

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成23年度採択分

平成26年5月30日現在

研究課題名（和文） **不揮発性および再構成可能な機能をもつ  
半導体材料とデバイスの研究開発**  
研究課題名（英文） **Semiconductor Materials and Devices with  
Nonvolatile and Reconfigurable Functions**  
研究代表者  
**田中 雅明** (TANAKA MASAOKI)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要：半導体材料あるいはデバイス構造中に磁性元素や強磁性材料を構成要素として取り込み、キャリアの電荷輸送に加えて「スピン自由度」をも活用する新しい機能材料やデバイスをつくる。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学、電子・電気材料工学

キーワード：スピントロニクス、半導体、磁性、スピンデバイス

#### 1. 研究開始当初の背景

今日の情報化社会を支えている半導体デバイスでは、キャリアの電荷輸送を用いた電子デバイスと光デバイスが作製され、エレクトロニクスや情報技術を支えてきた。一方、キャリアの持つもう1つの自由度であるスピンについては、半導体中で積極的に利用されることはなかった。しかし、ここ十数年の間に、スピンの影響が顕著に現れる様々な新材料が半導体をベースに作製できるようになり、興味深い物性が明かにされつつある[最近の研究状況は、田中雅明(総合報告)「半導体におけるスピン生成—半導体スピントロニクスの最近の進展」応用物理 78 巻 第3号, pp. 205-216 (2009); および M. Tanaka, M. Yokoyama, P. N. Hai, and S. Ohya (Invited review), "Properties and functionalities of MnAs/III-V hybrid and composite structures", Semiconductors and Semimetals, Vol. 82, pp. 455-485 (Academic Press, November 2008) を参照]。本研究者は、1990年代初めに磁性体と半導体の一体化・融合に関する研究を開始し以来約20年間にわたって、III-V族、IV族ベースの材料物性、デバイス、論理回路の提案など、スピントロニクス分野で先導的研究を行っており、この分野の国際的な発展に貢献している。

#### 2. 研究の目的

半導体材料あるいはデバイス構造中に磁性元素や強磁性材料を取り込み、キャリアの電荷輸送に加えて「スピン自由度」をも活用する新しい機能材料やデバイスをつくる。スピン自由度による機能を有する新しい半導

体デバイス構造を提案・解析し、不揮発性メモリ機能と合わせて、柔軟な情報処理機能、すなわちハードウェアを作製した後で機能を再構成する(書き換える)ことが可能な半導体デバイスを試作して動作を実証する。

#### 3. 研究の方法

平成23年度に新たにIII-V族磁性半導体、磁性金属エピタキシャル成長用MBE装置を設計、製作し、立ち上げを行った。平成24年度初めには立ち上げと調整を終了し、以後順調に新しいIII-V族ベースのスピン機能材料の成長を行い、半導体スピン機能材料とデバイスの研究を行っている。

#### 4. これまでの成果

材料形成と物性機能の制御を目指した基礎研究、特にIII-V族およびIV族ベースの磁性半導体、半導体と整合性の良い強磁性金属とヘテロ構造のエピタキシャル成長、評価、物性制御の研究を中心に行い、多くの成果を得た。代表的な成果のみを以下に挙げる。

(1) 代表的な強磁性半導体であるGaMnAsのフェルミ準位、価電子帯と不純物帯の解明  
共鳴トンネル分光法というユニークな手法を用いて、電氣的性質や強磁性転移温度にかかわらずGaMnAsのフェルミ準位 $E_F$ は従来の通説とは異なり禁制帯中に存在すること、価電子帯スピン分裂はわずかであること、共鳴トンネル効果によってトンネル磁気抵抗が大きく増大することを示した。また、 $E_F$ のMn濃度依存性を初めて明かにした。さらに、フェルミ準位、価電子帯と不純物バンドを光電子分光により観測し、強磁性発現機構

を示した。本研究により、これまで論争があり統一的理解がなかった GaMnAs, (InGaMn)As のバンド構造を明らかにした。

(2) 初めての n 型キャリア誘起 III-V 族強磁性半導体 (In, Fe)As を創成

III-V 族強磁性半導体ではこれまで p 型に限られていたが、n 型キャリア誘起 III-V 族強磁性半導体 (In, Fe)As を作製し、基本物性を明らかにした。電子キャリアが伝導帯に存在すること、s-d 交換相互作用が大きいことなどを示すとともに、量子井戸構造の膜厚を変えることにより電子キャリアの波動関数と (In, Fe)As 層との重なりを制御し、キュリー温度  $T_c$  を変えられることを示した。

(3) 波動関数工学による磁性の制御

InAs/(In, Fe)As/InAs 三層からなる量子井戸を作製し、表面エッチングすることにより、電子の波動関数を膜厚方法にシフトさせ (In, Fe)As 層との重なりを変えることにより、強磁性転移温度  $T_c$  を約 2 倍変化させることに成功した。本研究は n 型強磁性半導体 (In, Fe)As を用いた波動関数工学と電気的手法による磁性制御の最初の実践である。

(4) Mn を添加した Si および GaAs を用いた室温電界発光と可視光発光素子 (LED)

磁性半導体で初めて室温で動作する電界発光素子 (LED) の作製に成功した。ホットキャリア注入励起によって Si および GaAs に添加した Mn の d-d\* 遷移を起こさせたものであり、IV 族および III-V 族では初めて遷移金属の内殻遷移による発光を観測した。特に Si の高効率室温可視光 LED は、集積回路にモノリシックに集積することができ、チップ間通信のほか様々な Si フォトニクス素子に応用でき、磁性半導体の電子状態の解明にも貢献することが期待できる。

(5) 強磁性混晶半導体の相図の作成と均一な強磁性微粒子の形成

強磁性混晶半導体のスピノーダル分解およびバイノーダル分解を含む相図を理論と実験によって求め、これを III-V 族強磁性半導体 GaMnAs および IV 族強磁性半導体 (GeMn に適用し、均一なサイズの強磁性 MnAs 微粒子および強磁性 GeMn ナノカラムを作製する方法を提案、実証した。

## 5. 今後の計画

これまでの研究成果を基礎にして、以下のスピン機能材料とデバイスの研究を進める。

- ・ GaMnAs をベース p 型 III-V 族強磁性半導体およびそのヘテロ構造とデバイス応用
- ・ 新しい n 型強磁性半導体 (In, Fe)As およびそのヘテロ構造とデバイス応用
- ・ 半導体へのスピン注入、スピン輸送、スピン検出とスピン MOSFET の作製
- ・ 分子線エピタキシーによる新しい酸化物強磁性半導体とそのヘテロ構造の作製

・ Mn 添加半導体による電界効果発光素子

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)  
本研究に関する査読付論文は 24 件、招待講演は 36 件など多数ある。以下に代表的な学術論文 5 件を挙げる。

(1) Masaaki Tanaka, Shinobu Ohya, and Pham Nam Hai (*Invited paper*), "Recent progress in III-V based ferromagnetic semiconductors: Band structure, Fermi level, and tunneling transport", *Applied Physics Reviews* **1**, pp.011102/1-26 (2014).

(2) L. D. Anh, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Control of ferromagnetism by manipulating the carrier wavefunction in ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As quantum wells", *Appl. Phys. Lett.* **104**, pp.042404/1-5 (2014).

(3) P. N. Hai, L. D. Anh, S. Mohan, T. Tamegai, M. Kodzuka, T. Ohkubo, K. Hono, and M. Tanaka, "Growth and characterization of n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As", *Appl. Phys. Lett.* **101**, pp.182403/1-5 (2012).

(4) S. Ohya, I. Muneta, Y. Xin, K. Takata, and M. Tanaka, "Valence-band structure of quaternary alloy ferromagnetic semiconductor (InGaMn)As", *Phys. Rev.* **B86**, pp.094418/1-8 (2012).

(5) R. Nakane, S. Sato, S. Kokutani, and M. Tanaka, "Appearance of Anisotropic Magnetoresistance and Electric Potential Distribution in Si-based Multi-terminal Devices with Fe Electrodes", *IEEE Magnetics Lett.* **3**, pp.3000404/1-4 (2012).

<受賞>

(1) 田中雅明 平成 24 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 (研究部門) 「半導体スピントロニクス材料とデバイスの研究」

(2) 応用物理学会論文賞「応用物理学会論文奨励賞」2011 年 8 月 30 日 第 72 回秋季応用物理学会学術講演会にて授賞式と記念講演 Shinsuke Yada, Ryohei Okazaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Single-Crystalline Ferromagnetic Alloy Semiconductor  $Ge_{1-x}Mn_x$  Grown on Ge(111)".

(3) 第 26 回安藤博記念学術奨励賞 フナムハイ (Pham Nam Hai) 2013 年 6 月 29 日 「新型キャリア誘起強磁性半導体の研究」

<ホームページ等>

<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

<http://www.youtube.com/watch?v=YbU9-NxmS78&feature=channel>