

平成 22 年 5 月 6 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048019

研究課題名（和文） スピン流と機能・制御 調整班

研究課題名（英文） Spin Current, Functions and Control

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：スピン流、スピン偏極電流、スピン流高周波、光スピントロニクス

1. 研究計画の概要

本研究は、特定領域研究「スピン流の創出と制御」の中の研究項目 A 0 5「スピン流と機能・制御 調整班」である。本研究課題では、スピン流にかかわるさまざまな物理的信号の制御や変換の原理とその機能を探索し、新規デバイスの提案とその機能の実証研究に加え、連絡調整を行う。領域内の各班と連携しつつ、スピン偏極電流制御デバイス、スピン流高周波・熱デバイス、光スピントロニクス機能デバイス、スピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計の理論、計 4 グループで研究を行う。スピン流と機能・制御に関する研究動向調査や研究戦略の策定を行い、班内における情報交換や共同研究を促進させる。

2. 研究の進捗状況

(1) スピン偏極電流制御デバイス

- 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 比の中では最も高い値である。

- 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、他の量子効果スピントロニクスの実現につながると期待される。
- 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ン 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。
- 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。

(2) スピン流高周波・熱デバイス

強磁性トンネル接合における更なる高周波発振のために反強磁性結合した多層膜のスピン波モードの測定を行った。その結果、磁性層間の結合モードを観測することに成功した。同様に垂直磁気異方性を用いて更なる高周波化を図るために垂直磁気異方性を

持つ膜を作製しそのスピン波モードの測定を試みた。その結果、ウェーブガイド法により測定が可能であることを確認した。スピン流の熱的な性質を研究するために、Boltzmann 方程式に熱の効果を取り入れることを試み表式を得た。

(3) 光スピントロニクス機能デバイス

- ・ エピタキシャル MnSb 薄膜を用いたハイブリッド光アイソレータを実証し、その伝搬損失をゼロにすることにめどをつけた。これにより、ハイブリッド光アイソレータを用いた磁化制御双安定半導体レーザへの実現に向けて前進した。(領域内共同研究)
- ・ 半導体光位相変調器の偏波依存性を利用して電気光学偏光変調を実現し、合わせてハイブリッド光アイソレータの非相反位相変化の評価手法を確立した。
- ・ Co 添加 TiO₂ の磁気光学性能指数を評価し、ハイブリッド光アイソレータへの応用可能性を明らかにした。(領域内共同研究)

(4) 偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計の理論・設計

微小な磁性体を用いてデバイスを作成する場合、磁性体の熱安定性が問題となる。シミュレーションで熱安定性を評価する場合、実験と同様に磁化反転電流と反転時間の関係より見積もる手法が一般に用いられている。但し、熱の効果が支配的となるマイクロ秒程度以上の時間に渡るシミュレーションが必要となり、莫大な計算時間が必要となる。この問題を解決するために計算に特化した CPU を用いて高速化を行なったところ、20 倍以上の高速化を実現することができた。

研究会・成果発信など： 代表者および分担者らのグループは2007年10月、2008年2月、2008年7月、2009年1月、2009年8月、2010年1月に行われた本特定領域研究会、および学会・研究会等において、最新の研究成果の発表と討論を行い情報交換を行うなど、活発な活動を行い、順調に成果を挙げている。

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) 上記の4項目において、最新の研究成果の発表と討論を行い情報交換を行うなど、活発な活動を行い、きわめて質の高い成果を挙げている。本研究代表者の田中を組織委員長として、平成22年(2010年)8月に「半導体におけるスピン関連現象の物理と応用」国際会議を東京大学本郷キャンパスにおいて開催する。

4. 今後の研究の推進方策

上記の4項目それぞれについて、さらに知見

を深め、スピン偏極電流制御デバイス、スピン流高周波・熱デバイス、光スピントロニクス機能デバイス、スピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計の理論について、その学理を確立し応用可能性を示す。引き続き研究会や学会、国際会議等を通じて情報交換や共同研究を活発化させる。

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] 代表的な5編を記載

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, 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).

H. Shimizu, S. Yoshida, and S. Goto, "Semiconductor Waveguide Optical Isolators towards Larger Optical Isolation utilizing Nonreciprocal Phase Shift by Ferromagnetic Co", *IEEE Photonics Technology Letters*, **20** (18), pp. 1554-1556, (2008).

T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata, and Y. Nakano, "First Semiconductor Waveguide Optical Isolator Incorporating Ferromagnetic Epitaxial MnSb for High Temperature Operation", *Applied Physics Express*, **1**, 022002 (2008).

Y. Nakatani, J. Shibata, G. Tataru, H. Kohno, A. Thiaville, and J. Miltat, "Nucleation and dynamics of magnetic vortices under spin-polarized current", *Phys. Rev. B* **77**, 014439 (2008).

[学会発表] 代表的な1件を記載

M. Tanaka, P.N. Hai, and S. Ohya (invited), "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with zinc-blende MnAs nanomagnets", 4th International Workshop on Spin Current and the 2nd International Workshop on Spin Caloritronics, Sendai, February 8-10, 2010.

[図書] 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.