

「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

H29 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ndeバイスへの応用

## § 1. 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 大学院 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~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(吉田グループ) [H29～H31]
- ・ 磁氣的機構の解明と物性予測(吉田グループ) [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(吉田グループ) [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 太郎 (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

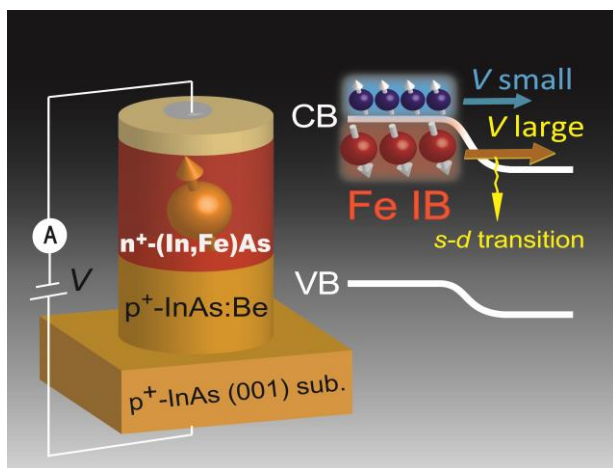
(主担当: ファムナムハイ 准教授)

- ・ 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(巨大スピンバルブ効果等)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]

## § 2. 研究実施の概要

「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、前記の 5 項目について研究を行った。平成 29 年度は初年度であり、いずれも着実な進展と成果を得た。研究成果の概要は以下の通りである。

- 強磁性半導体 GaMnAs をソースとドレイン電極に GaAs をチャネルに用いたスピントランジスタ (Spin MOSFET) 構造を作製し、横型デバイスと縦型デバイスの両方において、磁気抵抗 (磁化が平行か反平行かに応じてドレイン電流とチャネル抵抗が変化) とゲート電圧によるドレイン電流の変化を観測した。すなわち、スピントランジスタとしての基本動作の1つを確認実証した。[下記論文 1)]
- シリコンベースのスピントランジスタ実現のために Fe(3nm)/Mg( $d_{Mg} = 0 \sim 2\text{nm}$ )/MgO(0.8nm)/Si(001)トンネル接合を作製し、強磁性体から Si へのスピン注入と検出を系統的に調べることで、高効率なスピン偏極電子伝導のための設計指針を得た。具体的には、Fe の磁化不活性層の形成を Mg を挿入することによって抑止することが、高効率なスピン偏極電子伝導には必要であることを縦型三端子デバイスの測定によって示し、Mg の最適な膜厚を明らかにした。この結果は、我々が以前に提唱した物理モデルと非常に良い一致を示しており、測定シグナルにより接合の最適化をおこなう評価法を確立した。これによって最適化されたトンネル接合を用いて、最終目標のスピン電界効果型トランジスタに類似の横方向デバイス構造を作製し、測定シグナルがデバイス形状によって変化することと、その物理的起源を明らかにするとともに、定量的評価法を開発した。[下記論文 2)]
- n型強磁性半導体(In,Fe)As からなるスピン江崎ダイオードを作製し、そのスピン依存バンド構造を用いて磁気伝導度 (磁場による電流の変化) の大きさと符号を電圧で制御することに成功し、半導体デバイス (エサキダイオード) に新たなスピン機能を加えた。本研究成果は、今後の新材料探索とスピndeデバイス応用に向けて大きな進展をもたらすものと期待される。この成果は下記の論文 3) で発表し、Applied Physics Letters 誌の注目論文 (FEATURED ARTICLE) に選ばれ、紹介記事が AIP Scilight に掲載された。[下記論文 3)]



スピン・エサキダイオードにおける電流の磁場応答の制御: III-V 族半導体 InAs に磁性不純物鉄(Fe)を添加したn型強磁性半導体(In,Fe)As とp型 InAs からなるスピン江崎ダイオード (図の左) において、バイアス電圧によって電流に寄与する電子を伝導帯から不純物帯に切り替え (図の右)、電流の磁場応答の強度と符号を大きく変化させた。

- 分子線エピタキシー法により高品質のペロブスカイト酸化物ヘテロ構造の成長に成功した。特に室温で強磁性を示す  $\text{LaSrMnO}_3$  (LSMO)や、磁気トンネル接合に利用できる  $\text{LaMnO}_3$  (LMO),  $\text{LaAlO}_3$  (LAO),  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 薄膜等の成長に成功した。さらに、LSMO/LAO/Nb:STOやLSMO/STO/LSMOからなるトンネル接合素子を作製した。これらの素子において、0.1~0.3 V 程度の小さなバイアス電圧を印加した際に、 $\text{LaSrMnO}_3$  の磁気異方性の対称軸が急峻に回転するという予期していなかった新たな現象を観測した。このような異方性の急峻な回転は他の物質ではほとんど報告されておらず、様々な電子軌道が絡み合う酸化物材料系ならではの現象だと考えられる。本結果は、超低消費電力で磁化反転が可能となる新しい技術の創出につながるものと期待される。(L. D. Anh, M. Tanaka, S. Ohya *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 8715 (2017), L. D. Anh, M. Tanaka, S. Ohya *et al.*, in preparation.)
- $\text{LaSrMnO}_3$  量子井戸を有する量子ヘテロ構造において、トンネル電流-電圧特性に振動的な振る舞いが見られることが明らかになった。 $\text{LaSrMnO}_3$  で量子サイズ効果が観測されたという報告例はなく、振動の起源について今後さらなる検証が必要と考えている。
- 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を開発した。これらを本チームによる実験データの蓄積があるGe系強磁性半導体に適用し、その有効性を検証し、交換相互作用の距離依存性、強磁性転移温度などを定量的に予測した。
- 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予測および結晶成長法のデザイン手法の開発を行い、テストケースとしてGe:Mn, Ge:Fe系に応用し、前者では規則合金のナノスケール析出、後者ではスピノーダル・ナノ分解による高い強磁性転移温度が予測され、本チームの実験結果とも定量的に良く一致する結果を得た。

### 代表的原著論文 3件

- 1) Hirokatsu Asahara, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Large spin-valve effect in a ferromagnetic-semiconductor GaMnAs-based lateral spin-valve device", *Appl. Phys. Express* **11**, pp.033003/1-4 (2018). Doi: 10.7567/APEX.11.033003
  - 2) Shoichi Sato, Ryosho Nakane, Takato Hada, and Masaaki Tanaka, "Spin injection into Si in three-terminal vertical and four-terminal lateral devices with Fe/Mg/MgO/Si tunnel junctions having an ultrathin Mg insertion layer", *Phys. Rev. B* **96**, pp.235204/1-10 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.235204
  - 3) Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Electrical tuning of the band alignment and magnetoconductance in an n type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As-based spin-Esaki diode", *Appl. Phys. Lett.* **112**, pp.102402/1-4 (2018). Doi: 10.1063/1.5010020
- 3)の論文は **Featured Article in Applied Physics Letters** に選ばれ、紹介記事が **AIP Scilight** に掲載された。"A change in sign brings a sign of change for spin-current devices,"  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/sci/2018/10/10.1063/1.5027513>  
 DOI: 10.1063/1.5027513