

量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出  
2017年度採択研究代表者

2021年度  
年次報告書

田中 雅明

東京大学 大学院工学系研究科  
教授

強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と  
不揮発・低消費電力スピンドバイスへの応用

## § 1. 研究成果の概要

2021年度の主な成果の概要を述べる。

■ 低温分子線エピタキシー法を用いて InAs 半導体単結晶中に Fe-As 正四面体結合を 1 原子層の厚さに閉じ込める添加方法を実現、単結晶 FeAs/InAs 超格子構造の作製に成功した。超格子構造全体が強磁性秩序を持ち、Fe 原子の磁気モーメントが最大に近い  $5 \mu\text{B}$  ( $\mu\text{B}$ :ボーア磁子)であること、500%の巨大な磁気抵抗効果、さらに、電界効果トランジスタを作製し、ゲート電界の印加によって巨大磁気抵抗効果を変調できることを示した。本構造は新規機能材料としてスピン自由度を用いた電子デバイスに応用できる可能性がある。[*Nature Commun.* **12**, 4201 (2021)].

■ シリコンベース・スピン電界効果型トランジスタ(Spin-MOSFET)を作製し、二次元反転チャネル中における室温でのスピン輸送効率を解明、実効的なスピンドリフト拡散長を増大するスピンドリフト制御手法を確立、さらに高い磁気抵抗比を実現するデバイス設計指針を明らかにした。[*Phys. Rev. B* **102**, 035305 (2020); submitted].

■ 世界最高品質の単結晶ダイヤモンド型結晶構造をもつ  $\alpha$ -Sn 薄膜を III-V 族半導体 InSb 上にエピタキシャル成長することに成功した。量子輸送測定と解析により、 $\alpha$ -Sn がトポロジカル・ディラック半金属であること、膜厚を薄くすると二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、材料物性の良い制御性、主要な半導体との整合性、環境にやさしい単元素構造から、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なる量子物質である。[*Adv. Mater.* **33**, pp.2104645/1-9 (2021)].

■ オールエピタキシャルのペロブスカイト酸化物 LaSrMnO<sub>3</sub>/ LaTiO<sub>3</sub>/ SrTiO<sub>3</sub> ヘテロ構造を作製し、スピンプンピング実験と解析により、全材料系を通して世界最大値である 193.5 nm の巨大なスピンドリフト-電流変換効率を低温で得ることに成功した。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 田中グループ

- ① 研究代表者: 田中 雅明 (東京大学工学系研究科 教授)
- ② 研究項目 以下に記載

#### 1) III-V 族系スピン機能ヘテロ構造材料・ナノ構造材料の開発とデバイス応用

(主担当: 田中 雅明)

- ・ III-V 族化合物半導体(GaAs など)に遷移金属(Mn など)を数%以上添加した強磁性半導体の高品質薄膜・量子ヘテロ構造の結晶成長 [H29~R1]
- ・ 共鳴トンネル分光法および磁気効果とその分光を用いて、価電子帯と不純物帯の量子状態を理解・制御、強磁性の起源を解明 [H29~R1]
- ・ 上記の材料科学と物性の理解を基礎に、強磁性トンネル接合やスピバルブデバイス構造を作製し、量子効果を伴うトンネル磁気抵抗効果、MR 効果の系統的实现を目指す[H29~R2]
- ・ 横型および横型スピントランジスタ (Spin-MOSFET) を作製、スピン依存伝導とトランジスタ動作を実証、性能向上 [H30~R4]

#### 2) IV 族系スピン機能ヘテロ構造・ナノ構造材料の開発とデバイス応用

IV 族半導体二次元チャネルにおける量子準位を介したスピン伝導物理の解明とスピン電界効果型トランジスタの開発

(主担当: 中根 了昌)

- ・ 強磁性ソース・ドレイン/半導体チャネル接合の設計と作製、界面評価技術の確立 [H29~R1]
- ・ 半導体(二次元)チャネル中のスピン依存伝導の制御と物理の解明 [H29~R2]
- ・ 良好なトランジスタ特性と大きなスピン依存効果を両立する IV 族半導体ベースのスピン電界効果型トランジスタの実現 [R2~R4]

#### 3) 酸化物族系スピン機能ヘテロ構造・ナノ構造材料の開発とデバイス応用

(主担当: 大矢 忍)

- ・ 三端子酸化物量子ヘテロ構造におけるスピン依存伝導現象のゲート制御技術の開拓 [H29~R4]
- ・ 酸化物量子ヘテロ構造を用いたスピントランジスタの試作 [R2~R4]
- ・ 高効率スピン流電流変換に向けたスピンプンリング実験および、3端子素子における変換効率変調 [R2~R4]

#### 4) 理論計算によるスピン機能ヘテロ構造材料・ナノ構造の物質設計とデバイス設計

(主担当: 吉田 博)

- ・ 新機能ナノ超構造スピントロニクス材料の創製法デザイン、多階層連結量子シミュレーショ

ンによる強磁性転移温度予測および結晶成長法のデザイン手法の開発とその応用 [H30～R3]

- ・ 高い強磁性転移温度をもつ新規ナノ超構造マテリアルと電場による磁気的交換相互作用制御法によるデバイスデザイン(吉田グループ) [R1～R4]

## (2) ファムグループ

- ① 主たる共同研究者: ファム ナム ハイ (東京工業大学工学院 准教授)
- ② 研究項目 以下に記載

## 5) 狭ギャップスピン機能ヘテロ構造材料・ナノ構造の開発とデバイス応用

(主担当: ファム ナム ハイ)

- ・ 分子線エピタキシー法による狭ギャップ強磁性半導体薄膜・ヘテロ構造の結晶成長 [H29～R3]
- ・ 狭ギャップ強磁性半導体量子ヘテロ構造における巨大スピン物性(巨大スピンバルブ効果等)の検出と制御 [H30～R3]
- ・ 狭ギャップ強磁性半導体量子ヘテロ構造を用いたスピントランジスタの作製と原理動作の実証 [R1～R3]
- ・ 狭ギャップ強磁性半導体量子ヘテロ構造における超低消費電力磁化制御 [R2～R4]

上記のようにグループおよびサブグループを定めているが、研究代表者、主たる共同研究者、および主担当者が密接に協力しつつ研究を行っている。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) 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
- 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
- 3) Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "Ferromagnetic Fe-doped InAs quantum dots with high Curie temperature", *Appl. Phys. Express* **14**, pp.083002/1-4 (2021). DOI: 10.35848/1882-0786/ac1182
- 4) Akira Masago, Hikari Shinya, Tetsuya Fukushima, Kazunori Sato, and Hiroshi Katayama-Yoshida, "A novel method for generating p-type wide- and ultrawide-bandgap III-nitride by doping with magnetic elements", *Appl. Phys. Express* **14**, 091007 (2021). DOI: 10.35848/1882-0786/ac197f.

- 5) 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.