

受賞研究の紹介文

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

東京大学 大学院工学系研究科 教授 田中 雅明

微細化による高性能化(ムーアの法則)の限界が迫る中で、従来の電荷を利用した非磁性半導体のみでは将来のエレクトロニクスや情報技術の発展は不可能であり、新しい機能をもつ材料と新原理デバイスの開発が不可欠である。その中でも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)が最も有望である。本研究では、ポストムーア時代のデバイスの構成要素として期待される、非磁性半導体に磁性元素(Mn, Fe)を添加した強磁性半導体とそのヘテロ構造、強磁性金属と半導体から成る複合ヘテロ構造を作製し、その評価、物性制御、機能開発、スピン依存伝導現象などの研究を行い、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n型およびp型強磁性半導体の創成(長い研究の歴史をもつこれまでの強磁性半導体研究の問題点をほぼすべて解決、新たなデザインルールを創出)、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の成果を挙げ、学術および工学的に新しい知見をもたらしている。2016年4月以降(～2020年12月)、以上の研究成果を多くの査読付き原著論文 63 編(Nature Physics, Nature Electronics, Nature Communications, Advanced Materials, Physical Review Letters, Physical Review B, Physical Review Materials, Applied Physics Letters, Applied Physics Express などの国際論文誌)、および国際会議 136 件(うち招待講演 40 件)で発表している。

研究助成期間(2016年4月～2019年3月)に行った研究成果を基礎に、2019年度以降もより発展的な研究を行ってきた。主な研究成果を記載する。

- **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、磁気異方性を制御:** 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。また、歪み、厚さ、温度によって、(GaFeSb) 薄膜の磁気異方性が面内磁化から垂直磁化へ変化させ、制御可能であることを示した。[Phys. Rev. B **99**, pp.014431/1-7 (2019)].
- **n型強磁性半導体(InFeSb)において、385 K の高いキュリー温度 T_c を実現、電界効果により磁性を制御:** 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。さらに Fe 濃度を 35%まで高めることによって、高いキュリー温度 T_c (= 385 K)を実現し、応用上重要な垂直磁気異方性も増大できることを示した。[Appl. Phys. Express **12**, pp.103004/1-5 (2019)].
- **強磁性/非磁性半導体ヘテロ接合において新しい巨大磁気抵抗効果を発見、電界効果による変調に成功:** 非磁性半導体(InAs)/強磁性半導体((Ga_{0.8}Fe_{0.2})Sb)からなる二層の半導体へ

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、この接合を電界効果トランジスタに加工し、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)].

- **強磁性半導体(Ga,Mn)As において高効率・低電流磁化反転に成功:** 垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜を作製し電流を流すだけで、スピン軌道相互作用(スピン軌道トルク(SOT))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 $J_c = 3.4 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$)で 180° 磁化回転(反転)をすることに成功した。[*Nature Communications* **10**, pp.2590/1–6 (2019)]. さらに、SOT による磁化反転の解明を進め、field-like トルクを抑制することによりさらに低い電流密度($J_c = 4.6 \times 10^4 \text{ Acm}^{-2}$)で磁化反転を起こすことに成功した。[*Nature Electronics* **3**, pp.751–756 (2020)]. 本研究成果は低消費電力スピndeバイスの実現に向けて重要な進展である。
- **超伝導体(Nb)/強磁性半導体(InFeAs)/超伝導体(Nb)からなるジョセフソン接合を作製、強磁性半導体中にスピン三重項の超伝導電流を流すことに成功:** n型強磁性半導体 (In,Fe)As 薄膜の上に超伝導体 Nb を電極とする超伝導接合(プレーナ型ジョセフソン素子)を作製し、磁性半導体中に超伝導を導入することでスピン三重項の超伝導電流を発生させることに成功した。極低温で温度や磁場を変化させながら詳細に電気伝導特性を調べたところ、1 K 以下で抵抗がゼロとなり、近接効果による(In,Fe)As 中の超伝導と約 $1 \mu\text{m}$ におよぶ長いコヒーレンス距離を見出した。さらに、臨界電流が磁場に対して周期的に増減する干渉効果を観測した。このことは(In,Fe)As を介して Nb 間にジョセフソン効果が生じていることを示しており、磁性半導体中を流れる超伝導電流を観測した初めての成果である。本研究により、磁性、半導体、超伝導をつなぐ、新しい超伝導スピントロニクス・デバイスの開発が進展することが期待される。(東大物性研究所勝本研究室と共同研究) [*Phys. Rev. Lett.* **122**, pp.107001/1–6 (2019)].
- **横型スピバルブ構造を作製、大きな磁気抵抗効果を観測:** (Ga,Mn)As 電極/GaAs チャンネル/(Ga,Mn)As 電極から成る横型スピバルブ構造、および MnAs 電極/Si チャンネル/MnAs 電極から成る横型スピバルブ構造を作製し、強磁性電極の磁化(平行/反平行磁化)の変化による大きな抵抗変化(10 – 70%)を観測した。数百 nm 程度の GaAs および Si チャンネル中をスピン偏極キャリアが伝導をすることを示したもので、横型 Spin-MOSFET 実現に向けて重要な成果である。[*Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, pp.SGGI08/1–4 (2020); *Appl. Phys. Express* **11** pp.033003/1–4 (2018); *J. Appl. Phys.* **122**, pp.223904/1–7 (2017)].
- **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確立、室温で動作する Spin-MOSFET を作製、動作実証:** Fe/トンネル障壁/Si からなる種々のスピントンネル接合を形成し、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立した。また、Si 二次元電子チャン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。キャリアの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 チャン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 二次元電子チャンネル

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)].

- **室温で動作する Spin-MOSFET におけるスピンの輸送の解明:** 室温で動作する Spin-MOSFET において、Si (シリコン) 二次元電子チャネルのスピンの輸送と散乱現象を解明し、ソース・ドレイン間の横方向電界によって電子スピンの散乱されずに室温で $10 \mu\text{m}$ 以上も走行すること(スピンドリフト効果)、ソース・ドレイン電極直下の n^+ 領域でスピン散乱が起こることなどを示した。[Phys. Rev. B **102**, pp.035305/1-14 (2020)].

【実用化が期待される分野】

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、情報技術(IT)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創出し、その機能と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。特に、室温で強磁性を示す n 型および p 型の強磁性半導体の創製と機能実証(これにより強磁性半導体における”ルネサンス”を生み出す)、Spin-MOSFET の作製と動作実証などはこの分野で世界をリードする研究成果である。この研究がさらに発展すれば、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”をもつリプログラマブル・コンピューティングなど、情報の記録や処理技術においても(スピン自由度と不揮発性の導入による)革新的な低消費電力半導体デバイスや集積回路を実現できる。

研究の概要



半導体と磁性体の特長と機能を融合 → 強磁性半導体を作製 → 不揮発性・高速・低消費電力デバイスを作製、革新的情報システムを実現。
 そのために、これまでの強磁性半導体の問題点をすべて解決する：
 (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、室温強磁性を示す半導体を実現
 (3) 強磁性の起源に関する統一的理解と物質設計の指針を確立。
 さらに、(4) 革新的な高機能デバイスを作製、原理実証、実現する。