

研究種目： 基盤研究 (S)  
研究期間： 2006 ~ 2010  
課題番号： 18106007  
研究課題名 (和文) リコンフィギャラブル・ナノスピndeバイス

研究課題名 (英文) Reconfigurable Nano-Spin Devices

#### 研究代表者

田中雅明 (TANAKA MASAAKI)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：29836364

#### 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路、スピndeバイス

#### 1. 研究計画の概要

本研究では、従来の半導体デバイスでは不可能であったリコンフィギャラブルな機能をもつナノスピndeバイスの基盤技術を開発することを目指している。スピン自由度を有する新しい半導体デバイス構造を提案し、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 (書き換える) することが可能 (リコンフィギャラブル) な半導体デバイスを試作し、その動作原理を示す。大きく分けて次の 3 タイプのスピndeバイス; (1) IV 族半導体をベースとした MOSFET 型 (プレーナ型) のスピndeバイス、(2) III-V 族半導体をベースとした接合型スピントランジスタ、(3) 磁性金属微粒子と半導体からなる複合構造をベースとした単電子スピントランジスタ、について研究を行っている。

#### 2. 研究の進捗状況

これまでに、以下の研究成果を得た。

(1) 新しい IV 族強磁性半導体 GeFe の創成に成功し、詳細な構造評価と磁気光学効果の実験から、ダイヤモンド型半導体のバンドがスピン分裂して強磁性となっている真の強磁性半導体であることを示した。これは、IV 族半導体としては初めて真の強磁性半導体であることが示された材料である。

(2) 磁性半導体 GeMn の強磁性の起源が、スピノーダル分解によってできる Mn 組成が高いナノスケールのコラム構造にあることを明らかにした。また、強磁性の起源であるアモルファス強磁性半導体 GeMn の薄膜作製に成功し、基本物性を明らかにした。

(3) IV 族半導体をベースとしたスピン

MOSFET の動作解析を行い、NAND/NOR、AND/OR、二入力対称関数など、種々のリコンフィギャラブル論理回路を提案し、回路シミュレーションによりその動作を示した。

(4) SOI 基板上に強磁性 MnAs ソース・ドレインを用いたバックゲート構造スピndeバイス MOSFET を作製し、シリコン MOS 反転層へのスピン注入と検出に成功した。良好な電気的特性と磁性層の磁化によりチャネル抵抗が変化する磁気輸送特性を合わせ持つ MOSFET を作製し、スピndeバイス MOSFET の動作原理を示した。

以上 (1) ~ (4) は IV 族スピndeバイスという新しい分野の創出と発展に寄与する成果である。

(5) III-V 族ベース・スピndeバイス機能半導体材料 (GaMnAs, InGaMnAs) について、Mn 添加濃度を飛躍的に高め、世界最高レベルの強磁性転移温度  $T_C$  を得ることに成功した。

(6) 二重障壁からなる強磁性トンネル接合素子を作製し、強磁性半導体ヘテロ構造において初めて共鳴トンネル効果によるトンネル磁気抵抗効果の増大を観測した。

(7) 強磁性半導体ヘテロ接合を用いて初めて、磁気抵抗効果と電流増幅機能を合わせ持つ接合型スピントランジスタの原理的動作に初めて成功した。

以上 (5) ~ (7) は、III-V 族をベースとした半導体スピndeバイスの発展に寄与する成果である。

(8) 単電子スピントランジスタ構造として、縦型デバイスおよび横型デバイスを作製し、クーロンブロックによる TMR の振動現象の観測に成功した。さらに、MnAs 微粒子におけるスピン緩和時間が  $10\mu\text{s}$  以上

と非常に長いことを明らかにした。

(9) 閃亜鉛鋅型結晶構造をもつ強磁性 MnAs のナノ微粒子を含む磁気トンネル接合デバイスにおいて、静磁場を与えるだけで起電力が発生する「スピン起電力」とクーロンブロック効果による 100,000% を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現した。このことは、磁気エネルギーを電気エネルギーに変換する新しい原理の実証を意味するとともに、ファラデーの電磁誘導の法則を拡張する必要があることを示唆している。この研究成果は、高感度の磁気センサやスピン起電力を利用した新規デバイス応用への道を拓くものである。

### 3. 現在までの達成度

当初の計画以上に進展している。

理由：本研究では、下記3つの材料系とデバイス；[1] IV 族系スピン機能材料の開発および Spin MOSFET の解析と試作、[2] III-V 族系スピン機能材料の開発とそのデバイス応用、[3] 強磁性金属微粒子と半導体複合構造とデバイス についての研究を進めてきた。いずれも原理的な動作を確認し、一部前倒しで順調に進んでいる。さらに、上記(9)のように当初の予想を超える成果も出ている。

### 4. 今後の研究の推進方策

上記の3つの材料系とデバイス応用について引き続き研究を行う。これまでにいずれも材料とデバイスの作製を行い原理的な動作を確認し、順調に進んでいるが、それぞれの項目についての残された課題に取り組み、リコンフィギャラブルな機能をもつナノスピndeバイスの基盤技術を確立する。

### 5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計40件)

代表的な5件を示す。

- 1) Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, Stewart E. Barnes, Sadamichi Maekawa, "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions", *Nature* 458, pp.489-492 (2009).
- 2) Y. Mizuno, S. Ohya, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Spin-dependent transport properties in GaMnAs-based spin hot-carrier transistors", *Appl. Phys. Lett.* 90, pp.162505/1-3 (2007).
- 3) S. Ohya, P. N. Hai, Y. Mizuno, and M. Tanaka, "Quantum-size effect and tunneling magnetoresistance in ferromagnetic- semiconductor quantum heterostructures", *Phys. Rev.* B75, pp.155328/1-6 (2007).
- 4) M. Tanaka and S. Sugahara, "Metal-Oxide-Semiconductor Based Spin Devices for

Reconfigurable Logic", **Invited paper** in the Special Issue on Spintronics, *IEEE Transactions on Electron Devices* Vol. 54, pp.961-976 (2007).

- 5) Pham Nam Hai, S. Sugahara and M. Tanaka, "Reconfigurable Logic Gates Using Single Electron Spin Transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, pp.6579-6585 (2007).

〔学会発表〕(計140件)

招待講演は国際会議13件、国内学会27件ある。以下は代表的な3件を記す。

- 1) **M. Tanaka** (Keynote presentation) "Spin dependent transport in III-V magnetic heterostructures", *Spintronics 2008, Spin Sensing and Devices, SPIE Optics & Photonics Symposium, San Diego, August 10-14, 2008.*
- 2) **M. Tanaka** (invited), "Recent Progress in Materials and Devices for Semiconductor Spintronics", 9th International Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, Lodz, Poland, 1st-4th June 2008.
- 3) **M. Tanaka** (invited), "Materials and Devices for Semiconductor Spintronics", 4th Asian Conference of Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-4), Sendai, May 21-23, 2008.

〔図書〕(計8件) 代表的な1件を記す。

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, Spintronics, Elsevier, November 2008.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

「磁気-電気エネルギー変換装置、起電力発生装置、および磁気センサー装置」  
PCT 特許仮出願(出願番号 61/158128)  
2009年3月7日・PCT 特許仮出願

〔その他〕

以下の受賞がある。

1. 第3回日本学術振興会賞 田中雅明、2007年3月
2. 第20回先端技術大賞(学生部門最優秀賞) ファムナムハイ、2006年7月
3. 応用物理学会講演奨励賞、大矢忍、2007年3月
4. 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008) Young Researcher Award、Pham Nam Hai 2009年9月 41st SSDM にて受賞式(予定)

ホームページ等

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