

研究種目：特定領域研究
研究期間：2007～2010
課題番号：19048018
研究課題名（和文） スピン偏極電流制御デバイス

研究課題名（英文） Spin-Current Controlled Devices

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
研究者番号：30192636

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：スピン、スピン流、磁性半導体、不揮発性メモリ、スピントランジスタ

1. 研究計画の概要

従来の半導体デバイスや集積回路では持ち得なかった「不揮発性」と「再構成可能性」の機能をもつ材料とデバイス、特にスピン偏極電流制御デバイスを実現する。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、特に「スピン偏極電流」を活用する新しい機能材料やデバイスをつくる。具体的には、1) III-V 族半導体をベースとした接合型スピndeデバイス、2) IV 族半導体をベースとした MOSFET 型のスピndeデバイス、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ndeデバイスの材料プロセス基盤技術を確立し、素子を試作実現する。

2. 研究の進捗状況

(1) III-V 族半導体をベースとしたヘテロ接合とそのスピン機能デバイス

- GaMnAs を量子井戸とする GaMnAs/AlGaAs/ GaMnAs/ AlAs/ p+GaAs(001) 二重障壁ヘテロ構造において、スピン依存共鳴トンネル効果とそれによるトンネル磁気抵抗効果(TMR)の増大現象を、強磁性半導体ヘテロ構造において初めて観測した。量子準位の解析を行い、それらの量子準位が GaMnAs の価電子帯の正孔によって形成されていることを明らかにした。
- AlMnAs トンネル障壁を有する GaMnAs 単一障壁磁気トンネル接合を作製し、系統的に TMR の測定を行った。これらの素子において、2.6 K で 175%の TMR が得られた。この値は、この温度領域においては、

GaMnAs ヘテロ構造において報告されている TMR 比として最も高い値である。

- GaMnAs は、最も典型的な強磁性半導体として、10 年以上も活発な研究が行われてきたが、現在もなお、そのバンド構造、特にフェルミレベルの正確な位置に関しては、明らかになっていない。GaMnAs の共鳴準位を解析すること（共鳴トンネルスペクトロスコピー）により、GaMnAs の詳細な価電子帯構造を明らかにし、フェルミレベルの位置が不純物バンド内にあることを示した。
 - 上部障壁として AlMnAs を用いた GaMnAs 量子井戸二重障壁トンネル接合を作製し、金属的な量子井戸を得た。さらに、量子井戸の電位を制御するための電極を作製し、それにより、量子準位とスピン依存電流を制御することに成功した。この結果は、将来の三端子共鳴トンネルスピントランジスタや、他の量子効果スピndeデバイスの実現につながると期待される。
- (2) IV 族半導体をベースとしたスピン機能材料とデバイス
- 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、その基本物性を明らかにした。
 - 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 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、スピン MOSFET の動作原理を示した。

(3) 磁性金属微粒子と半導体からなる複合構造とスピndeバイス

- 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。
- 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、クーロンブロック効果による TMR の振動現象の観測に成功した。さらに、理論計算との比較により、MnAs 微粒子におけるスピン緩和時間が 10 μ s 以上と非常に長いことを明らかにした。

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)

上記の 3 項目において、結晶成長、物質材料系の評価、デバイス試作まで行い、基本的な動作原理を示すところまで達した。また MnAs 微粒子系においては、静磁場による「スピン起電力」と 100,000% を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果、非常に長いスピン緩和時間など予想外の興味深い新現象を発見した。

4. 今後の研究の推進方策

上記の 3 項目それぞれについて、さらに知見を深め、「不揮発性」と「再構成可能性」の機能をもつ材料とデバイス、特にスピン偏極電流制御デバイスの学理を確立し応用可能性を示す。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件) 代表的な 5 編を記載

S. Yada, M. Tanaka, and S. Sugahara, "Magneto-optical and magneto-transport properties of amorphous ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ thin films", Appl. Phys. Lett. **93**, 193108/1-3 (2008).

P. N. Hai, Y. Sakata, M. Yokoyama, S. Ohya, and M. Tanaka, "Spin valve effect by ballistic transport in ferromagnetic metal(MnAs) / semiconductor (GaAs) hybrid heterostructures", Phys. Rev. B **77**,

214435/1-6 (2008).

P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka, S. E. Barnes, S. Maekawa, "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions", Nature **458**, pp.489-492 (2009).

S. Ohya, I. Muneta, and M. Tanaka, "Quantum-level control in a III-V-based ferromagnetic-semiconductor heterostructure with a GaMnAs quantum well and double barriers", Appl. Phys. Lett. **96**, 052505/1-3 (2010).

S. Ohya, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Valence-Band Structure of Ferromagnetic-Semiconductor GaMnAs Studied by Spin-Dependent Resonant Tunneling Spectroscopy", Phys. Rev. Lett. **104**, 167204 (2010).

[学会発表](国際会議計 50 件) 代表的な 1 件を記載

M. Tanaka (invited), "Functionalities of GaAs/MnAs nanocomposites", 5th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH V), Krakow, Poland, July 7-11, 2009.

[図書](計 3 件) 代表的な 1 編を記載

M. Tanaka, M. Yokoyama, P-N. Hai, and S. Ohya (Invited review), "Properties and functionalities of MnAs/III-V hybrid and composite structures" in Spintronics, Semiconductors and Semimetals, Vol. **82**, edited by T. Dietl, D. D. Awschalom, M. Kaminska, and H. Ohno (Academic Press, New York, November 2008). 500 pages, ISBN-13: 978-0-08-044956-2, ISBN-10: 0-08-044956-5.

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 磁気・電気の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

発明者: ファムナムハイ、大矢忍、田中雅明、Stewart E. Barnes、前川禎通

権利者: 東京大学

種類: PCT 番号: 61/158128

出願年月日: 2009 年 3 月 7 日

国内外の別: 国外

[その他]

以下の国際会議での受賞がある。

SSDM2008 Young Researcher Award, Pham Nam Hai 受賞論文 Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Huge Magnetoresistance Effect in Semiconductor based Nanostructures with Zinc-blende MnAs Nanoparticles", presented at 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Tsukuba, September 24-26, 2008.