

リコンフィギャラブル・ナノスピndeバイs

Reconfigurable Nano-Spin Devices

田中 雅明 (TANAKA, MASA AKI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

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sの基盤技術を開発することを目指している。スピnde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s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s; (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s、(2) III-V族半導体をベースとした接合型スピnde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ndeランジスタ、について研究を行っている。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：スピndeトロニクス

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスの屋台骨を支えているシリコンデバイス・集積回路は、過去30年以上にわたって微細化・高集積化の一途をたどってきたが、微細化による高性能化が極限近くにまで進んでおり、あと10年程度で限界に達することは明らかである。さらに、通常の半導体では不揮発的な情報の読み書きを高速に行えないため、低速な(しかも機械動作を含むため信頼性が低く電力を食う)ハードディスクなどの外部記録装置を併用しなくてはならず、情報通信・情報処理技術の自由度は必ずしも十分ではない。大容量化、高速化、低消費電力化、高信頼性等、さまざまな情報処理に対する要求が急速に高まりつつある中、従来の半導体エレクトロニクスは早晩限界に達する恐れがある。

2. 研究の目的

本研究はこのような閉塞状況を少しでも打破するために、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sを開発しようとするものである。本研究計画では、スピnde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、その動作を示すことを目的としている。具体的には、材料開発からはじめ、次の3つのタイプのデバイsを試作する。

[1] IV族半導体をベースとした MOSFET 型のスピndeバイs(スピnde MOSFET)

[2] III-V族半導体をベースとした接合型スピnde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ndeランジスタ

3. 研究の方法

本研究では、すでに存在する材料やデバイsを単に組み合わせるのではなく、1) IV族半導体ベース、2) III-V族半導体ベース、3) 強磁性微粒子、といったスピnde機能材料のそれぞれにおいて、結晶成長による新材料や新しいヘテロ構造・ナノ構造の作製、物性評価・探索と制御、デバイスプロセスの開発と試作、デバイス物理の探索と確立を目指した研究を一貫して行い、リコンフィギャラブルな機能をもつナノスピndeバイsの基盤技術を確立することを目指している。

4. これまでの成果

[1] IV族半導体をベースとした MOSFET 型のスピndeバイs(スピnde MOSFET)

(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nde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。

(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。

以上 (1)~(4) は IV 族スピントロニク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。

[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

(5) III-V 族ベース・スピン機能半導体材料 (GaMnAs, InGaMnAs) については、Mn 添加濃度を飛躍的に高めること、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ントロニクスの発展に寄与する成果である。

[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

(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、クーロンブロックードによる 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 $10 \mu s$ 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ード効果による 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。

5. 今後の計画

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ンドバイスの基盤技術を確立する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

発表論文 40 編のうち、代表的な論文 5 編

- 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. B* 75, 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).

受賞

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/>