

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

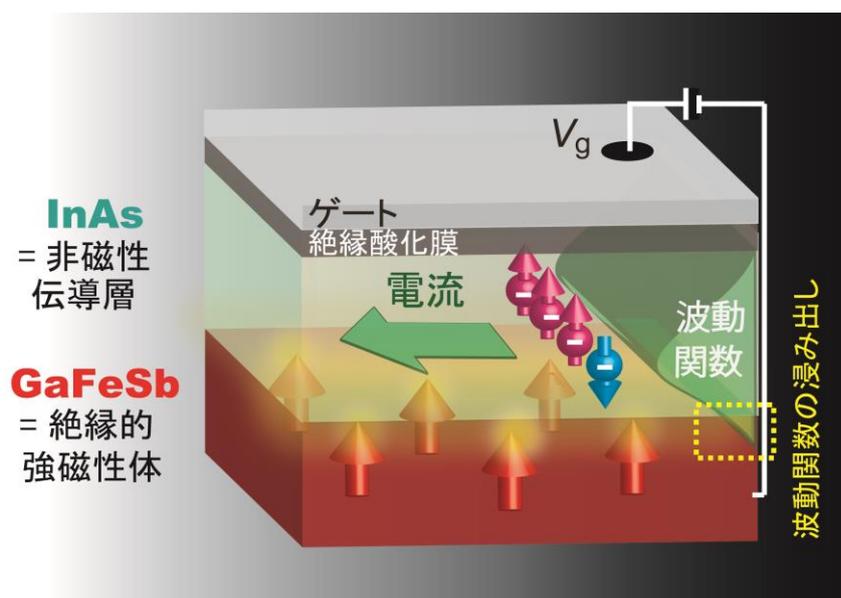
§ 1. 研究成果の概要

「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」をめざし、各計画項目について研究を行い、いずれも格段の進展と成果を得た。研究成果の概要は以下の通りである。

- 垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜に電流を流すだけで、スピン軌道相互作用によるきわめて高効率、低電流(従来より 2 桁低い電流密度 $J_c = 3.43 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$)で 180°磁化回転(反転)をすることに成功した。本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である。[Nature Communications **10**, pp.2590/1-6, 2019].
- Fe/トンネル障壁/Si からなる種々のスピントネル接合を形成し、界面の構造を系統的に探索・制御することにより、強磁性電極(Fe)から半導体(Si)へ高効率のスピン注入と検出を行う技術を確認した。また、Si 二次元電子チャネル中の運動量散乱とスピン散乱の関係を定量的に明らかにした。運動量緩和機構に依らず、運動量散乱 14000 回に 1 回の割合でスピン散乱が起こることを示した。半導体 FET チャネルにおけるスピン散乱を定量的に明らかにした研究は、本研究が初めてである。また、Si 二次元電子チャネルを有する横型 Spin MOSFET を作製し、室温動作を示した。[Phys. Rev. B **99**, pp.165301/1-9, 2019].
- p型強磁性半導体(GaFeSb)において、400 K を超える高いキュリー温度 T_c を実現し、そのバンド構造や磁気異方性を明らかにした。n型強磁性半導体(In,Fe)Sb においては、キャリア(電子)誘起強磁性であることを示し、電界効果トランジスタ構造を作製してゲート電圧で磁性を制御することに成功した。これまでの実験結果と実績を基に、Fe 添加 III-V 族強磁性半導体新しいデザインルールを創出した。[Appl. Phys. Express **12**, pp.103004/1-5, 2019].
- 変分原理による自己相互作用を取り入れた第一原理計算により、強磁性半導体 InFeAs,

InFeSb, GaFeAs, GaFeSb などスピノダル分解が進行し、ナノスケールサイズでの FeAs, FeSb が析出したときのp型およびn型ドーピングにおけるキュリー温度 T_c を計算した結果、1000 K を越える T_c の実現が可能であることを理論的に示した。[Appl. Phys. Express **12**, pp.063006/1-4, 2019].

- すべて半導体でできた非磁性半導体 (InAs) / 強磁性半導体 ((Ga_{0.8},Fe_{0.2})Sb) からなる二層ヘテロ接合を作製し、新しい電子伝導現象—大きな磁気抵抗効果—を発見した。さらに、この接合をトランジスタに加工し、外部からのゲート電圧によって InAs 薄膜中の電子状態 (波動関数) を変化させ、近接効果による磁気抵抗を大きく変調することにも成功した。[Nature Physics **15**, pp.1134-1139, 2019].
- 強磁性酸化物を用いて、15~200 mV 程度の極めて小さな電圧を印加するだけで磁化の向きが 90° 回転する現象を発見した。この現象は、電圧の印加により電子の軌道の対称性が変化することによって起こっているものと考えられる。磁化回転に必要な電流密度は 10^{-2} A/cm² 程度で、この値は最先端の磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)で用いられている典型的な電流密度 (約 10^7 A/cm²) より 9 桁程度小さな値である。[Phys. Rev. Appl. **12**, pp.041001/1-6, 2019].
- 酸化物半導体 (SrTiO₃) の表面に数原子層の鉄(Fe)の薄膜を室温で蒸着し大気にさらして酸化することにより形成した酸化鉄と酸化物半導体の界面に、高い移動度をもつ二次元正孔伝導 (p 型伝導) 層が形成されることを発見した。今まで酸化物中の正孔に対して報告されてきた値の中で最も高い移動度 (10 K において約 24,000 cm²/Vs) が得られた。鉄の膜厚をわずかに増やすだけで、p 型から n 型に変わり、伝導型を制御できることも明らかにした。[Adv. Mater. **32**, 1906003/pp.1-7 (2020)].



電流を担う電子の波動関数は、InAs 層中に存在し二次元電子となるが、量子力学的な効果により隣接する GaFeSb 層(強磁性で磁化をもつ)に一部が空間的に浸み出す(黄色い破線部分)。この電子の波動関数の GaFeSb 側への浸み出しによって、電流と磁化の結合が生じ、結果として磁場を印加したときの電流の変化、すなわち磁気抵抗効果が得られる。また、外部からのゲート電圧 V_g によって波動関数の位置を制御できるので、この結合そのものを電気的手段で制御することが可能であり、 V_g を変えると磁気抵抗効果の大きさが変調される。この結果は、磁性を持たない非磁性半導体中に、電圧を印加するという電気的手段により磁気的な性質を付与できることを示す。[Nature Physics **15**, pp.1134-1139 (2019)].

【代表的な原著論文 3編】

1. Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Toshiki 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.
2. 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 **15**, 1134-1139, 2019.
3. Le Duc Anh, Shingo Kaneta, Masashi Tokunaga, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "High-Mobility 2D Hole Gas at a SrTiO₃ Interface", Adv. Mater. **32**, 1906003/pp.1-7 (2020).

§ 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

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

(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 [H32~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

機能的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)

- ・ 分子線エピタキシー法によるペロブスカイト酸化物ヘテロ構造の高品質薄膜の成長 [H29~R1]
- ・ 酸化物量子ヘテロ構造における量子効果の検出とトンネル磁気抵抗効果の観測 [H30~R2]
- ・ 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)

- ・ 第一原理計算と多階層連結シミュレーション手法の開発 [H29~R1]
- ・ 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

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~H30]
- ・ 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(巨大スピバルブ効果等)の検出と制御 [H30~R2]
- ・ 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。