

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

2020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

2020 年度の主な成果の概要を述べる。

- 次世代スピントロニクス材料として注目されている代表的強磁性半導体(Ga,Mn)As において、X 線吸収磁気円二色性(XMCD)測定を行い、選択的に各元素と各電子軌道について磁性状態を温度を変えながら観測することによって、Mn 3d 電子がどのように強磁性の性質を持ち始めるのかを明らかにした。観測された磁化過程は、磁気ポーラロンモデルで強磁性発現機構をよく説明できることを示唆している。
- 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 基板上にエピタキシャル成長により形成し、垂直磁気異方性をもつ GaMnAs 薄膜に電流を流すことによって、相対論的量子力学の効果であるスピン軌道トルクを用いてきわめて高効率の磁化反転に成功した。磁化反転の妨げとなりうるフィールドドライブトルク成分を電流によって生じる磁場により最適化できるように GaMnAs の膜厚を調整した結果、世界最小の電流密度である 4.6×10^4 A/cm² の微小な電流密度で 180° の磁化反転を実現した。本研究の成果は、低消費電力スピンドバイスの実現に向けて重要な進展をもたらすものである。
- シリコンベース・スピン電界効果型トランジスタ(Spin-MOSFET)のシリコン二次元反転チャン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。デバイス構造を改善し、*n*⁺-Si 層をソースとドレインに用い、*p* 型 Si チャンネル層を用いてエンハンスメント型とした。これらは高いトランジスタ特性と磁気抵抗比の両立を目指したデバイス構造である。このような実装に近いシリコンベース・Spin-MOSFET の作製と動作はこれまで報告されておらず本研究の成果が初めてである。

§ 2. 研究実施体制

(1) 東京大学グループ

- 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]
- ・ III-V 族強磁性半導体ヘテロ構造を用いた縦型 Spin-MOSFET を作製、その動作を実証、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) 酸化物系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

機能性酸化物強磁性量子ヘテロ構造における量子効果の開拓と、量子状態のスピンを応用した縦型スピントランジスタ

(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 [H30～R3]
- ・ 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 [H31～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)

- ・ 磁氣的機構の解明と物性予測、第一原理計算による磁氣的相互作用(交換相互作用)の計算と磁氣的機構解明と一般則を導出するためのデザイン手法の開発とその応用 [H30～R2]
- ・ 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氣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) 東京工業大学グループ

- 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 [H31～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 [H32～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】

Shoichi Sato, Masaaki Tanaka, and Ryosho Nakane

"Spin transport in Si-based spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors: Spin drift effect in the inversion channel and spin relaxation in the n⁺-Si source/drain regions"

Phys. Rev. B **102**, pp.035305/1-14 (2020).

DOI: 10.1103/PhysRevB.102.035305

Pham Nam Hai, Munehiko Yoshida, Akihide Nagamine, and Masaaki Tanaka

"Inhomogeneity-induced high temperature ferromagnetism in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As grown on vicinal GaAs substrates"

Jpn. J. Appl. Phys. **59**, pp.063002/1-8 (2020).

DOI: 10.35848/1347-4065/ab9401

Le Duc Anh, Taiki Hayakawa, Kohei Okamoto, Nguyen Thanh Tu, and Masaaki Tanaka

"Transport and magnetic properties of co-doped ferromagnetic semiconductor (In,Fe,Mn)As"

Appl. Phys. Express **13**, pp.083005/1-5 (2020).

DOI: 10.35848/1882-0786/aba4d9

Ryosho Nakane, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka,

"Enhancement of Room-Temperature Effective Spin Diffusion Length in a Si-based Spin MOSFET with an Inversion Channel"

IEEE Journal of the Electron Devices Society **8**, pp.807-812 (2020).

DOI: 10.1109/JEDS.2020.2993705

Kengo Takase, Le Duc Anh, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka

"Current-in-plane spin-valve magnetoresistance in ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb heterostructures with high Curie temperature"

Appl. Phys. Lett. **117**, pp.092402/1-5 (2020).

Doi: 10.1063/5.0015358

Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh, Yuji Shimada, Takuji Takahashi, and Masaaki Tanaka

"Growth and characterization of ferromagnetic Fe-doped GaSb quantum dots with high Curie temperature"

APL Materials **8**, pp.091107/1-7 (2020).

Doi: 10.1063/5.0017938

Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka

"Artificial suppression of the field-like term and ultra-efficient magnetisation switching in a spin-orbit ferromagnet"

Nature Electronics **3**, pp.751–756 (2020).

DOI: 10.1038/s41928-020-00500-w

Yukiharu Takeda, Shinobu Ohya, Pham Nam Hai, Masaki Kobayashi, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Masaaki Tanaka, and Atsushi Fujimori, "Direct observation of the magnetic ordering process in the ferromagnetic semiconductor Ga_{1-x}MnxAs via soft x-ray magnetic circular dichroism"

J. Appl. Phys. **128**, pp.213902/1-11 (2020).

Doi: 10.1063/5.0031605

Selected as Featured Article and Cover Article

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/abcadc

Masaki Kobayashi, Le Duc Anh, Jan Minár, Walayat Khan, Stephan Borek, Pham Nam Hai, Yoshihisa Harada, Thorsten Schmitt, Masaharu Oshima, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Vladimir N. Strocov, "Minority-Spin Impurity Band in n-Type (In,Fe)As: A Materials Perspective for Ferromagnetic Semiconductors"

Phys. Rev. B **103**, pp.115111/1-10 (2021).

DOI: 10.1103/PhysRevB.103.115111