

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2017年 10月～2024年 3月

研究代表者: 田中 雅明
(東京大学大学院工学系研究科、
教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では、以下の研究目標を設定した。

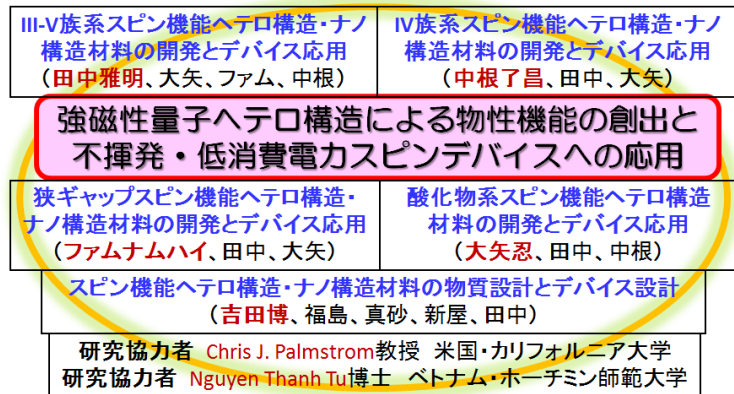
1. 従来の半導体デバイスでは持ち得なかった「不揮発性」「低消費電力」「再構成可能性」「情報処理の柔軟性」「非相反性」の機能をもつ材料、量子ヘテロ構造、ナノ構造を創製する。
2. 半導体材料、量子ヘテロ構造・ナノ構造、デバイス中に磁性元素や強磁性材料を取込み、量子サイズ効果、トンネル効果、電荷・スピン輸送、スピン状態を制御し、不揮発・低消費電力スピンデバイスへ応用する。

本チームは右図に示す5つの研究グループで構成され、密接に協力しながら研究を進めた。1の材料、2のデバイスの両面において、当初計画以上に研究が進み、新しい室温強磁性半導体の創製、その高機能化、新現象の発見、新機能の創出、スピントランジスタ等の作製と動作実証など顕著な成果を挙げた。以下にこれまでの主な研究成果を述べる：

(1) 世界初の室温以上のキュリー温度 (T_c) をもつp型およびn型の強磁性半導体：p型 (GaFeSb)

およびn型 (InFeSb) の作製に成功し、Fe 添加 III-V 族強磁性半導体の新しいデザインルールを創出した。(2) 垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜の強いスピン軌道相互作用を用いることによって、従来より約3桁低い電流密度 ($10^5 \sim 10^4$ A/cm²) での磁化反転機能創出に成功した。また、InAs/(Ga_{0.8},Fe_{0.2})Sb からなる二層ヘテロ接合を作製し、新規伝導現象と巨大な磁気抵抗効果を発見した。さらに、半導体薄膜中でのゲート電圧による波動関数制御により、近接磁気抵抗と奇関数磁気抵抗効果を大きく変調するトランジスタの作製に成功した。(3) 強磁性体半導体ヘテロ接合を用いた縦型 Spin-MOSFET を作製し、サイドゲートによるトランジスタ動作とトンネル磁気抵抗効果の変調を実現、スピントランジスタとしての動作を示した。また、Si ベースの横型 Spin-MOSFET を作製し、Si の二次元電子チャンネル中で横方向電界による 10 μm 以上のスピン輸送を実現、運動量散乱 25000 回のうち1回だけスピン散乱が起こること(スピン輸送のロバスト性)を示した。室温でのトランジスタ動作と平行/反平行磁化による出力の変調 (Spin-MOSFET の基本動作実証) を示した。(4) 高品質の新規ペロブスカイト型酸化物単結晶ヘテロ構造を作製し、電圧による超低消費電力での磁化制御、世界最高効率のスピン-流電流変換、横型スピバルブ素子の作製と世界最高の横型スピバルブ比 (115%)、ゲート電圧による変調の実現など、数々の有用なデバイス機能を実証した。(5) 理論面では、第一原理計算により、新機能ナノ超構造スピントロニクス材料の設計と強磁性発現機構の解明、多階層連結量子シミュレーションによる T_c の予測、自己組織化ナノ超構造の結晶成長によるデザイン手法の開発を行った。これにより、高い T_c をもつ新規ナノ超構造の提案、電場による磁氣的交換相互作用の制御法に関する一般則の導出により、量子スピンデバイス機能のデザインを可能にした。

以上の成果を質の高い論文誌 (Nature Physics, Nature Electronics, Nature Communications, Advanced Materials, Physical Review Letters, Physical Review, Applied Physics Letters など) に 97 編のオリジナル論文を出版、書籍・総説・解説論文等 14 編を出版、招待講演 94 件 (うち国際会議招待講演 44 件) を含む 434 件の学会等で発表、本チーム代表者およびメンバーの受賞 35 件、研究成果の報道 105 件など (2022 年 9 月末まで)、国内外で高い評価を得ている。今後は、本 CREST 領域「量子技術」および代表者らが構築したスピントロニクス学術研究連携ネットワーク (Spin-RNJ) を活用し、材料物性、機能発現、デバイスの研究を一層推進することが期待される。



本研究チームの構成。青字は各グループの研究項目、赤い太字はグループリーダーを示す。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果> 3件

1. 非磁性半導体(InAs)/強磁性半導体((Ga_{0.8},Fe_{0.2})Sb)からなるヘテロ構造における新しい電子伝導現象(巨大な磁気抵抗効果)の発見とその電界制御

概要:

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—巨大な近接磁気抵抗効果—を発見した。さらに、この接合をトランジスタに加工し、外部からゲート電圧を印加することによってInAs薄膜(量子井戸)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。また、最近、同様のヘテロ構造において、奇関数を示す巨大磁気抵抗効果を発見、磁場を反転させた場合の抵抗変化は最大で27%であり、これまでの記録を10倍以上更新する結果を得た。この結果は、時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れているという物質中の特異な対称性の破れによって、これまでにはない大きな奇関数磁気抵抗効果という巨大応答が引き起こされたという点で大きな意味がある。本研究は、ゲート電圧により電子状態を変調できるという半導体の利点に、強磁性体の持つ不揮発性性質を付与できたこと、さらに磁化の情報を大きな磁気抵抗効果という手段での読み出しを示したことにより、強磁性半導体を用いた次世代スピントロニクス・デバイスの実現に向けて新たな道筋を示した。

- ・ 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**, pp.1134-1139 (2019).
- ・ Kosuke Takiguchi, Le Duc Anh, Takahiro Chiba, Harunori Shiratani, Ryota Fukuzawa, Takuji Takahashi and Masaaki Tanaka, "Giant gate-controlled odd-parity magnetoresistance in one-dimensional channels with a magnetic proximity effect", *Nature Communications* (2022) **13**, pp.6538/1-7 (2022).

2. 強磁性半導体垂直磁化薄膜に電流を流すだけでスピン軌道トルクにより超高効率・低電流密度で磁化反転に成功

概要:

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ライク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、従来より約3桁低い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、低消費電力スピントロニクスの実現に向けて重要な進展をもたらすものである。

- ・ Miao Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. 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).
- ・ 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).

3. 狭ギャップ半導体をベースとするヘテロ構造・ナノ構造と量子物質の創製、機能開発

概要:

低温分子線エピタキシー法(LT-MBE)を用いて狭ギャップ半導体 InAs 半導体単結晶中に Fe-As 正四面体結合を1原子層の厚さの平面内に閉じ込める添加方法を実現、閃亜鉛鉱型結晶構造を保ちながらすべての Fe 原子が中心位置から 1.5 原子層の範囲に局所的に分布させることに成功した。この成長技術により、FeAs 原子層を InAs 結晶中に等間隔に埋め込み、単

結晶 FeAs/InAs 超格子構造の作製に成功した。超格子構造全体の強磁性秩序が強く、すべての Fe 原子が最大に近い 5 ボーア磁子の磁気モーメントを持つこと、電気抵抗が外部磁場によって 500 %も変化する巨大磁気抵抗効果を観測、さらに、この強磁性超格子構造をチャンネルとする電界効果トランジスタデバイス構造を作製し、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。本研究により作製した超格子構造は、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。

さらに究極の狭ギャップ半導体として、世界最高品質の単結晶ダイヤモンド型結晶構造をもつ α -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、 α -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。 α -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して期待される量子物質である。

- 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).
- Le Duc Anh, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, "Elemental topological Dirac semimetal α -Sn with high quantum mobility", *Advanced Materials* **33**, pp.2104645/1-9 (2021).

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 > 3 件

1. 縦型スピントランジスタ (Spin-MOSFE) の作製と動作実証

概要:

GaMnAs を強磁性ソース・ドレイン、GaAs をチャンネルとした縦型スピン電気二重層電界効果トランジスタを作製し、縦型スピン MOSFET の性能向上を行った。作製した素子において、磁化の配置(平行磁化/反平行磁化)により 37%、ゲート電圧により約 20–30%、ドレイン電流が変調されることを示した。さらに、サイドゲートにより、側面からゲート電圧を印加することによって、素子の磁気異方性を変調されていることが明らかになった。さらに GaMnAs を強磁性ソース・ドレイン、GaAs をチャンネルとした固体(HfO₂)ゲート酸化膜をもつ縦型スピン MOSFET を作製し、スピン依存伝導特性を調べた。作製した素子の側面からゲート電圧を印加することによって 130%に及ぶこれまで報告された中で最大の電流変調量を観測した。また、ドレイン電流の変調について、実験結果を計算結果と比較することによって、その起源を明らかにした。

続いて、酸化物半導体 GaO_x を用いた縦型スピントランジスタ構造を作製し、室温で大きな磁気抵抗比とトランジスタ動作を実現した。本研究では、産業総合研究所と共同で、強磁性体 Fe と整合性の良い酸化物半導体 GaO_x を用いて Fe/GaO_x/Fe からなる強磁性トンネル接合を作製し、有機液体を用いた電気二重層のゲート技術を用いることにより、縦型スピントランジスタ構造を作製した。室温での磁気抵抗比は 40%程度に達し、従来の横型スピントランジスタの研究で得られた磁気抵抗比の最高値(0.1%)よりもはるかに大きな値が得られた。電流変調が小さいことは今後の課題であるが、素子を微細化することなどにより、変調量の改善が見込まれる。本研究は、縦型スピントランジスタの実現に向けた重要な成果である。また、酸化物関連の研究では、ヘテロ界面で二次元電子ガスのみならず高移動度の二次元正孔ガスが形成されることを見出し、界面を用いたデバイス化の研究へ展開している。

- T. Kanaki, H. Yamasaki, T. Koyama, D. Chiba, S. Ohya, M. Tanaka, "Large current modulation and tunneling magnetoresistance change by a side-gate electric field in a GaMnAs-based vertical spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor", *Sci. Rep.* **8**, 7195 (2018).
- T. Kanaki, H. Yamasaki, H. Terada, Y. Iwasa, S. Ohya, and M. Tanaka, "Improved performance of a GaMnAs-based vertical spin electric double-layer transistor", *Jpn. J. Appl. Phys. (Rapid Communications)* **57**, pp.090301/1-5 (2018).
- Toshiki Kanaki, Shin Matsumoto, Sai Krishna Narayananellore, Hidekazu Saito, Yoshihiro Iwasa,

Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Room-temperature side-gate-induced current modulation in a magnetic tunnel junction with an oxide-semiconductor barrier for vertical spin MOSFET operation", Appl. Phys. Express **12**, pp.23009/1-4 (2019).

2. 横型シリコンベース・スピン電界効果型トランジスタ(Spin-MOSFET)の作製と動作実証

概要:

シリコン(Si)ベース・スピン電界効果型トランジスタ(Spin-MOSFET)を作製し、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て動作実証した。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。

- Shoichi Sato, Mitsuki Ichihara, Masaaki Tanaka, and Ryosho Nakane, "Electron spin lifetime and momentum lifetime in Si two-dimensional accumulation channels: Demonstration of Schottky-barrier spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors at room temperature", Phys. Rev. B **99**, pp. 165301/1-9 (2019).
- 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^+ source/drain regions", Phys. Rev. B **102**, pp. 035305/1-14 (2020).

3. 横型スピンバルブ素子における世界最高の横型スピンバルブ比とゲート変調の実現

概要:

分子線エピタキシー(MBE)法により、 SrTiO_3 基板上に厚さ 12 nm の LaSrMnO_3 層をエピタキシャル成長し、電子ビーム(EB)露光によりナノサイズの非常に短い Mott 絶縁体のチャンネルを持つ横型スピンバルブ素子を作製することに成功した。この $\text{LaSrMnO}_3 / \text{SrTiO}_3 / \text{LaSrMnO}_3$ からなるデバイスでは、横型スピンバルブ構造としては世界最高値である 115 %という極めて大きな MR 比を得た。さらにバックゲート電圧による電流変調も可能であることを示した。本結果は、酸化物を利用したスピントランジスタにつながる重要な成果と言える。

- 論文準備中、下記国際会議で招待講演予定:Tatsuro Endo, Shun Tsuruoka, Shingo Kaneta-Takada, Le Duc Anh, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya (invited), "Giant spin-valve effect in oxide-based lateral nano-scale channel devices", 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2022), Minneapolis, USA, October 31 - November 4, 2022.)
- T. Endo, S. Tsuruoka, Y. Tadano, S. Kaneta-Takada, Y. Seki, M. Kobayashi, L. D. Anh, M. Seki, H. Tabata, M. Tanaka, and S. Ohya, "Giant spin-valve effect in planar spin devices using an artificial implemented nanolength Mott-insulator region", Advanced Materials (2023), in press. doi.org/10.1002/adma.202300110.

<代表的な論文> 3 編

1. 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).

概要:

垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜を $\text{InGaAs} / \text{GaAs}$ 基板上にエピタキシャル成長し、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ライク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、従来より約 3 桁低い世界最小の電流密度である $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 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。

2. 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+ source/drain regions”, *Physical Review B* **102**, pp. 035305/1-14 (2020).

概要:

シリコン(Si)ベース・スピンの電界効果型トランジスタ(Spin-MOSFET)を作製し、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て動作実証した。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。

3. S. Kaneta-Takada, M. Kitamura, S. Arai, T. Arai, R. Okano, L. D. Anh, T. Endo, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Kobayashi, M. Seki, H. Tabata, M. Tanaka, and S. Ohya,
"Giant spin-to-charge conversion at an all-epitaxial single-crystal-oxide Rashba interface with a strongly-correlated metal interlayer", *Nature Communications* **13**, 5631 (2022).

概要:

本研究では分子線エピタキシーを用いて、高品質の強相関電子系酸化物 $\text{LaTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ の単結晶界面を作製し、 193.5 nm という極めて大きなスピン流電流変換効率を得ることに成功した。この値は、2020 年にフランスのグループから *Nature* 誌に報告されていた世界最高値の3倍程度の非常に大きな値で、他の全物質で報告されている値の中で最高値である。本研究の結果は、高品質の単結晶界面や強相関電子材料を利用することにより、高効率のスピン流電流変換が実現できることを示しており、将来的には、次世代の不揮発性メモリや量子デバイスへの応用が期待される。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

(1) 東京大学グループ（研究機関別）

- 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]
- ・ 横型および縦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ポンピング実験および、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～R]
- ・ 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。

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ベトナム・ホーチミン市師範大学の研究者グエンタントゥ博士とは、長年にわたり、新規強磁性半導体に関する共同研究を行っており、共著論文を多数出版している。
- 狭ギャップ強磁性半導体の室温異常ホール効果を利用した超高感度磁気センサーを実証し、特許を出願した。これをきっかけに、株式会社デンソーのデバイス研究部と車載用磁気センサーに関する学術指導契約を結んで、超高感度異常ホール効果磁気センサーの開発について技術指導を行っている。
- ドイツ・ユーリッヒ研究所(Julich Research Center)と理論面での共同研究を継続的にしているほか、定期的(2年毎)にEU-Japanワークショップを開催している。新しい第一原理計算手法の開発(KKR-nano)と多階層連結シミュレーション手法の開発のため、2017年以降、ドイツ・ユーリッヒ研究所との共同研究ネットワークを形成した。手法開発の共同研究のため、若手研究者を長期派遣し、ワークショップ等も開催した。東京大学とユーリッヒ研究所は共同でニューロモルフィック・コンピューティングに関する国際ワークショップを2016年8月と2018年8月にドイツで開催(主催)した。また、本プロジェクトでの成果を普及するためCMDワークショップ(Computational Materials Design Workshop)を主催し、スピントロニクスマテリアル・デバイスデザインコースを毎年2回(各一週間)実施している。
- 本CREST研究メンバーが属するスピントロニクス学術連携教育研究センター(東京大学、東北大学、大阪大学、京都大学、慶應義塾大学)のネットワーク型の共同研究を通して、東北大学、東京大学、大阪大学の強磁性半導体のデザイングループと実験グループとの共同研究が大きく進展し、デザインと実験とのタイトな連携が大きく進展した。
- 本研究成果は、社会人や学生への年間二回のペースで開催した計算機マテリアルデザインワークショップ(CMDワークショップ)による第一原理計算やデザイン手法の普及活動へのネットワーク形成にも大きく貢献した。
- ドイツ・ユーリッヒ研究センターとの第一原理計算手法の開発や多階層連結量子シミュレーション手法の開発について、若手研究者の長期派遣による計算手法開発に関する共同研究ネットワークが大きく進展し、共同の国際ワークショップを行った。(2018年8月JST CREST「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」研究者海外派遣支援)
- 米国・ニューヨーク大学との共同研究、バッファロー大学との新規量子効果現象とデバイス応用に関する研究打ち合わせを行っている。
- 酸化物ヘテロ界面で発見した新機能を用いたデバイスに関する特許を申請する過程において、企業との共同研究の検討を行っている。
- 中国・清華大学および米国コーネル大学から研究生を東京大学の代表者(田中)グループで受け入れ、スピントロニクスと量子効果デバイスに関する共同研究を行っている。