

自己評価報告書

平成23年5月15日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20686002

研究課題名 (和文) 次世代半導体量子ナノスピントロニクスデバイスの創製

研究課題名 (英文) Creation of the next-generation semiconductor-based nano-spin electronics devices

研究代表者

大矢 忍 (SHINOBU OHYA)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：20401140

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：スピントロニクス、量子ヘテロ構造

1. 研究計画の概要

本研究では、半導体デバイスでは従来用いられてこなかった電子のスピン自由度を活用して、高速かつ不揮発な半導体量子スピントロニクスデバイスを実現することを目標としている。半導体で観測される現象の中でも特に、GHz～THzの高速な物理現象である共鳴トンネル効果(量子サイズ効果)に注目し、強磁性半導体ナノ構造や半導体中に強磁性ナノ微粒子を埋め込んだ材料を用いて、共鳴トンネル効果とスピン自由度を組み合わせて、半導体ベースの超高速不揮発性メモリや再構成可能な超高速論理回路を実現することを最終目標としている。

本提案では、その中でも特に実現性が高いと期待されるスピン単安定双安定転移論理素子(Spin Monostable- Bistable transition Logic Element: Spin -MOBILE)の実現を第一の目的とする。Spin-MOBILEを用いた演算回路においては、磁化の向きを変えるだけで論理演算出力(AND, OR, NOR など)を不揮発的に書き換えることができる。その結果、従来よりも少ない素子数でコンピュータの演算回路を構成できる。本提案では、Spin-MOBILEを用いた回路を作製し、このような不揮発的な論理演算出力の書き換え動作を実証することを最終的な目的とする。Spin-MOBILEは数百GHzからTHzの大変高速な動作が可能である。さらに不揮発性を持ち合わせているため、従来の半導体デバイスでは困難であった高速かつ不揮発な動作が可能である。

2. 研究の進捗状況

本研究では、主に III-V 族および VI 族の強

磁性半導体である GaMnAs や GeFe をベースとした材料系を用いて Spin-MOBILE を実現する上で必要な基礎技術の研究を行っている。本デバイスを実現するための課題は大きく下記6項目ある。

- ①単一障壁構造におけるトンネル磁気抵抗効果の観測
- ②強磁性量子井戸を有するヘテロ構造におけるスピン依存共鳴トンネル効果の観測
- ③強磁性量子井戸を有するヘテロ構造における負性微分抵抗特性の観測
- ④強磁性量子井戸を有するヘテロ構造の3端子化、共鳴準位の制御
- ⑤Spin-MOBILE 基本動作の実証
- ⑥不揮発的論理演算出力書き換え動作の実証

GaMnAs に関しては、本研究において①②④の課題が克服された。さらに下記に示すように、本材料系に関する新たな知見が本研究により初めて明らかにされ、新たな展開へと結びついている。GeFe に関しては、まだその多くの基礎物性が不明であり、デバイス応用上、多くの困難を抱えている。

3. 現在までの達成度

- ①当初の計画以上に進展している(理由)

従来、強磁性半導体(その原型とも言える材料が GaMnAs である)は、本提案のような

デバイスには大変適した唯一の材料系であると、10年以上にわたり世界的に考えられてきた。ところが、本研究において、GaMnAsにおける共鳴トンネル効果の研究を進めていく過程で、従来の一般的な考え方と実際のバンド構造が大きく異なっていることが明らかになってきた。得られた結果は、本研究で目的としているデバイス応用上は好ましくない結果であるが、本研究で得られたこの新しいバンド描像自体は、従来の強磁性半導体の概念自体を大きく変えるものであり、学術的な価値は極めて高いと考えている。この結果は、Phys. Rev. Lett.誌、Nature Physics誌にも掲載され、また、本結果に関する筆者の国際学会招待講演も多く、国際的にも高く評価されている。

4. 今後の研究の推進方策

InGaMnAs や InMnAs などの他の強磁性半導体材料についても、共鳴トンネル分光法を用いてバンド構造を詳細に調べ、上記デバイスの実現にふさわしい材料系の探索を幅広く行い、デバイス応用への活路を見出す。

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 13 件)

- ①P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka, S. E. Barnes, and S. Maekawa, "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions", Nature **458**, 489-493 (2009).
- ②S. Ohya, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka, "GaMnAs-based magnetic tunnel junctions with an AlMnAs barrier", Appl. Phys. Lett. **95**, 242503 (2009).
- ③ 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 (2010).
- ④S. Ohya, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Valence-Band Structure of the Ferromagnetic-Semiconductor GaMnAs Studied by Spin-Dependent Resonant Tunneling Spectroscopy", Phys. Rev. Lett. **104**, 167204 (2010).
- ⑤P. N. Hai, S. Ohya, and M. Tanaka, "Long spin-relaxation time in a single metal nanoparticle", Nature Nanotech. **5**, 593 - 596 (2010).
- ⑥S. Ohya, K. Takata, and M. Tanaka, "Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs", Nature Phys. **7**, 342-347 (2011).

[学会発表] (計 56 件 うち招待講演 10 件)

- ①大矢 忍、宗田伊理也、フナムハイ、高田健太、田中 雅明；2010 年春季応用物理学学会関連連合講演会 シンポジウム「スピントロニクスデバイスの新展開」18p-ZJ-8, "強磁性半導体 GaMnAs ヘテロ構造におけるスピン依存伝導", 東海大学、2010 年 3 月 18 日 (招待講演)
- ②S. Ohya (invited), "Spin-dependent Resonant Tunneling in III-V-based Ferromagnetic-Semiconductor Quantum Heterostructures", 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008), F-10-2, Tsukuba International Congress Center, Japan, Sep 26, 2008.
- ③S. Ohya, P. N. Hai, and M. Tanaka (invited), "III-V-Based Ferromagnetic Semiconductor and Magnetic Heterostructures", Asian Magnetism Conference 2008 (ACM 2008), BB-4, Paradise Hotel, Busan, Korea, Dec. 11, 2008.
- ④S. Ohya (invited), "Valence-band structure of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs investigated by resonant tunneling spectroscopy", Applied Physics Society (APS) March Meeting 2011 T15.00001, Dallas, USA, March 23, 2011.

[図書] (計 2 件)

- ①M. Tanaka and S. Ohya, "Spintronic Devices Based on Semiconductors", Bhattacharya P, Fornari R, and Kamimura H, (eds.), Comprehensive Semiconductor Science and Technology, volume 6, pp. 540-562, Amsterdam: Elsevier.
- ②M. Tanaka, S. Ohya, Y. Shuto, S. Yada, and S. Sugahara, "IIIV and Group-IV-Based Ferromagnetic Semiconductors for Spintronics", In: Andrews DL, Scholes, GD and Wiederrecht GP (eds.), Comprehensive Nanoscience and Technology, volume 4, pp. 447-462 Oxford: Academic Press. 2011 Elsevier.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

- S. Ohya et al., Nature Phys. **7**, 342-347 (2011) に掲載された論文記事について、様々なメディアで報道された：「東大、様々な強磁性半導体 GaMnA 試料においてフェルミ準位の位置とバンド構造を系統的に解明」、日経プレスリリース、マイコミジャーナル、YAHOO! Japan ニュース、chem-index、Goo マネー、東大プレスリリースなど