

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
平成 29 年度採択研究代表者

2018 年度 実績報告書

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

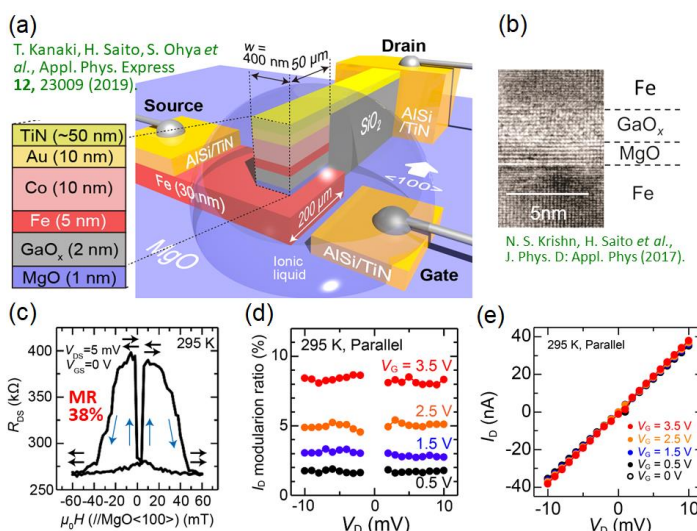
「強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と不揮発・低消費電力スピndeデバイスへの応用」をめざし、初年度に続き各計画項目について研究を行い、いずれも格段の進展と成果を得た。研究成果の概要は以下の通りである。

■強磁性金属(FM)層/非磁性金属(NM)層から成る 2 層構造において、スピン軌道相互作用が強い NM 層に電流を流しスピンホール効果によりスピン流を発生させそのスピン流を FM 層に注入することによって FM 層を磁化反転させる技術(スピン軌道トルク(SOT)による磁化反転)が、不揮発性メモリ等のスピndeデバイスにおいて注目されている。本研究では、エピタキシャル成長により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 基板上に形成し、GaMnAs 薄膜に電流を流すことによりきわめて高効率(低電流)の磁化反転に成功した。これは単一の磁性層でありながら GaMnAs 中の Dresselhaus スピン軌道相互作用により電流がスピン流に変換され、スピン軌道トルクが働くことによる磁化反転が起こったためである。磁化反転のために必要な電流密度 j_c は $3.43 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ であり、従来研究の SOT による磁化反転の報告値よりも 2 桁小さく、低消費電力スピndeデバイスの実現に向けて重要な一歩である。[Nature Commun., in press].

■Si ベースの Spin-MOSFET 作製に向けて、ソース電極/半導体チャネル接合と半導体チャネル/ドレイン電極接合における高効率なスピン偏極電子を注入し検出するための設計と作製および評価技術の確立をめざした研究を行った。接合構造は強磁性体(Fe)/マグネシウム(Mg)/トンネル障壁層/半導体(Si)基板であり、トンネル障壁層は SiO_xN_y と MgO/SiO_x の 2 種類とした。その結果、(1) Si-CMOS 技術と整合性の良いアモルファス SiO_xN_y 障壁層はスピン注入に有望な材料であること、(2) SiO_x を MgO と Si の間に挿入することによりトンネル障壁/Si 界面準位密度を低減することが高効率なスピン注入に有効であること、を初めて定量的に明らかにした。[Appl. Phys. Lett. **112**, pp.182404/1-4 (2018); Phys. Rev. Materials **3**, pp.024411/1-9 (2019)].

■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(齋藤秀和博士ら)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 $\text{Fe}/\text{GaO}_x/\text{Fe}$ からなる強磁性トンネル接合を作製し、東大物理工学専攻の岩佐義宏教授らが開発した有機液体を用いた電気二重層の技術を組み合わせることにより、縦型スピントランジスタ構造を作製した[図1(a)(b)]。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[図1(c)]。電流変調が小さいことが課題であるが[図1(d)(e)]、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。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。[Appl. Phys. Express **12**, 23009/1-4 (2019)].

図1-1 (a) $\text{Fe}/\text{GaO}_x/\text{Fe}$ からなる磁気トンネル接合をベースとした縦型スピントランジスタ構造。(b)透過型電子顕微鏡による断面格子像。(c)磁気抵抗効果(TMR)。(d)ゲート電圧 V_G によるドレイン電流 I_D の変調。(e)



得られたトランジスタ特性。以上はすべて室温での測定結果。

■第一原理計算によって磁氣的相互作用(交換相互作用)と磁氣的機構解明を明らかにし、一般則を導出するためのデザイン手法を開発した。また、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の予測および結晶成長法のデザイン手法の開発を行った。本チームの実験で p 型強磁性半導体(Ga,Fe)Sb において室温以上のキュリー温度が観測されている。ところが III-V 族中の Fe は half-filled となり系は反強磁性となると予測され、これまで実験結果を説明することができなかった。本研究では第一原理計算により p 型ドープを行うと反結合性状態が一部占有され、スピンの移動する余地が生まれ強磁性を生じる要因となっていることを明らかにした。さらに、Fe 原子間には引力的な相互作用が働いており、熱処理を行うと Fe-rich な領域が形成されることが判明した。キュリー温度の定量的な評価により Fe-rich な領域がある場合は強磁性的な相互作用が効率的に結晶全体へと広がり、室温を超える高いキュリー温度を示すことが示唆された。[J. Appl. Phys. **124**, pp. 103902/1-8 (2018)].

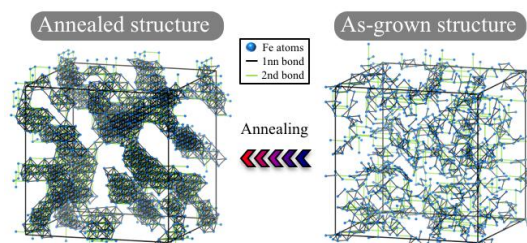


図1-2 第一原理計算により得られた (Ga,Fe)Sb 中の Fe の分布:右が成長後、左が熱処理後。

■室温以上の高いキュリー温度 T_C をもつ新しい n 型強磁性半導体(In,Fe)Sb の作製に初めて成功し、その基本物性を明らかにした。InSb に高濃度の Fe (16%) を添加した(InFe)Sb 薄膜は、閃亜鉛型結晶構造を保ち、強磁性を示して T_C が 335 K に達し、前年までに本研究で作製した(GaFe)Sb よりも少ない Fe 濃度で室温強磁性を実現した。従来の Mn 系強磁性半導体の研究で標準理論とされてきた Mean-field Zener モデルによると、1) n 型強磁性半導体においては $s-d$ 交換相互作用が弱いいため T_C を 1 K 以上にはできない、2) p 型強磁性半導体において高い T_C を得るためには禁制帯幅が大きいワイドギャップ半導体を使う必要がある、と考えられてきた。これに対して本研究では、Fe 添加強磁性半導体の T_C が Mean-field Zener モデルの理論予測と異なる対照的な結果を示す。すなわち、鉄系強磁性半導体では、n 型強磁性半導体を実現できただけでなく、その T_C は半導体の禁制帯幅が小さくなればなるほど高くなる傾向があることを示した(本研究で実現した室温強磁性半導体 n 型(InFe)Sb と p 型(GaFe)Sb はこの傾向を示す)。このことは強磁性半導体において長く信じられてきた Mean-field Zener 標準モデルとは異なる新しい設計モデルの必要性を意味する。[Appl. Phys. Exp. **11**, pp.063005/1-4 (2018)].

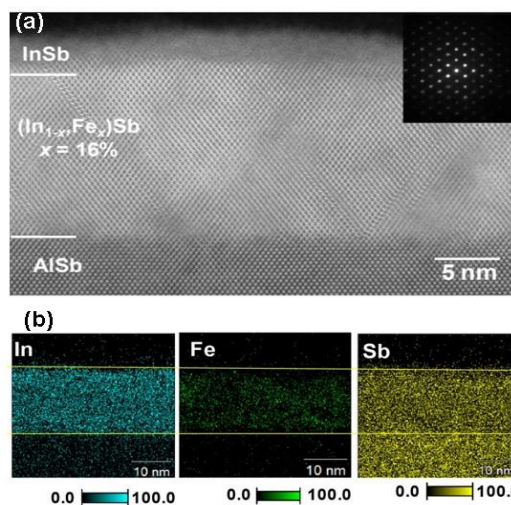


図1-3 厚さ 15 nm の(In,Fe)Sb 薄膜(Fe 濃度 16%)の (a) 断面 TEM 格子像、(b) EDX による In, Fe, Sb の分布

【代表的な原著論文】

- M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya and M. Tanaka, "Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet", Nature Commun, in press.
- R. Nakane, M. Ichihara, S. Sato, and M. Tanaka, "Nearly ideal spin tunneling efficiency in Fe/Mg/MgO/SiOx/n⁺-Si(001) junctions", Phys. Rev. Materials **3**, pp.024411/1-9 (2019).

- T. Kanaki, S. Matsumoto, S. K. Narayananellore, H. Saito, Y. Iwasa, M. Tanaka, and S. 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. 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 教授)

- ・ 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~H31]
- ・ 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~H31]
- ・ 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ナ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~H32]
- ・ 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~H34]
- ・ 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~H34]

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 准教授)

- ・ 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~H31]
- ・ 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~H32]
- ・ 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~H34]

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 准教授)

- ・ 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~H31]
- ・ 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~H32]
- ・ 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~H33]
- ・ 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~H34]

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 上席研究員)

- ・ 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~H31]
- ・ 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~H32]
- ・ 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~H33]
- ・ 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) [H31~H34]

(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 准教授)

- ・ 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~H32]
- ・ 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~H33]
- ・ 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~H34]

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。