

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間	：2020年度～2024年度
課題番号	：20H05650
研究課題名	：強磁性半導体ルネサンスによる新しいスピン機能材料とデバイスの創出
研究代表者氏名（ローマ字）	：田中 雅明（TANAKA Masaaki）
所属研究機関・部局・職	：東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号	：30192636

研究の概要：

磁性体と半導体の特長を融合できる新物質として最も有望な物質である強磁性半導体（Ferromagnetic Semiconductor; FMS）の材料系と物性機能を大幅に拡張し、従来の FMS の主な問題点をすべて解決する：1) p 型と n 型の両方を実現、2) キュリー温度を室温より上げ物性と機能を制御、3) 強磁性発現機構に関する統一的理解を得る。さらに、4) 低消費電力で動作しかつ革新的な機能デバイスの実現を目指す。

研究分野： 電気電子材料工学、電子デバイス、スピンドバイス、量子デバイス

キーワード： 強磁性半導体、スピン、ヘテロ構造、バンド構造、デバイス、スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

磁性体と半導体の特長を融合できる新物質として強磁性半導体（Ferromagnetic Semiconductor; FMS）は最も有望な材料系である。強磁性半導体は、非磁性半導体の一部の原子を磁性原子で置換した半導体であり、既存の半導体結晶成長技術やデバイス技術と高い親和性を持つ、電界や光による磁気特性の変調など、従来の半導体や強磁性金属では得られない機能を有する。本研究者らのこれまでの精力的な研究により、強磁性半導体を用いれば磁性金属や酸化物においては作製することが難しい原子レベルで急峻な高品質の接合界面を実現することができ、量子ヘテロ構造やナノ構造を作製できるようになった。電子の電荷とスピンを両方活用できる強磁性半導体材料を用いた半導体ベースの超高速不揮発性メモリや再構成可能な論理回路、柔軟な情報処理など、新しい機能をもつデバイスの創製が期待できる。しかし、最も良く研究されている(Ga,Mn)Asをはじめ、従来から主流であった Mn を添加した強磁性半導体には大きな問題点があった：1) p 型強磁性半導体しかできない（n 型ができない）、2) 強磁性転移温度（キュリー温度  $T_C$ ）が低く室温では強磁性にならない、3) 強磁性発現機構に関する統一的な理解がない。これらの欠点は強磁性半導体の材料機能設計とデバイス応用を行う上で大きな障害である。これらの問題点を解決し新機能材料を作製できるか？ その上で、強磁性半導体の特長を生かして低消費電力で動作しかつ革新的な機能をもつデバイスを実現できるか？ が本研究における核心的課題である。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの強磁性半導体の問題点をすべて解決する：すなわち、1) p 型と n 型の強磁性半導体を両方実現、2) キュリー温度  $T_C$  を室温より上げ、室温で強磁性を示す半導体を実現し、物性機能を最適化、高度化、3) 強磁性の起源に関する統一的な理解と物質設計指針の確立、さらに 4) 不揮発性と柔軟な情報処理機能を持つスピントランジスタ、スピン依存バンド構造を用いた量子効果デバイス、トポロジカル状態を用いた機能デバイスなど、低消費電力で動作しかつ革新的な高機能デバイスの実現、を目的とする。強磁性半導体を中心とする材料開発（“強磁性半導体のルネサンス”を起こすこと）によって、将来のニューロモルフィック・コンピューティング(NC)、モノのインターネット化(IoT)、人工知能(AI)に適したデバイスの基盤技術を創る。

3. 研究の方法

具体的には以下の研究を行う。（ ）内は役割分担を示す。

- (1) 分子線エピタキシー（MBE）法による鉄(Fe)系および Mn 系強磁性半導体薄膜の作製
- (2) 強磁性半導体(FMS)超薄膜とヘテロ構造における量子化の検出と制御
- (3) Fe 系および Mn 系 FMS 量子ヘテロ構造の量子化、低次元化による巨大スピン物性（巨大磁気抵抗効果など）の創出と制御（(1)～(3)は田中、大矢、ファム、アイン）
- (4) FMS 量子井戸構造をもつ FET における波動関数制御を用いた磁化制御技術実証（アイン、田中）
- (5) 上記実験とともに、理論的な理解を目指した物質設計とデバイス設計（吉田、田中）
- (6) FMS ヘテロ構造を用いた超低消費電力スピントランジスタの作製と実証（全員）

4. これまでの成果

上記 1. 研究の目的、2. 研究の方法で述べた問題点に対して、新しい Fe 添加強磁性半導体：n 型(In,Fe)As、

n型(In,Fe)Sb、p型(Ga,Fe)Sb(いずれも  $T_c > 300$  K) とそのヘテロ構造のエピタキシャル成長に成功し、上記の問題点 1)~3)を解決した。これにより、もう1つの目標である 4) 不揮発性と柔軟な情報処理機能を持つスピントランジスタ、スピン依存バンド構造を用いた量子効果デバイス、トポロジカル状態を用いた機能デバイスなど、低消費電力で動作しかつ革新的な高機能デバイスの実現、に大きく近づいた。これまでの研究で、半導体と強磁性体の機能を融合させる最も有望な材料である強磁性半導体のデバイス応用、室温動作への実現に見通しが得られた。このような強磁性半導体材料とヘテロ構造を作製できるのは、世界でも本研究グループのみであり、学術的価値は極めて高い。さらに、以下のより発展的な成果を得た(代表的な研究成果を挙げる)。

- n型(In,Fe)Sb と p型(Ga,Fe)Sb の四元混晶半導体(In,Ga,Fe)Sb の分子線エピタキシー(MBE)成長に成功し、同じ材料でn型とp型をつくり分けられること、格子定数、禁制帯幅などを連続的に制御できることを示した。AIP Advances **12**, pp.015307/1-6 (2022).
- n型(In,Fe)Sb と p型(Ga,Fe)Sb から成る全強磁性半導体pn接合の作製に成功し、スピン依存バンド構造から、その電子輸送特性を解明した。作製条件と構造パラメータによっては 500%を超える大きな磁気抵抗効果を観測した。J. Appl. Phys. **131**, pp.013902/1-14 (2022).
- InAs 半導体結晶中に鉄(Fe)原子をほぼ 1 原子層の平面内に配列した FeAs-InAs 単結晶超格子構造の作製に世界で初めて成功し、 $5 \mu_B/\text{Fe}$  の大きな磁気モーメント、500%以上の巨大磁気抵抗効果とそのゲート電界による制御など、様々な新しい物性機能を明らかにした。Nature Communications **12**, pp.4201/1-10 (2021).
- MBE 法を用いて、III-V 族半導体 InSb 基板(001)上にダイヤモンド型結晶構造をもつ  $\alpha$ -Sn 薄膜(膜厚:21~56 原子層)を成長させることに成功、 $\alpha$ -Sn がトポロジカル・ディラック半金属であること、膜厚を薄くすると2次元トポロジカル絶縁体および通常の絶縁体になるなど、多様なトポロジカル相を持つことを示した。 $\alpha$ -Sn 薄膜は、トポロジカル物性機能の開拓と将来の量子情報デバイスのための新しいプラットフォームとして大きく期待される。Advanced Materials **33**, pp.2104645/1-9 (2021). **Selected as Frontispiece Article.** <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202170404>
- 垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 垂直磁化薄膜を 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の磁化反転に成功した。磁化反転のために必要な電流密度  $J_c$  は  $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  であり、この値は従来のスピン軌道トルク(SOT)磁化反転の報告値より約 3 桁も小さい。Nature Electronics **3**, pp.751-756 (2020).

## 5. 今後の計画

Fe 系強磁性半導体ではn型もp型も実現できるようになったので、Mn 系強磁性半導体も合わせて用いることにより、半導体スピン機能デバイスとして、スピンドायオード、スピンバイポーラトランジスタ、スピン電界効果トランジスタなどを作製し、動作実証を行う。これらを用いた超低消費電力、高密度、高速の不揮発性メモリ、超低消費電力のノーマリオフ論理回路や再構成可能な論理回路などの新しい情報システムの基盤技術を創る。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

代表的な発表論文 5 編を挙げる。

- (1) Nguyen Thanh Tu, Tomohiro Otsuka, Yuto Arakawa, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, "Spin transport in fully ferromagnetic p-n junctions", J. Appl. Phys. **131**, pp.013902/1-14 (2022). Doi: 10.1063/5.0072128
- (2) Le Duc Anh, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, "Elemental topological Dirac semimetal  $\alpha$ -Sn with high quantum mobility", Advanced Materials **33**, pp.2104645/1-9 (2021). Doi: 10.1002/adma.202104645 **Selected as Frontispiece Article.**
- (3) Le Duc Anh, Taiki Hayakawa, Yuji Nakagawa, Hikari Shinya, Tetsuya Fukushima, Hiroshi Katayama-Yoshida, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka, "Ferromagnetism and giant magnetoresistance in zinc-blende FeAs monolayers embedded in semiconductor structures", Nature Communications **12**, pp.4201/1-10 (2021). Doi:10.1038/s41467-021-24190-w
- (4) Masaaki Tanaka (invited review paper), "Recent Progress in Ferromagnetic Semiconductors and Spintronics Devices", Jpn. J. Appl. Phys. **60**, pp.010101/1-15 (2021). Doi: 10.35848/1347-4065/abcade
- (5) Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Suppression of the field-like torque for efficient magnetization switching in a spin-orbit ferromagnet", Nature Electronics **3**, pp.751-756 (2020). Doi: 10.1038/s41928-020-00500-w

本研究開始以来 1 年半の間に、以上を含む研究成果を Nature Communications、Nature Electronics、Advanced Materials 誌を含む査読付き学術論文誌 23 編、国際会議 35 件で発表し、招待講演 18 件(国際会議 5 件、国内会議 13 件)を行い、受賞・表彰 14 件を受けた。このように本研究は内外で高く評価された。

## 7. ホームページ等

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