

平成21年 5月 15日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19860048

研究課題名（和文）ナノ磁性粒子間スピントランスファー効果に関する研究

研究課題名（英文）Spin-transfer effect in ferromagnetic nano-granular systems

研究代表者 野崎隆行（NOZAKI TAKAYUKI）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号 60452405

## 研究成果の概要：

本研究では、人工的な作製が困難なオーダーである数十～数 nm サイズの微小磁性体におけるスピンの角運動量移行効果を実現する事を目的として、自己組織化を利用したグラニューラ構造（非磁性金属母相中に磁性微粒子が分散した構造）におけるスピン注入効果の電氣的直接検出を試みた。初年度は、Co-Cu グラニューラ膜中の Co 粒子へのスピン注入、次年度は磁性微粒子を有する 2 重トンネル接合におけるスピン注入を行い、それぞれスピン注入効果による抵抗変化と考えられる信号の検出に成功した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,360,000	0	1,360,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：スピントロニクス, ナノ磁性粒子

## 1. 研究開始当初の背景

ユビキタスネットワークの急速な普及により、いかに大容量の情報を高速でかつ低消費電力で処理するかが重要なテクノロジーとなっている。このような環境を実現するためには、待機電力を極限まで低減可能な不揮発性を有する新規メモリの開発が必須であり、スピン依存伝導を利用したスピントロニクスデバイスがその有力候補として期待さ

れている。特に、強磁性金属層 / 非磁性層 / 強磁性金属層のサンドイッチ構造を基本とする巨大磁気抵抗 (GMR) 素子やトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子は、小さな外部磁場で大きな抵抗変化を誘起可能であることから、そのキーデバイスとなる。このような素子の磁化状態を低消費電力で制御する方法として、スピン注入効果の利用が検討されている。これは、伝導電子スピンと局在磁気モーメント間のスピンの角運動量移行効果（スピントランスフ

アール効果)によって、直接的な相互作用を利用して磁化反転を誘起する方法であり、これまでの研究において、100nm オーダーに加工された GMR および TMR 素子においてスピントランスファー効果によるスピン注入磁化反転、高周波発振、ダイオード効果などが報告されている。

## 2. 研究の目的

上述した通り、これまでのスピントランスファー効果の研究は人工的に微細加工を施したピラー構造が中心であり、100nm オーダーのサイズを対象としていた。しかしながら、数十～数 nm オーダーの微小な強磁性セルを作製することは現状の微細加工技術では容易ではなく、このサイズ領域でのスピントランスファー効果に関しては未開拓分野であった。そこで本研究課題では、自己組織化を利用したボトムアップ型の方法により作製した磁性微粒子へのスピン注入を試み、その電氣的検出を目指した。

## 3. 研究の方法

初年度の研究においては、GMR 効果の初期研究においてすでに確立されている、強磁性金属/非磁性金属グラニューラー構造を用いた磁性微粒子の作製、および微粒子へのスピン注入を試みた。分子線エピタクシーにより、スピン注入源となる Co 層、およびグラニューラー層と磁氣的な分離のための Cu 層を成膜した後、Co と Cu の共蒸着を行い、Cu 母相中に Co 微粒子が分散したグラニューラー薄膜を作製した。その後、この薄膜を幅が数  $\mu\text{m}$  ～サブ  $\mu\text{m}$  の細線に微細加工を施し、細線の両端に、コプレーナウェーブガイド型に設計した 2 端子を配することで、電流印加可能な構造とした。この素子に高周波電流を印加しながら、バイアスティーを介して直流電圧を測定する“スピントルクダイオード”効果を利用したスピントルク検出を試みた。

2 年目では、磁性微粒子へのスピン注入パスをより制限させることを目的として、縦型構造の作製を試みた。具体的には、エピタキシャル Fe/MgO/Fe 微粒子 /MgO/Cr 構造を分子線エピタクシー法により成長させた。MgO 上に作製した超薄膜 Fe は熱処理を施すことによって凝集し、ナノオーダーの微粒子化させることが可能である。MgO 層は膜厚 0.8nm に制御し、下部 Fe からスピンを注入する構造となっている。この素子をサブ  $\mu\text{m}$  オーダーのピラー型素子に微細加工を施し、TMR 効果を利用して、微粒子へのスピントランスファー効果を調べた。

## 4. 研究成果

まず、初年度に行った、グラニューラー細線

におけるスピントランスファー効果の成果について報告する。

研究の方法において述べた通り、本研究では、Co / Cu / Co<sub>10</sub>-Cu<sub>90</sub> グラニューラー構造の薄膜を細線構造(幅 2  $\mu\text{m}$ )に微細加工を施し、電流を印加した時の、下部 Co 層からグラニューラー中 Co 粒子へのスピントランスファー効果について、スピントルクダイオード測定により調べた。スピントルクダイオード効果とは、高周波電流の印加 (=スピン注入)によって生じる抵抗振動と、同周波数の電流の積によって発生する直流電圧を検出する方法である。図 1 に測定回路の概略図を示す。

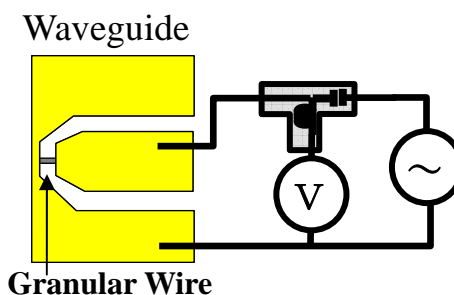


図 1 スピントルクダイオード効果測定回路

ウェーブガイド型に設計された電極に高周波信号発生装置からバイアスティーを介して高周波電流を印加し、素子から発生した直流電圧を電圧計により検出する。実際には、測定感度向上のため、印加高周波電流を振幅変調し、出力電圧をロックイン検出している。

図 1 に、外部磁場を 45 度方向に 2000 Oe 印加した場合のダイオード信号の例を示す。比較として、グラニューラー層を除いた、Co / Cu 構造で同じ設計に微細加工を施した細線からの信号の例についても同図中に示した。

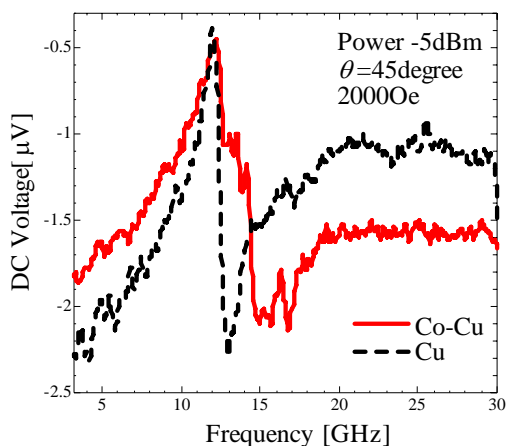


図 2 グラニューラー細線におけるダイオード効果

両データに共通して 12GHz 付近に強いピーク構造が見られる。これは、下部 Co 層単層から生じるダイオード信号である。一方、グラニュー層を有する素子においては、そのピーク構造がブロード化していることが分かる。これは、グラニュー層中 Co 微粒子の異方性が分散していることに起因していると考えられ、Co 下部層から Co 微粒子へスピントランスファー効果が生じていることを間接的に示唆している。しかしながら、Co 単層から生じる信号との完全な分離には成功しておらず、かつ幅  $2\mu\text{m}$ 、長さ  $10\mu\text{m}$  の細線中には無数の微粒子が含まれているため、その平均的な効果しか検出することができない。そのため、より直接的に限定された微粒子の挙動を検出する手法が望まれる。

以上の理由から、2 年次には、縦型素子における磁性微粒子へのスピン注入効果に関する結果を行った。以下にその詳細を報告する。

実験の手法において述べた通り、絶縁層状に形成される島状粒子を有する 2 重トンネル接合素子の作製を試みた。具体的には、MgO(001) 基板上に Fe(50) / MgO(0.8) / Fe(2) / MgO(0.8) / Cr(10) / Ta(5) (単位は nm) 構造を、分子線エピタクシーによりエピタキシャル成長させた。図 3 に MgO 上 Fe(2nm) を 200 度でアニールした後の表面を AFM (原子間力顕微鏡) により観察した結果を示す。

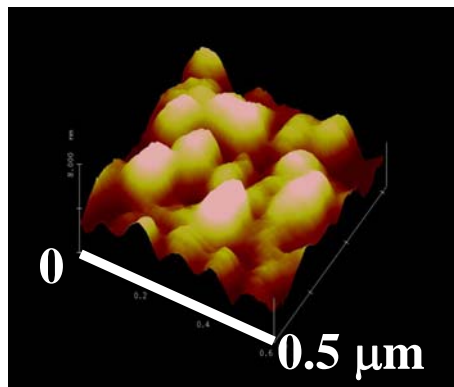


図 3 MgO 上 Fe 微粒子の AFM 像

2nm の Fe 膜にアニールを施した結果、凝集により微粒子が形成されていることが確認された。微粒子のサイズは直径 20~100nm 程度で分布しており、100nm オーダーの比較的大きい直径を有する粒子は  $500 \times 500 \text{ nm}^2$  の領域に 8 個程度存在することが分かった。このトンネル接合構造膜を  $500 \times 600 \text{ nm}^2$  のピラー型に微細加工を施し、TMR 素子を作製した。図 3 に TMR 曲線の一例を示す。

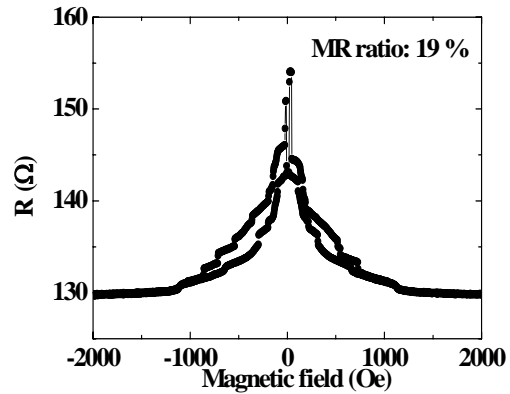


図 4 Fe 微粒子を中間層に有する 2 重トンネル接合の TMR 曲線

Fe 微粒子の磁化過程に起因して、飽和特性の悪いヒステリシスとなっているが、非常に薄い MgO 厚にも関わらず約 20% の磁気抵抗効果が得られた。特徴的な点は、抵抗変化がステップ状に変化していることであり、これは個々の微粒子の反転過程を反映していると考えられる。

次に、外部磁場印加下での素子抵抗 ( $R$ ) の印加電流 ( $I$ ) 依存性を調べた結果を図 5 に示す。

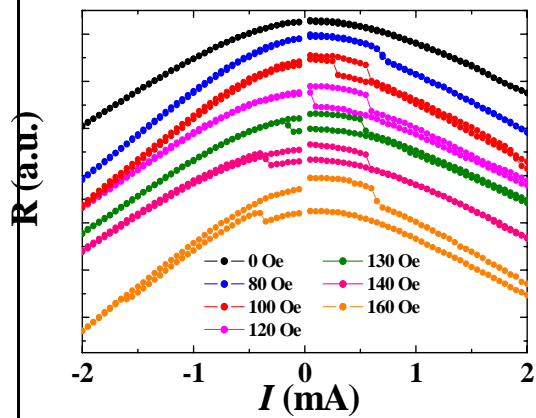


図 5 Fe 微粒子を中間層に有する 2 重トンネル接合の電流-抵抗曲線

外部磁場は 0~160 Oe で変化させた。100 Oe 以上の外部磁場下において、 $I$ - $R$  曲線中に明瞭なヒステリシスが観測されていることが分かる。下部 Fe 層は 50nm と厚く、かつ連続膜であることから、電流印加によって磁化状態が変化することは考えにくい。そのため、この変化は中間微粒子の磁化状態が変化したことを反映した信号であると考えられる。問題は抵抗変化の起源が電流磁場によるものか、スピントランスファー効果によるものか

という点である。AFMの結果を元に、印加電流値を単一の磁性微粒子での電流密度に換算すると約 $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>となり、このオーダーの電流によって発生する磁場は50e程度と見積もられる。これは微粒子の磁化反転を誘起するには非常に小さいことから、観察された抵抗変化が電流磁場に起因するとは考えにくく、スピントルクによる反転であると考えられる。スピントランスファー効果による反転電流密度としては比較的小さい値であるが、これは形状異方性などが小さい等方的な微粒子であるため熱安定化定数が小さくなっていることが原因と考えられる。

一方、単一素子中には8個程度の粒子が含まれているにも関わらず、今回観測されたヒステリシスは1つのみであった。これは、直径の大きい粒子に集中的に電流が印加されることによる不均一性が原因であると考えられる。今後は、粒子径の均一性を上げ、かつ素子サイズをより小さくすることで、再現性のあるスピン注入磁化反転を実現することを目指し、さらには、高周波電流印加によるスピントルク誘起ダイナミクスの検出へと繋げたい。

## 5. 主な発表論文等

(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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

題目：グラニューラー細線におけるスピントルクダイオード効果の測定

発表者：和田朋之，野崎隆行，太田健太，丸山拓人，野内亮，白石誠司，新庄輝也，鈴木義茂

第68回応用物理学会学術講演会

2007年9月4日～8日 北海道工業大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野崎隆行 (NOZAKI TAKAYUKI)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号 60452405