

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656006

 研究課題名（和文）スピントロニクス素子におけるスピン反転の  
中間状態観測とその制御経路の探索

 研究課題名（英文）Study for Intermediate States of Spin Flip  
in Spintronics Devices and its Applications

研究代表者

遠藤 哲郎 (Endoh Tetsuo)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 00271990

研究成果の概要（和文）：超高速電気特性測定技術を用いて、スピンドバイデバイス中におけるスピン反転過程の中間状態の観測と解析を行った。その結果、スピントロニクスデバイス中においては、スピンはその反転過程において多様な中間的状态を示すことを明らかとした。スピントロニクスデバイス中のスピン状態が単純に2値として一意的に定まるものではないことを意味し、スピン反転における中間状態を利用した新規スピン制御技術へつながる成果である。

研究成果の概要（英文）：Intermediate states of spin flip in the spintronics devices are observed by using the ultrafast electric measurement technique. As a result, a multiple intermediate states in spin flip process are indicated in the spintronics devices. This result leads the new control technique of spin flip, such as a multi valued operation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

 キーワード：スピントロニクス, スピン反転過程, スピン注入伝達式磁気トンネル接合素子, スピ  
ンダイナミクス, 電子トンネル, MTJ素子, 高速電気信号測定, ナノエレクトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は磁気トンネル接合素子（Magnetic Tunnel Junction, MTJ素子）などのスピントロニクスデバイスとCMOSに代表されるシリコンテクノロジーとの機能融合を目指し研究を進めてきた。その中で、スピントロニクスデバイスの電気的特性評価に、これまで培ってきたシリコンテクノロジーのための超高速電気特性測定技術を適用し、そのスピン反転を評価したところ、思いがけずスピン反転過程において、スピン状態が確定しない中間状態が存在することを示唆する結果を観測した。スピンドバイデバイスは従来、ス

ピンのアップ・ダウンの2状態を用いた2値が確定したデバイスとして、途中の遷移状態はないものとして扱われてきた。これに対して、我々の得た端緒となる結果は、スピン反転過程には中間状態があって、スピンの反転が途中で戻るような場合があるというものであり、従来の理論の枠組みでは理解できないものであった。このスピン反転過程を詳細に解析することは、スピン反転における中間状態を利用した新たなスピン制御技術へつながり、さらにスピンドダイナミクスに対する物理に新たな光を当て、この分野に新たな研究領域を拓く可能性があると考えられる状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、申請者の有する超高速電気特性測定技術を用いて、スピンドバイスにおけるスピン反転過程の中間状態の観測と、その詳細な解析を行い、これによりスピン反転制御に対する新たな知見を得て、新たなデバイス制御技術へつなげることで、およびスピンドダイナミクスに対する新たな研究領域を開拓することを目的として研究を展開した。将来のスピントロニクスデバイスにおいては、スピン反転の制御は本質的な課題である。しかし、その制御にとって不可欠なスピン反転過程の理解は、未だ不十分な状況である。実際、申請者が得たスピン反転過程における中間状態が、どのような条件で顕在化するのか、またその物理メカニズムは何によるのかを扱うための理論の枠組みは全く整備されていないのが現状であった。本研究では、これらの事項を、実験による観測、理論を両輪として、解析を進め、将来のスピントロニクスデバイスの設計指針を構築するための端緒を拓くことを目指した。

## 3. 研究の方法

従来のスピンドダイナミクスに対するアプローチは、極低温かつ雑音の無い、きれいな系に対して光学的手法を駆使するものが中心であった。しかし、現実のスピントロニクスデバイスは室温かつ複雑な構造を有するデバイスとして動作する。ゆえに、室温かつデバイスレベルでの評価による実際的かつ直接的なスピン反転過程の検討が求められている。図1に、スピントロニクス素子中の磁化反転過程の解明における課題を示す。本研究における超高速電気的特性評価による室温でのスピン反転観測は、この課題への解を与える最適なアプローチである。

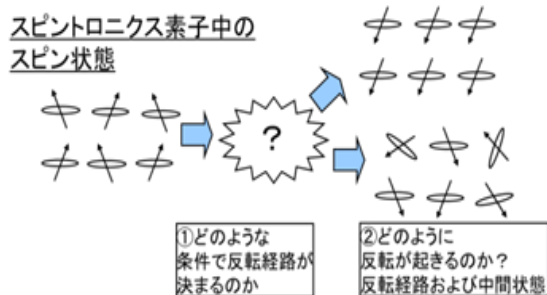


図1 スピントロニクス素子の磁化反転過程の解明における課題

具体的には、ピコ秒単位での超高速電気信号測定技術を駆使し、スピントロニクスデバイスにおけるスピン反転過程の観測とその解析を行った。スピン反転過程を電気信号により検出するのに最適な構造として、次世代不揮発性メモリの代表格であるスピン注入伝達式磁気トンネル接合素子を主な舞台とし、その磁化反転過程の観測を行った。これに加え、スピンドダイナミクスの理論面からの検討、得られた知見を踏まえた応用回路に関する検討を行った。

以下の手順でスピン反転の中間状態に対する理解とその発現条件を探索した。

### (1) スピン反転過程の観測:

スピン注入伝達式磁気トンネル接合素子(MTJ)の磁化反転過程の計測を行い、スピン反転の中間状態の観測を行うとともに、その発現条件の探索を行った。スピン注入伝達式磁気トンネル接合素子(MTJ)は、図2に示すように、電流によるスピントルクにより、スピン状態を平行状態と反平行状態の間で反転させ、これにより生じる抵抗の差を読み出すことでそのスピン状態を制御し、読み出すデバイスである。本研究では、電気的なデバイスの抵抗の変化の時間変化をピコ秒単位で計測することで、そのスピン反転過程を電気信号により観測した。

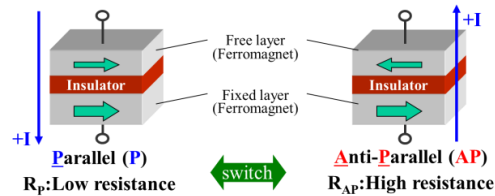


図2 スピン注入伝達式磁気トンネル接合素子(MTJ)の動作原理

### (2) スピン反転過程の中間状態の抽出とスピンドダイナミクスの理論的考察

MTJに代表されるスピントロニクス素子中の磁化反転過程における中間状態のデバイス応用を行うためには、それがどのような外部・内部の条件で反転経路が決まるのか、またそれがどのような経路を通り、どのような中間状態を形成するのか、その物理を明らかにすることが肝要である。実際に、スピンの占有状態のみを考えても図3に示すような様々なバリエーションが考えられる。上記(1)にて得られた実験結果を詳細に解析し、

スピン中間状態に関する情報の抽出を行うとともにそのスピンダイナミクスについて理論的考察を行った。

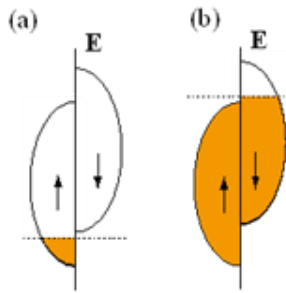


図3 スピンの占有状態の模式図

(3) スピン反転過程中間状態の顕在化条件の探索とその応用の検討

上記(1), (2)にて得た知見を総合し、スピン反転における中間状態についての条件を探索し、スピン反転における中間状態を能動的に得る方法およびそれを応用したデバイス・回路の検討を行った。

4. 研究成果

本研究は、研究代表者が培ってきたピコ秒単位での超高速電気的特性測定技術を用いて、スピントロニクスデバイス中のスピン反転過程の観測を行い、スピン反転における中間状態の観測と、その制御法の提案を目指し行われた。

(1) スピン反転過程の観測

スピン注入伝達式磁気トンネル接合素子(MTJ)の磁化反転過程の計測を行い、スピン反転の中間状態の観測を行うとともに、その発現条件の探求を行った。

本研究では、図3に示すように、電氣的なデバイスの抵抗の変化の時間変化をピコ秒単位で計測することで、そのスピン反転過程を電気信号による観測を行った。

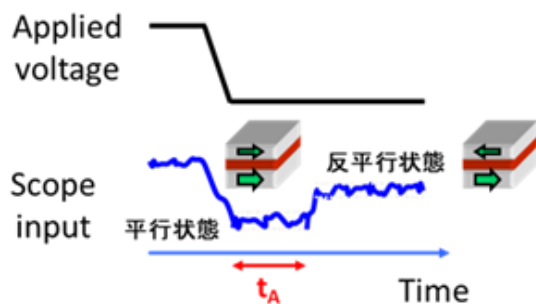


図4 スピン反転過程の電気信号による観測の模式図

MTJのスピン反転過程の途中状態と考えられる状態を複数観測することに成功した。これにより、所望の反転経路を得るための具体的な条件をスピン反転の物理にまで遡り探索し、スピン反転の制御指針の提案の端緒を得た。さらに、スピン反転過程の経路とその起源を次節で述べるように理論的に検討するとともに、そのデバイス応用への検討を進めた。

(2) スピン反転過程の中間状態の抽出

上記(1)にて得られた結果を詳細に解析し、スピン中間状態に関する情報を抽出し、測定条件とあわせ分類を行った。MTJ中の磁化反転過程におけるスピン反転経路がどのような外部・内部の条件で決まるのか、またそれがどのような経路を通り、どのような中間状態を形成するのか探索した。本研究では、ナノスケール中に高電界、高電子密度が実現しているMTJ素子中のスピン反転過程を扱うため、電子波束の量子ダイナミクスを検討することで、MTJ素子中のスピン反転過程の検討を行った。図5にスピントロニクス素子中の磁化反転過程解析のモデル、図6にそのモデルを用いた波束ダイナミクスによるMTJ素子のスピン反転ダイナミクスの理論的検討の結果の一例を示す。本モデルを用いた反転過程の解析により、これまで不十分であったナノスケールのスピントロニクス素子中での、スピン反転過程の物理の解明を進めるとともに、それを制御するための条件の探索を行い、今後の展開のための端緒を得た。

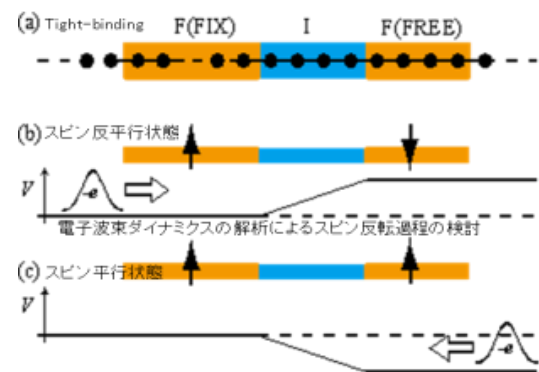


図5 スピントロニクス素子中の磁化反転過程解析のモデル

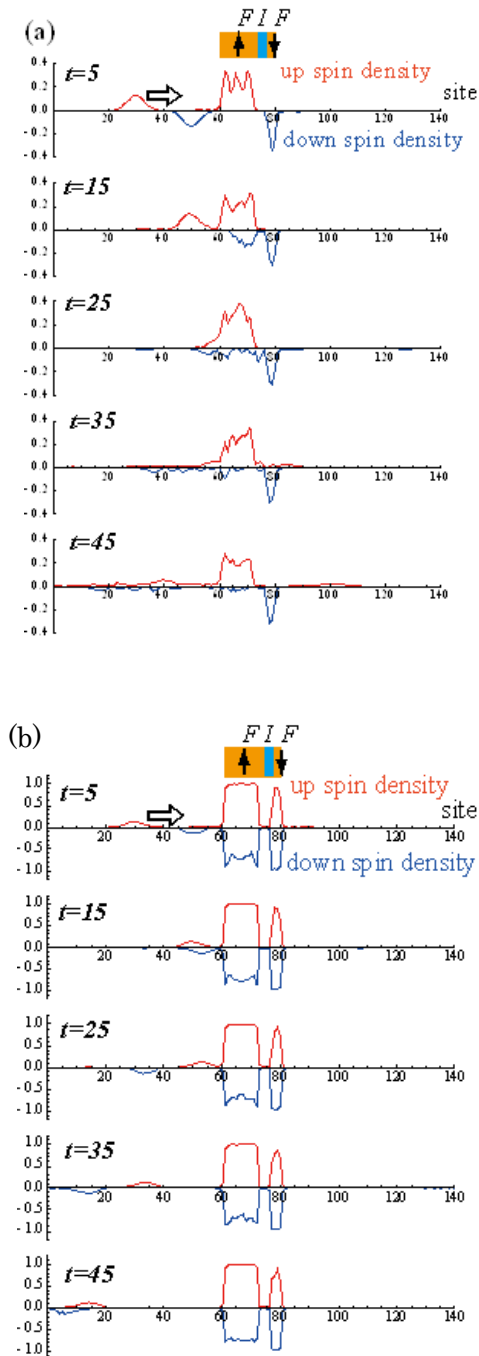


図6 波束ダイナミクスによるMTJ素子のスピンの反転過程の検討。スピン専有状態の異なるMTJ素子へ入射する電子波束のダイナミクスを検討。(a)up spin のみの場合、(b)up, down spin 両方が存在する場合。

(3) スピン反転過程中間状態の顕在化条件の探索とその応用デバイス・回路の検討

スピン反転過程に関して得られた知見を総合し、新たなスピン反転過程制御回路への応

用を探索し、スピン反転過程をより高精度かつ高速に検出するための回路の開発を進めた。その中で、将来の応用を見据え、非線形多次元画像特徴ベクトル処理のための非線形認識関数を自由に制御できる改良型コア回路の提案など応用へ向けた検討を進めた。

以上まとめると、平成 23 年度は、超高速電気的特性測定手法をスピントロニクスデバイスのスピン反転過程の観測へ適用し、スピン反転における中間状態の観測に挑戦した。具体的には、次世代不揮発性メモリの代表格であるスピン注入伝達式磁気トンネル接合素子を主な舞台とし、その磁化反転過程の観測を行った。その結果、スピン反転過程における中間状態と推定される状態を電氣的に観測することに成功した。さらにその物理描像を明らかにするための理論的解析を進めた。

平成 24 年度は、引き続き、スピン反転過程の観測を進め、スピン反転過程における中間状態の解析を実験・理論両面から行い、所望の反転状態を得るための電流・電圧の条件を探索した。スピン注入伝達式磁気トンネル接合素子において得られたスピン反転の制御指針をスピントロニクスデバイス一般の場合へ拡張するための検討を行った。加えて、将来の回路応用を見据えた研究へ展開した。

本研究により、スピントロニクスデバイス中において、スピンはその反転過程において多様な中間的状态を示すことが明らかとなった。スピンドバイスは従来、スピンのアップ・ダウンの2状態を用いた2値が確定したデバイスとして、扱われてきたが、この結果は、スピントロニクスデバイス中のスピン状態が単純な2値として一意的に定まるものではないことを、明らかにしたという意味で意義が大きい。これは、スピン反転における中間状態を利用した新たなスピン制御技術へつながると考えられる。今後この萌芽研究で得られた知見を基に、スピン反転過程の観測と解析を継続し、スピンドダイナミクス物理に新たな光を当て、この分野に新たな研究領域を拓くべく研究を発展させていく。

5. 主な発表論文等  
[学会発表] (計1件)

1. Yijie Xiong, Yitao Ma, and Tetsuo Endoh, "A Flexible Adaptive Matching Cell Circuit with Bell-Shaped Similarity Evaluation Function for High-Speed Low

Power Nonlinear Pattern Recognition  
Systems, 2013 International Workshop on  
Nonlinear Circuits, Communications and  
Signal Processing NCSP' 13, pp. 624-627,  
Island of Hawaii, Hawaii, USA., March 7,  
2013

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遠藤 哲郎 (Endoh Tetsuo)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 00271990