg 層を挿入した Fe/Mg/MgO/Si 接合においてスピン輸送効率の向上を示した。

(3) 狭ギャップ半導体スピン機能ヘテロ構造材料の開発とデバイス応用： 1) n 型強磁性半導体 (In, Fe)Sb を作製し、この材料ではキュリー温度 T_C が 335 K に達し、室温での異常ホール効果が大きく現在最も感度の良い InSb の正常ホール効果によるセンサーよりも感度が良いセンサーデバイスが作製可能であることを示した。2) n 型強磁性半導体 (In, Fe)Sb をチャネルとする電界効果トランジスタ (FET) を作製し、ゲート電界によって電子濃度を変調し、電気的手法で T_C を変調できることを示した。これにより、真性の電子誘起強磁性半導体であることを示した。ただし、電子濃度に依存しない強磁性秩序の寄与もあり、これが近接 Fe 原子間の強磁性的超交換相互作用である可能性を示した。

(4) III-V 族系スピン機能ヘテロ構造材料の開発： 1) GaMnAs/GaAs/GaMnAs からなる縦型スピン MOSFET 構造を作製し、サイドゲートからのゲート電圧 V_{GS} によるソース・ドレイン電流 I_{DS} の変調と強磁性 GaMnAs の磁化（平行/反平行）による大きな I_{DS} の変調を実現した。2) GaMnAs にテラヘルツハルス光を照射し、1ps 以下の高速で磁化が変調できることを示した。

(5) IV 族系スピン機能ヘテロ構造材料の開発とデバイス応用： 1) Fe/Mg/SiO_xNy/Si からなるトンネル接合を作製し、薄い Mg 層の挿入が dead layer を抑制すること、シリコン CMOS 技術と整合性の良いアモルファス SiO_xNy 層の挿入が Si への高効率スピン注入・検出にとって有望であることを示した。2) Fe/Mg/MgO/SiO_x/n+Si (001) 接合を形成し、界面でスピン散乱がほとんどない理想的なスピン注入効率を実現した。

(6) 狭ギャップ半導体スピン機能ヘテロ構造材料の開発とデバイス応用： 1) n 型強磁性半導体 (In, Fe)Sb を作製し、この材料ではキュリー温度 T_C が 335 K に達するを示した。さらに、これまでの実験結果をもとに、高い T_C をもつ Fe 系強磁性半導体の統一的な設計指針を示した。2) 室温で強磁性を示す p(Ga, Fe)Sb のバンド構造を MCD スペクトルにより調べ、禁制帯中に不純物バンド (IB) が存在しフェルミ準位 E_F が IB 中にあることを示した。3) (Ga, Fe)Sb の室温強磁性共鳴を観測し、歪みによる磁気異方性の変化を定量的に明らかにした。

(7) Co/Fe/GaO_x/MgO/Fe からなる縦型スピン MOSFET 構造を作製し、サイドゲート電圧および磁化による電流の変調を示すことにより、室温におけるスピン MOSFET の動作を実証した。

電子のもつスピン自由度を積極的に用いることにより、新しいエレクトロニクス材料やデバイスの体系をつくらうとするスピン트로ニクスの研究が世界的に盛んに行われており重要性を増している。半導体デバイスの微細化による性能の向上に限界も見えはじめ、新しい材料や新しい原理のデバイスを探る研究が必要になってきている。これまでの半導体エレクトロニクスでは電子のもつ電荷とその輸送を主に用いてきたが、今後は電子がもつもう一つの属性であるスピンも積極的に用いるという新しい方向の研究がますます重要になってくるであろう。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

スピン自由度を用いた新しい材料、物性、デバイスに関する研究分野は、「スピントロニクス」と呼ばれ世界的に盛んになりつつあるが、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のか?という極めて重要な点については、本研究代表者らのグループが2004年ごろから一連のスピントロニクス・デバイスに関する研究を発表するまで具体的に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グループによる材料物性・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、スピン機能材料とデバイス工学の学術および技術体系を構築しつつある。その波及効果は広範囲にわたり、超高密度・高速の不揮発性メモリ、再構成可能な論理回路、作製した後で再設計可能な”やわらかいハードウェア”をもつリコンフィギャラブル・コンピューティングなど、情報の記録や情報処理技術においても革新的な半導体デバイスや集積回路が実現でき、低迷している日本の半導体産業に再生の契機を与える可能性がある。

4. 2. 学術的価値

従来の非磁性半導体のみでは不可能であり、スピン機能と半導体機能を融合した材料の基礎研究と開発(形成技術、評価、物性制御の研究)が不可欠である。本研究では、上記デバイスの構成要素として、III-V族化合物半導体に磁性元素(Mn)を添加したIII-V族磁性半導体とそのヘテロ構造、IV族半導体(Si, Ge, SiGe)に磁性元素(Mn, Fe)を添加したIV族磁性半導体とそのヘテロ構造、強磁性金属(MnAs, Fe_xSiなど)と半導体から成る複合ヘテロ構造やグラニューラー構造を作製し、その評価、物性制御、スピン依存伝導現象の研究を行い、半導体と磁性体の材料科学とデバイス工学の融合に貢献している。特に、室温を超える高いキュリー温度をもつ強磁性半導体の創成、新しい強磁性ヘテロ構造とその新機能の実証、スピントランジスタの作製とその原理動作の実証など、学術および工学的に新しい知見をもたらすものである。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

1) 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

* Featured Article in Applied Physics Letters.

2) Tomoaki Ishii, Tadashi Kawazoe, Yusuke Hashimoto, Hiroshi Terada, Iriya Muneta, Motoichi Ohtsu, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya

"Electronic structure near the Fermi level in the ferromagnetic semiconductor GaMnAs studied by ultrafast time-resolved light-induced reflectivity measurements"

Phys. Rev. B 93, pp.241303(R)/1-4 (2016).

DOI: 10.1103/PhysRevB.00.001300

3) 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 7, pp.12013/1-7 (2016).

Doi: 10.1038/ncomms12013

<http://www.nature.com/ncomms/2016/160628/ncomms12013/full/ncomms12013.html>

4) Masaki Kobayashi, Shinobu Ohya, Iriya Muneta, Yukiharu Takeda, Yoshihisa Harada, Juraj Krempaský, Thorsten Schmitt, Masaharu Oshima, Vladimir N. Strocov, Masaaki Tanaka, and Atsushi Fujimori

"Alternative interpretation of the recent experimental results of angle-resolved photoemission spectroscopy on GaMnAs [Sci. Rep. 6, 27266 (2016)]"

arXiv 1608.07718 (Submitted on 27 Aug 2016)

<http://arxiv.org/abs/1608.07718>

5) Toshiki Kanaki, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka

"Spin-dependent transport and current modulation in a current-in-plane spin-valve field effect transistor"

Appl. Phys. Lett. 109, pp.152403/1-4 (2016).

Doi: 10.1063/1.4964419

6) Yuki Wakabayashi, Kohei Okamoto, Yoshisuke Ban, Shoichi Sato, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Tunneling magnetoresistance in trilayer structures composed of group-IV ferromagnetic semiconductor Ge_{1-x}Fe_x, MgO, and Fe"

Appl. Phys. Express 9, pp.123001/1-4 (2016).

<http://doi.org/10.7567/APEX.9.123001>

selected as "Spotlights". <http://iopscience.iop.org/journal/1882-0786/page/Spotlights>

selected as "Highlights" of 2016. http://iopscience.iop.org/journal/1882-0786/page/APEX_Highlights_2016

arXiv:1607.08298

<http://arxiv.org/abs/1607.08298>

7) Duong Dinh Hiep, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai,

"Spin transport in nanoscale Si-based spin-valve devices"

Appl. Phys. Lett. 109, 232402 (2016).

Doi: 10.1063/1.4971351

8) Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka,

"Observation of spontaneous spin-splitting in the band structure of an n-type zinc-blende ferromagnetic semiconductor"

Nature Communications 7, 13810/1-8 (2016).

DOI: 10.1038/ncomms13810

9) Yuki K. Wakabayashi, Ryota Akiyama, Yukiharu Takeda, Masafumi Horio, Goro Shibata, Shoya Sakamoto, Yoshisuke Ban, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya,

"Origin of the large positive magnetoresistance in Ge_{1-x}Mn_x granular thin films"

Phys. Rev. B.95, pp.014417/1-6 (2017).

DOI: 10.1103/PhysRevB.95.014417

10) S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori

"Origin of robust nanoscale ferromagnetism in Fe-doped Ge revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculation"

Phys. Rev. B.95, pp.075203/1-5 (2017).

DOI: 10.1103/PhysRevB.95.075203

11) Iriya Muneta, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka

"Artificial control of the bias-voltage dependence of tunnelling-anisotropic magnetoresistance using quantization in a single-crystal ferromagnet"

Nature Communications 8, 15387/1-8 (2017).

DOI: 10.1038/ncomms15387

<https://www.nature.com/articles/ncomms15387>

12) Tatsuya Matou, Kento Takeshima, Le Anh, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Reduction of the magnetic dead layer and observation of tunneling magnetoresistance in La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃-based heterostructures with a LaMnO₃ layer,"

Appl. Phys. Lett. 110, pp.212406/1-4 (2017).

Doi: 10.1063/1.4984297

13) Hiroshi Terada, Shinobu Ohya, Le Duc Anh, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka,

"Magnetic anisotropy control by applying an electric field to the side surface of ferromagnetic films"

Scientific Reports 7, pp.5618/1-7 (2017).

DOI: 10.1038/s41598-017-05799-8

14) Le Duc Anh, Noboru Okamoto, Munetoshi Seki, Hiroshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya,

"Hidden peculiar magnetic anisotropy at the interface in a ferromagnetic perovskite-oxide heterostructure",

Scientific Reports 7, pp.8715/1-7 (2017).

DOI:10.1038/s41598-017-09125-0

- 15) Yuki K. Wakabayashi, Yosuke Nonaka, Yukiharu Takeda, Shoya Sakamoto, Keisuke Ikeda, Zhendong Chi, Goro Shibata, Arata Tanaka, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Masaaki Tanaka, Atsushi Fujimori, Ryosho Nakane
 "Electronic structure and magnetic properties of magnetically dead layers in epitaxial CoFe₂O₄/Al₂O₃/Si(111) films studied by X-ray magnetic circular dichroism"
 Phys. Rev. B 96, pp.104410/1-11 (2017).
 DOI: 10.1103/PhysRevB.96.104410
- 16) Shinobu Ohya, Akiyori Yamamoto, Tomonari Yamaguchi, Ryo Ishikawa, Ryota Akiyama, Le Duc Anh, Shobhit Goel, Yuki K. Wakabayashi, Shinji Kuroda, and Masaaki Tanaka
 "Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping"
 Phys. Rev. B 96, pp.094424/1-5 (2017).
 DOI: 10.1103/PhysRevB.96.094424
- 17) Kosuke Takiguchi, Yuki K. Wakabayashi, Kohei Okamoto, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
 "Fe concentration dependence of tunneling magnetoresistance in magnetic tunnel junctions using group-IV ferromagnetic semiconductor GeFe"
 AIP Advances 7, pp.105202/1-7 (2017).
 Doi: 10.1063/1.5006926
- 18) Duong Dinh Hiep, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai
 "Inverse spin-valve effect in nanoscale Si-based spin-valve devices"
 J. Appl. Phys. 122, pp.223904/1-7 (2017).
 DOI: 10.1063/1.4994881
- 19) Shoichi Sato, Ryosho Nakane, Takato Hada, and Masaaki Tanaka
 "Spin injection into Si in three-terminal vertical and four-terminal lateral devices with Fe/Mg/MgO/Si tunnel junctions having an ultrathin Mg insertion layer"
 Phys. Rev. B 96, pp.235204/1-10 (2017).
 DOI: 10.1103/PhysRevB.96.235204
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.235204>
- 20) Hirokatsu Asahara, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
 "Large spin-valve effect in a ferromagnetic-semiconductor GaMnAs-based lateral spin-valve device"
 Appl. Phys. Express 11 pp.033003/1-4 (2018).
 Doi: 10.7567/APEX.11.033003
<https://doi.org/10.7567/APEX.11.033003>
- 21) Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka
 "Electrical tuning of the band alignment and magnetoconductance in an n type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As-based spin-Esaki diode"
 Appl. Phys. Lett. 112, pp.102402/1-4 (2018).
 Doi: 10.1063/1.5010020
<https://doi.org/10.1063/1.5010020>
 * Featured Article in Applied Physics Letters.
- 22) Hiroshi Terada, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
 "Intrinsic transmission magnetic circular dichroism spectra of GaMnAs"
 AIP Advances 8, pp.035009/1-7 (2018).
 Doi: 10.1063/1.5020725
- 23) Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka
 "Electrical control of ferromagnetism in the n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb with high Curie temperature"
 Appl. Phys. Lett. 112, pp.122409/1-5 (2018).
 Doi:10.1063/1.5022828
<https://doi.org/10.1063/1.5022828>
- 24) Ryota Suzuki, Yuki K. Wakabayashi, Kohei Okamoto, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya

"Quantum size effect in a Fe quantum well detected by resonant tunneling carriers injected from a p-type Ge semiconductor electrode"

Appl. Phys. Lett. 112, pp.152402/1-5 (2018).

DOI: 10.1063/1.5020355

<https://doi.org/10.1063/1.5020355>

25) Taketomo Nakamura, Le Duc Anh, Yoshiaki Hashimoto, Yu Iwasaki, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, and Shingo Katsumoto

"Proximity-Induced Superconductivity in a Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As"

IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 969, pp.012036/1-5 (2018).

Doi :10.1088/1742-6596/969/1/012036

26) Tomoaki Ishii, Hiromichi Yamakawa, Toshiki Kanaki, Tatsuya Miyamoto, Noriaki Kida, Hiroshi Okamoto, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya,

"Ultrafast magnetization modulation induced by the electric field component of a terahertz pulse in a ferromagnetic-semiconductor thin film"

Scientific Reports 8, 6901/1-6 (2018).

DOI:10.1038/s41598-018-25266-2

<https://www.nature.com/articles/s41598-018-25266-2>

27) Ryosho Nakane, Takato Hada, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka,

"Spin transport and spin accumulation signals in Si studied in tunnel junctions with a Fe/Mg ferromagnetic multilayer and an amorphous SiO_xNy tunnel barrier"

Appl. Phys. Lett. 112, pp.182404/1-4 (2018).

Doi: 10.1063/1.5004494

28) Cong Tinh Bui, Christina A. C. Garcia, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai

"Planar Nernst Effect and Mott Relation in (In,Fe)Sb Ferromagnetic Semiconductor"

J. Appl. Phys. 123, pp.175102/1-7 (2018).

Doi: 10.1063/1.5026452

* Editors Pick and Featured Article in Journal of Applied Physics.

29) Toshiki Kanaki, Hiroki Yamasaki, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka

"Large current modulation and tunneling magnetoresistance change by a side-gate electric field in a GaMnAs-based vertical spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor"

Scientific Reports 8, pp.7195/1-7 (2018).

DOI:10.1038/s41598-018-24958-z

30) Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka

"High-temperature ferromagnetism in a new n-type Fe-doped ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb"

Applied Physics Express 11, pp.063005/1-4 (2018).

Doi: 10.7567/APEX.11.063005

arXiv: 1706.00735

<http://arxiv.org/abs/1706.00735>

31) Toshiki Kanaki, Hiroki Yamasaki, Hiroshi Terada, Yoshihiro Iwasa, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka

"Improved performance of a GaMnAs-based vertical spin electric double-layer transistor"

Jpn. J. Appl. Phys. (Rapid Communications) 57, pp.090301/1-5 (2018).

Doi: 10.7567/JJAP.57.090301

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.57.090301/meta>

32) Yoshisuke Ban, Yuki K. Wakabayashi, Ryosho Nakane, and Masaaki Tanaka

"Impurity band conduction in group-IV ferromagnetic semiconductor GeFe with nanoscale fluctuation in Fe concentration"

J. Appl. Phys. 124, pp.113902/1-11 (2018).

DOI: 10.1063/1.5022543

<https://doi.org/10.1063/1.5022543>

arXiv:1706.04445

<https://arxiv.org/abs/1706.04445>

33) Yuki K. Wakabayashi, Yosuke Nonaka, Yukiharu Takeda, Shoya Sakamoto, Keisuke Ikeda, Zhendong Chi, Goro

- Shibata, Arata Tanaka, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Masaaki Tanaka, Atsushi Fujimori, and Ryosho Nakane
 "Cation distribution and magnetic properties in ultrathin $(\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0 - 1$) layers on Si(111) studied by soft X-ray magnetic circular dichroism"
 Phys. Rev. Materials 2, pp.104416/1-12 (2018).
 DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.104416
- 34) Shobhit Goel, Le Duc Anh, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
 "Ferromagnetic resonance and control of magnetic anisotropy by epitaxial strain in ferromagnetic semiconductor $(\text{Ga}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{Sb}$ at room temperature"
 Phys. Rev. B99, pp.014431/1-7 (2019).
 DOI: 10.1103/PhysRevB.99.014431
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.014431>
- 35) Toshiki Kanaki, Shin Matsumoto, Sai Krishna Narayananellore, Hidekazu Saito, Yoshihiro Iwasa, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
 "Room-temperature operation of a vertical spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor-type device using an oxide semiconductor"
 Appl. Phys. Express 12, pp.23009/1-4 (2019).
 DOI:10.7567/1882-0786/aafed6
- 36) Kento Nishijima, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai
 "Fe delta-doped $(\text{In,Fe})\text{Sb}$ ferromagnetic semiconductor thin films for magnetic-field sensors with ultrahigh Hall sensitivity"
 J. Crystal Growth 511, pp.127–131 (2019).
 DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.01.030
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.01.030>
- 37) Tomoaki Ishii, Hiromichi Yamakawa, Toshiki Kanaki, Tatsuya Miyamoto, Noriaki Kida, Hiroshi Okamoto, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
 "Large terahertz magnetization response in ferromagnetic nanoparticles"
 Appl. Phys. Lett. 114, pp.062402/1-4 (2019).
 Doi: 10.1063/1.5088227
<https://doi.org/10.1063/1.5088227>
 * Featured Article in Applied Physics Letters.
- 38) Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Shobhit Goel, and Masaaki Tanaka
 "Magneto-optical spectra and the presence of an impurity band in p-type ferromagnetic semiconductor $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ with high Curie temperature"
 APL Materials 7, pp.021105/1-6 (2019).
 DOI: 10.1063/1.5083175
<https://doi.org/10.1063/1.5083175>
- 39) Ryosho Nakane, Mitsuki Ichihara, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka,
 "Nearly ideal spin tunneling efficiency in $\text{Fe}/\text{Mg}/\text{MgO}/\text{SiO}_x/\text{n}^+-\text{Si}(001)$ junctions"
 Phys. Rev. Materials 3, pp.024411/1-9 (2019).
 DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.3.024411
<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.024411>
- 40) Taketomo Nakamura, Le Duc Anh, Yoshiaki Hashimoto, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, and Shingo Katsumoto
 "Spin triplet superconductive proximity effect in a ferromagnetic semiconductor"
 Phys. Rev. Lett. 122, pp.107001/1-6 (2019).
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.107001
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.107001>
- 41) Shoichi Sato, Mitsuki Ichihara, Masaaki Tanaka, and Ryosho Nakane
 "Electron spin and momentum lifetimes in two-dimensional Si accumulation channels: Demonstration of Schottky-barrier spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors at room temperature"
 Phys. Rev. B 99, pp.165301/1-9 (2019).
 DOI: 10.1103/PhysRevB.99.165301
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.99.165301>

- 42) Hiep Duong Dinh, Masaaki Tanaka, and Hai Nam Pham,
"Lateral silicon spin-valve devices with large spin-dependent magnetoresistance and output voltage"
Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology 10, pp.025001/1-8 (2019).
Doi: 10.1088/2043-6254/ab11df
- 43) Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Toshiaki Kanaki, Hiroki Yamasaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka,
"Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet",
Nature Communications 10, pp.2590/1-6 (2019).
DOI: 10.1038/s41467-019-10553-x
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-10553-x>
- 44) Shingo Kaneta, Le Duc Anh, Karumuri Sriharsha, and Masaaki Tanaka
"Observation of quantum size effect at the conduction band bottom of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As thin films"
Applied Physics Express 12, pp.073001/1-4 (2019).
Doi: 10.7567/1882-0786/ab25c8
- 45) Shoya Sakamoto, Nguyen Thanh Tu, Yukiharu Takeda, Shin-ichi Fujimori, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Yuki K. Wakabayashi, Goro Shibata, Masafumi Horio, Keisuke Ikeda, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Masaaki Tanaka, Atsushi Fujimori
"Electronic structure of the novel high-TC ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb: X-ray magnetic circular dichroism and resonance photoemission spectroscopy studies"
Phys. Rev. B., in press.
arXiv:1811.07467
- 46) Kosuke Takiguchi, Le Duc Anh, Takahiro Chiba, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba, Masaaki Tanaka
"Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic/nonmagnetic bilayers"
Nature Physics, in press.