

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360122

研究課題名（和文）遷移金属—希土類非晶質垂直磁化膜を用いた磁壁の電流駆動とテラビット記録への応用

研究課題名（英文）Current driven domain wall motions in rare earth transition metal alloys and its application toward tera bit information storage

研究代表者

劉 小晰 (LIU XIAOXI)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：10372509

研究成果の概要（和文）：本研究では新規材料として、電流駆動磁壁移動の閾値電流密度が従来の材料の 100 分 1 である TbFeCo 非晶質垂直磁化膜を提案するとともに、新たなスピントルクを利用した情報ストレージデバイスの基盤技術を開発することを目的としている。具体的には、薄膜組成、磁気異方性、膜厚と臨界駆動電流密度、磁壁の移動速度そしてスピン分極率の関係を明らかにした。これによって次世代の小型大容量・高密度・低消費電力の不揮発性の情報ストレージデバイスの開発のための基礎技術を確立した。

研究成果の概要（英文）： One of the fundamentals in spintronics is that the magnetic domain walls can be driven by spin polarized current. Such phenomena indicate that the magnetic reversal can be achieved by current directly rather than by magnetic field. However, the critical current to drive the domain walls is as large as  $10^{12}$  A/m<sup>2</sup> in normal magnetic materials. In this research, we found the critical current density can be decrease to 1/100 by using rear earth transition alloys with perpendicular magnetic anisotropy. We have investigated the films composition, magnetic anisotropy, and its effect on critical current density. We have also developed a new process to measure spin polarization in the wires. Our results show that rear earth transition alloys with perpendicular magnetic anisotropy are prominent candidate for next generation information storage devices with extremely high density.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2011 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2012 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子・電気電子材料工学

キーワード：スピントロニクス、情報記録、磁性細線

## 1. 研究開始当初の背景

高密度・大容量・高速・低消費電力の情報ストレージデバイスは、ユビキタス IT 化社会

では重要な役割を果たしており、将来もその役割は変わることが無い。現在の情報ストレージの主役であるハード・ディスク・ドライブ（HDD）の記録密度の飛躍的な増加してきた。

日本で誕生した垂直磁気記録技術が 2005 年に市場に投入され、当分の間記録密度は年率 40%増で推移すると考えられる。しかしながら、機械的に駆動している HDD はデータの書き込み・読み出し速度は遅く、耐衝撃性は弱いなどの問題がある。更に、記録ビットの微細化による熱的な安定性の問題も遠くない将来に必ずやって来る。高密度記録のための HDD の将来技術としてはパターン化媒体や熱アシスト記録があるが、一平方インチあたり数テラ〜10 テラ( $10^{12}$ )ビットと言う超高密度記録が必要な次世代においては電流駆動型磁壁メモリーが最も有望である。このメモリーの特徴は、磁区と磁区の間形成される磁化スピンの方向の遷移領域、つまり磁壁に対して電流スピンの直接作用し、スピントルクによって磁壁が移動(換言すれば、磁化反転領域が変化)するものである。一般的な強磁性材料において、磁壁を電流駆動するための最小値、つまり閾値電流密度は約  $10^{12}$  A/m<sup>2</sup> と非常に大きい。この磁壁メモリーの実現性は、低閾値電流密度を有する新規材料の発見・開発が、スピントルク現象を利用した新規磁気メモリーデバイスの実現のための必須課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では、電流による磁壁の直接駆動制御を技術の核として、閾値電流密度の極めて低い材料の開発及びその情報ストレージデバイスへの応用のための基盤技術を開発することを目的としている。具体的には：

①電流駆動による磁壁の移動速度とスピントルク： 磁壁の移動速度は素子やメモリーの動作速度を決定する。4f 電子が介入したフェリ磁性材料である TbFeCo に関して、スピンと 4f 電子の軌道相互作用は重要である。本研究では、TbFeCo 垂直磁化膜の中の電流駆動による磁壁の移動速度を測定するとともに、Gd,Dy など希土類材料を添加し、スピンと 4f 電子の軌道相互作用を調整することによって、4f 電子が介入したフェリ磁性材料中のスピントルクの定性的な理論を確立する。これによって、微小な閾値電流密度を持つ材料の開発指針を得る。

②磁壁のピン止めと電流駆動による複数磁壁の位置制御： 磁気記録の基本は、微小磁石の“N 極”、“S 極”を用い、“1”や“0”の情報を記録している。それ故、磁壁が安定に存在できる場所を確保する必要がある。本研究では、ナノワイヤに対して簡易でしかも有効な磁壁のピン止め構造を付与する。磁壁を電流駆動しながら、多数の磁壁(つまり多数ビット)の電流駆動による位置制御方法を確立する。

③ジュール熱の評価： 低閾値電流密度とい

えども、電流印加によってナノワイヤの発熱を考慮した検討も必要である。ここでは、ジュール熱と磁壁移動に関する閾値電流密度やナノワイヤそのものの磁気特性の温度依存性、記録ビットの熱的安定性、そして基板材料との関係を明らかにし、再現性の高い電流駆動方式を確立する。

## 3. 研究の方法

①下地層および酸化防止層に関する検討。薄膜の形成はスパッタリング法を用いて行った。希土類金属である Tb は非常に酸化しやすいため、本研究では窒化物絶縁薄膜である AlN、TiN 層、金属薄膜の Ta などを酸化防止層として検討した。これまで TbFeCo 薄膜中の磁壁移動のしやすさは、下地層の平坦さにも依存することを明らかにした。下地層の最適作製条件を検討した。

②スピン分極率の組成依存性に関する検討。電子の上向きスピンと下向きスピンの状態密度の差から定義されたスピン分極率は、電流駆動磁壁移動の効率を左右する基本的なパラメーターである。本研究では、この材料のスピン分極率の組成依存性に関して研究を行った。また、磁壁駆動ための閾値電流が飽和磁化に依存するため、ここでは薄膜組成全般を詳細に検討した。低飽和磁化で磁気異方性の大きな組成領域を見出すとともに、スピン分極率の組成依存性を明あきらかにした。スピン分極率の測定は、磁壁抵抗効果を用いて測定を行った。

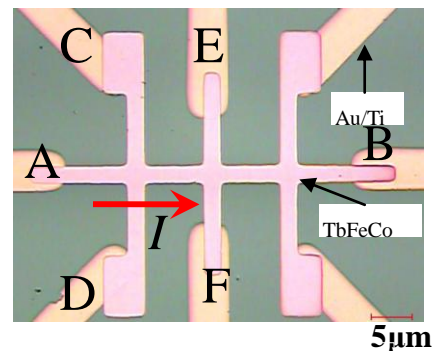


図1. 素子の回路図。

③微細加工および測定方法に関する検討。記憶素子への応用の基礎実験として TbFeCo のナノワイヤが必要である。ここでは電子ビームリソグラフィやフォトリソグラフィおよび Focused Ion Beam (FIB) 装置(全て現有設備)を用いてナノワイヤを形成した。磁壁の電流駆動による移動速度を正確に測ることが高速メモリーへの応用の重要な課題である。本研究では、TbFeCo 材料の大きな異常ホール効果を利用し測定した。具体的には、図1に示す素子を構成する。同図で電流導入電極 AB 間に電流を流す。CD、EF 間はホール効果による電圧を測定する端子である。

CD、EF 間に生じる電圧の時間差を測定することにより、磁壁の移動速度を求めることが出来た。図 1 の構造の大きな特徴は、AB、CD 間で同時に電流を印加することによる、AB 間に容易に磁壁の導入可能である点にある。

#### ④複数磁壁の位置制御と自己組織化磁壁ピンニングサイト

垂直磁化を用いた磁壁電流駆動をデータ情報ストレージに応用する場合は、磁壁を記録したい特定のところに移動可能なようにしなければならない。本研究では局所イオン注入の手法を用いて、磁壁の有効なピン止め及び複数磁壁の位置制御を検討する。局所イオン注入後、薄膜の表面の形状変化や磁気特性の変化を確認する。

### 4. 研究成果

#### ①閾値電流密度

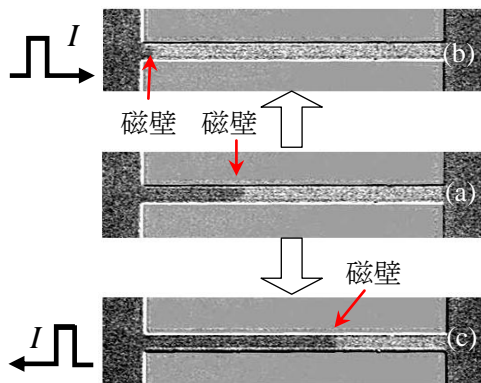


図 2 Kerr 顕微鏡による TbFeCo 細線中の磁壁と電流方向  
(a) 電流印加前  
(b) パルス電流を右方向に印加  
(c) パルス電流を左方向に印加

垂直磁化 TbFeCo マイクロワイヤ中の磁壁に電流を印加し、磁壁の振舞いを観測したところ、図 2 に示すように、印加電流の密度が  $1.5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  (しきい値) 以上になると、磁壁が電流の向きに依存して移動する現象を確認できた。

②局所イオン注入および保磁力の局所制御  
本研究では、局所イオン注入の手法を用いて、磁壁の有効なピン止め及び複数磁壁の位置制御を行ったところ、図 3 に示すように、一般的な磁性材料の場合は、局所イオン注入により保磁力の低減が報告されたが、本研究は、イオン注入量の精密な制御により、保磁力の増加を明らかにした。

#### ③磁壁抵抗効果とスピン分極

上記の②の手法を用いて、図 4 の右上に示すように、磁性細線中に縞状磁壁の導入をできた。これらの磁壁の磁気抵抗効果を確認した

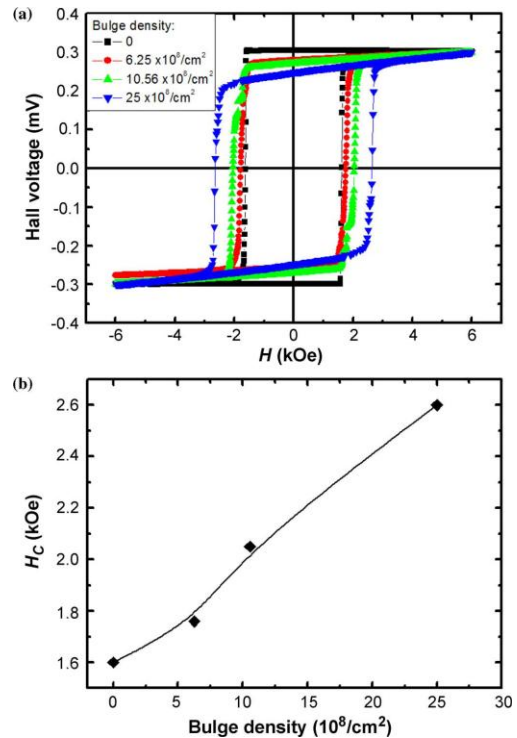


図 3. イオン注入量と薄膜保磁力の関係。

ところ、図 3 に示すように、磁壁の抵抗効果を確認できた。実験結果から、TbFeCo 垂直磁化細線中の磁壁抵抗効果は約 18% と極めて高いことを明らかにした。一般的には、高いスピン分極率有する材料では、高い磁壁抵抗効果の観察はできる。つまり、本研究の結果では、TbFeCo 材料の中には、高いスピン分極率を有することを示している。

#### ③反強磁性結合薄膜と電流駆動磁壁移動速度

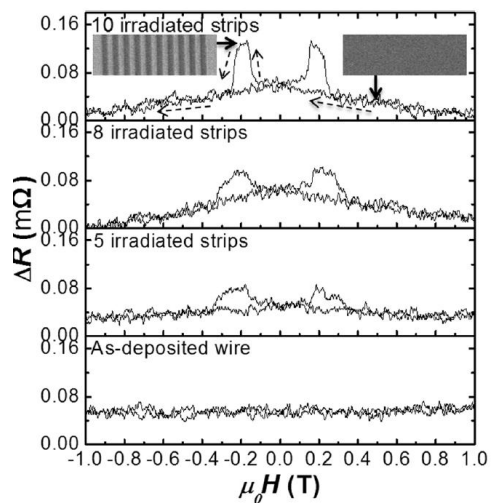


図 4. 縞状磁壁および磁壁抵抗効果。

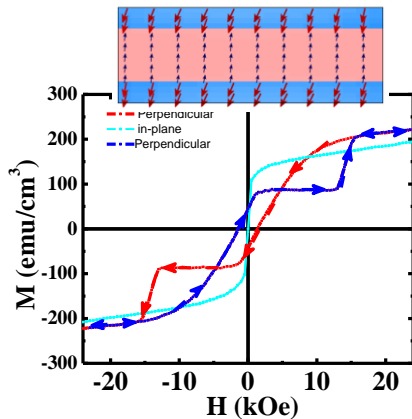


図 5. 反強磁性結合 3 層磁性細線の特性。

本研究では、TbFeCo 磁性細線の電流駆動磁壁移動の速度を測定したところ、TbFeCo 磁性細線中に、磁壁の内因性ピン止め効果の影響で、磁壁移動の速度が約 20m/s と制限されたことを明らかにした。これに基づく、図 5 に示した負の保磁力、残留磁化を有する TbFeCo/Ni 反強磁性結合した二層磁性細線構造を提案した。シミュレーションや実験では、反強磁性結合した二層磁性細線構造は単層の TbFeCo 磁性細線の 10 倍以上の駆動速度を示している。

#### 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 5 件)

- ① Songtian Li, Taro Amagai, Xiaoxi Liu, Akimitsu Morisako, Domain Wall Pinning Sites Introduced by Focused Ion Beam in TbFeCo Film, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 48(11), 3658-3661 2012, 査読有  
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2199741
- ② Songtian Li, Xiaoxi Liu, Akimitsu Morisako, Current Driven Domain Wall Motion in Rare-Earth Transition Metal Alloys with Perpendicular Magnetic Anisotropy, JOURNAL OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY, 12(9), 7550-7553, 2012, 査読有  
DOI: 10.1166/jnn.2012.6530
- ③ Xiaoxi Liu, Kazunobu Hayashi, Kei Tajima, Akimitsu Morisako,

Magnetotransport Properties in Antiferromagnetically

Exchange-Coupled Ni/TbFeCo/Ni Trilayers, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 47(10), 3126-3128, 2011, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2011.2147770

- ④ Songtian Li, Taro Amagai, Xiaoxi Liu, Akimitsu Morisako, APPLIED PHYSICS LETTERS, 99(12), 122501, 2011, 査読有  
DOI: 10.1063/1.3641428
- ⑤ Songtian Li, Hajime Nakamura, Hajime, Taichi Kanazawa, Xiaoxi Liu, Akimitsu Morisako, Current-Induced Domain Wall Motion in TbFeCo Wires With Perpendicular Magnetic Anisotropy, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 46(6), 1695-1698 2010, 査読有  
DOI: 10.1109/TMAG.2010.2042576

[学会発表] (計 3 件)

- ① 李松田, 雨貝太郎, 劉小晰, 森迫昭光, High domain wall magnetoresistance in TbFeCo wires. 平成 23 年度日本磁気学会学術講演概要集, 27pB-7, 2011.09.27, 新潟
- ② 田島圭, 林和延, 劉小晰, 森迫昭光, Ni/TbFeCo/Ni 三層膜における磁気抵抗効果, 第 34 回日本磁気学会学術講演会, 6pB-4, 2010.09.06, つくば国際会議場
- ③ 中村肇, 李松田, 劉小晰, 森迫昭光, TbFeCo 細線上での磁壁電流駆動におけるピンングサイト抑制による臨界電流密度の低減, 第 34 回日本磁気学会学術講演会, 6aE-8, 2010.09.06, つくば国際会議場

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

劉小晰 (XIAOXI LIU)  
信州大学・工学部・准教授  
研究者番号: 10372509

(2) 研究分担者

森迫昭光 (MORISAKO AKIMITSU)  
信州大学・工学部・教授

研究者番号 : 20115380