

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 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：82108
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22760015
 研究課題名（和文） 温度勾配を利用した低電流磁壁移動制御技術の確立
 研究課題名（英文） Influence of thermal gradients and spin currents on current driven domain wall motion
 研究代表者
 林 将光 (HAYASHI MASAMITSU)
 独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・主任研究員
 研究者番号：70517854

研究成果の概要（和文）：本研究では、基板上の温度勾配や強磁性細線中に励起したスピン波を利用して、電流で駆動した磁壁の閾値電流密度を下げる基盤技術の構築を行った。ジュール加熱を利用して、基板上に温度勾配を形成する手法を確立した。強磁性細線中の伝播スピン波の評価を行い、表面モードの励起・検出に成功した。また、連続する 2 つのパルスを用い、スピン波の干渉を利用して伝搬スピン波の増幅に成功した。マイクロ波磁場を印加し、強磁性共鳴を利用して磁壁の核形成磁場を低減する手法を確立した。磁場で駆動した磁壁の移動速度は今のところ、スピン波を印加しても変化しなかった。

研究成果の概要（英文）： We have studied the effect of temperature gradient and/or spin wave application to reduce the threshold current density needed to move a magnetic domain wall, or to increase the wall velocity. Using joule heating to locally heat a conductor, we developed a system that has temperature gradient of 0.2K/5 um. Spin wave excitations and its detection was carried out using high frequency electrical measurements. Incidentally, we find that the domain wall nucleation field was reduced when a localized microwave field, near to the ferromagnetic resonance frequency, was applied. However, the field driven domain wall velocity showed little dependence on the application of the propagating spin waves.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |
| 2011 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

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

1. 研究開始当初の背景

電子産業におけるメモリーの重要性は日々増している。特に、モバイル用記録装置として用いられるフラッシュなどの大容量

メモリと、プロセッサと連動する dynamic-RAM(DRAM)などの高速メモリの需要が高まっている。

電子のスピンを情報の記憶ビット

として用いるスピントロニクス材料は、高性能の不揮発性メモリへ応用できるとして期待が高まっている。近年磁壁移動メモリと呼ばれる、強磁性体細線中の多数の磁区を記録情報として用いたメモリの構想が発表され、研究開発が行われている。磁壁移動メモリは、用途に合わせて容量と性能を自由に設計することができるため、次世代の普遍的なメモリのひとつとして、その可能性に大きな期待が集まっている。

磁壁移動メモリの実用化に向けての見通しはまだ厳しく、特に課題となっているのは、情報操作（磁壁の位置制御）を行う際に要求される電力、すなわち磁壁を動かす電流密度が大きいことである。

2. 研究の目的

本研究では磁壁移動メモリ実現に向けて、温度勾配やスピン波などを利用して、磁壁を電流で駆動する際の閾値電流密度を低下できる技術の基盤構築を目指す。強磁性体に温度勾配を印加すると、それに伴ってスピン波が励起され、スピン流が流れることが最近確認されている。そのため、温度勾配とスピン波による影響が切り分けられるよう、研究を進める。本研究では、強磁性体細線における温度勾配を印加できる機構を確立し、またスピン波などの伝播機構を調べ、磁壁移動との相互作用を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ （パーマロイ）を用いた強磁性細線素子を作製した。スパッタ法を用いて単結晶 MgO 基板上に $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}|\text{Ru}$ を製膜した。Ru は酸化防止のためのギャップ層として用いた。製膜後、強磁性細線を作製するため、微細加工を行った。試料は2種類用意し、1つは細線中の磁壁移動を調べるサブミクロン幅の強磁性細線、もう1つはスピン波の伝播を調べる幅が数十ミクロンの強磁性矩形素子を作製した。強磁性細線のパターンニングには電子線リソグラフィーと Ar イオンエッチングを利用した。コンタクト用の電極は電子線リソグラフィーとリフトオフ法を用いて作製した。電極材料には 5 nm Ta/85 nm Au を用いた。強磁性矩形素子の作製には、フォトリソグラフィーAr イオンエッチングを利用した。コンタクト用の電極にもフォトリソグラフィーとリフトオフ法を用い、電極材料には 5 nm Ta/85 nm Au を用いた。

4. 研究成果

(1) 温度勾配の評価

基板上的温度勾配の生成には、細線のジュール加熱を用いた。図1に作製した素子の光学顕微鏡写真を示す。ミアンダー状の電極を2本用意し（5 nm Ta/85 nm Au）、一方をヒ

ーター、もう一方を温度センサーとして用いた。ヒーターとセンサーの間の距離を変えた素子を用意し、基板上的温度勾配を評価した。

図2に、ヒーターにDC電流を 20 mA 通電したときのセンサーの抵抗変化と対応する温度変化を、ヒーター・センサー間のギャップ長に対して測定した結果を示す。一番ギャップ長が短い素子で、約 0.2 K 温度が上昇したことがわかる。一方でギャップ長が 20 μm を超えると、ほとんど温度変化がないことがわかる。温度勾配が磁壁に与える影響を評価するには、数 μm 程度のギャップ長があれば十分であり、図1で示した素子が利用できるとわかった。またヒーターにはより大きな電流を印加することができるため、図2で示したそれより大きな温度変化を見込める。温度勾配が磁壁移動に与える影響については現在研究を行っている。



図1. シリコン基板上（100 nmの熱酸化膜付き）に作製した5 nm Ta | 85 nm Auからなる局所ヒーターと温度センサー

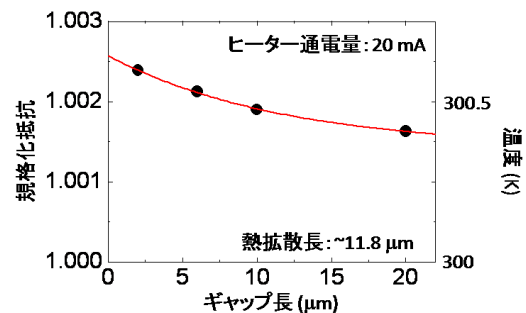


図2. 図1の局所ヒーターに20 mA通電した際の温度センサーの抵抗変化のギャップ長依存性。抵抗値は室温時の値で規格化した。右側に推測される温度を示した。

(2) 伝播スピンの評価

スピン波の生成には、電極材料を用いて作製したアンテナにパルス電圧を印加し、アンテナから発生する局所磁場を用いてスピン波を励起した。図3に、作製した素子の光学顕微鏡写真を示す。中央の強磁性矩形素子は長さ 150 μm 、幅 40 μm である。強磁性矩形素子とU字型のアンテナ（2本）の間には、絶縁をとるために厚さ 30 nm の酸化膜 (SiO_2) が挿入されている（点線枠内）。

スピン波の測定には、電磁誘導を利用してスピン波の検出を電氣的に行った。アンテナ

に伝播してきたスピนว波は漏洩磁場を発生する。時間変化する漏洩磁場は電磁誘導により、アンテナに誘導電流を励起する。アンテナの両端はオシロスコープに接続されており、誘導電流を時間分解で測定する。

図4に測定結果を示す。パルス幅が100 psの電圧パルスを一方のU字型アンテナに印加し、10 μm離れたもう一方のアンテナに伝播してきたスピนว波を測定した。ここでは膜面垂直方向に2.5 kOe程度の磁場を印加している。スピนว波の周波数は印加磁場の大きさでほぼ決定し、ここでは2.5 GHz程度の振動が観測された。アンテナと電圧パルスを用いることで、効率的にスピนว波の励起・検出ができることを確認した。しかしながら、伝播スピนว波の磁壁移動への影響は今のところ、確認できていない。

また本研究では、スピนว波の干渉を利用して、伝播スピนว波の振幅を増幅できることを発見した。幅が100 psの電圧パルスを2回、一定の時間 t をあけて印加すると、1つの電圧パルスを用いて励起した場合と比較して、スピนว波の振幅が t によって増大または減少することを確認した。これは、1つ目のパルスで励起されたスピนว波と、2つ目のパルスで同様に励起されたスピนว波が伝播中に干渉し、強めあうように干渉した場合、スピนว波の振幅が増幅することで説明できる。2つのパルスを用いることで、伝播スピนว波の振幅を自在に制御できるため、スピนว波を用いたデバイスへの応用技術として利用が期待できる。

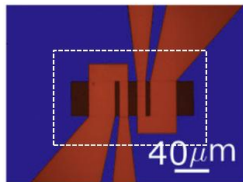


図3. スピนว波の伝播を評価する素子。中央の長方形が磁性体(パーマロイ)。

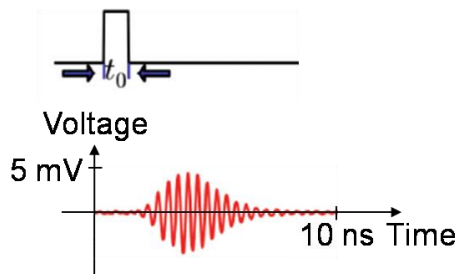


図4. スピนว波を励起するパルスの模式図(パルス幅は100 ps)と、アンテナを利用して測定した伝播スピนว波の信号。

- (3) マイクロ波磁場による磁壁の核形成
最後に連続スピนว波を励起するためにマ

イクロ波帯域の局所磁場を印加すると、磁壁の核形成を効率的に行うことができることを発見した結果を示す。図5に用いた素子の光学顕微鏡写真を示す。磁壁の伝播には異方性磁気抵抗効果を利用した電氣的測定手法を利用した。電極C D間の抵抗をオシロスコープで測定し、磁壁が伝播してくる様子を観察した。U字型の電極AとBは局所磁場を発生させるために用意した。電極Bにパルス電圧を印加した際の磁壁の核形成磁場を、生成した局所磁場に対してプロットした結果(黒四角)を図6(a)に示す。一方、電極Aにパルス電圧を印加したときの磁壁の核形成磁場を図6(a)赤丸で示した。局所磁場が細線の長手方向に向いている場合(電極B)と比較して、直行する方向に向いている場合(電極A)の方が、核形成磁場が低下することがわかる。さらに、電極Aにマイクロ波帯域の交流電流を印加すると、周波数によってさらに核形成磁場が下がる(図6(a)三角)。磁壁の核形成磁場の周波数依存性を図6(b)に示す。ここでは、3 GHz程度で核形成磁場が最小となることとわかる。これは、強磁性共鳴現象によって、核形成磁場が減少したことを示唆している。磁壁の核形成という、不均一な磁化反転機構でも共鳴現象を利用して、反転磁場を低減できることは興味深く、磁壁を用いたデバイスへの応用技術として利用できることが期待される。

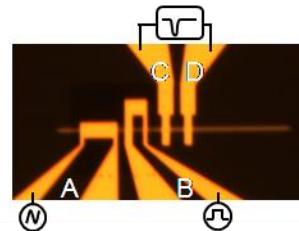


図5. パルス磁場とマイクロ波局所磁場、またはスピนว波が磁壁移動に及ぼす影響を評価する素子。

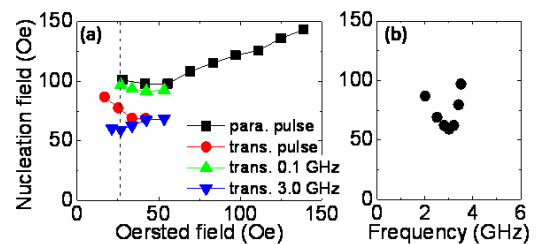


図6. (a)パルス磁場とマイクロ波局所磁場を用いた時の、磁壁の核形成磁場の印加局所磁場いぞんせい。四角(細線長手方向のパルス磁場)、丸(細線長手直行方向のパルス磁場)、三角(細線長手直行方向のマイクロ波交流磁場)。(b)マイクロ波交流磁場を用いた時の磁壁の核形成磁場の周波数依存性。

(4) まとめ

本研究では、以下の3つの研究課題を達成することができた。

- 基板上での温度勾配の生成とその評価
- 強磁性細線におけるスピン波の励起と伝播機構の観測
- マイクロ波磁場による磁壁移動（核形成）への影響を評価

今のところ、磁場で駆動した磁壁の移動速度が、伝播スピンの印加によって変化する結果は観測されていない。これは、伝播スピン波の振幅が小さいことや、励起されたモードが効率的に磁壁移動に影響を及ぼしていない可能性が考えられる。今後は、本研究で得られた技術を用いて、温度勾配やさまざまなスピン波が磁壁移動に及ぼす影響を明らかにする。

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1件)

① S. Mukherjee, J. Kwon, M. Jamali, M. Hayashi, and H. Yang. *Interference mediated modulation of spin waves.* Phys. Rev. B **85**, 224408 (2012). 査読有

② M. Hayashi, Y. K. Takahashi and S. Mitani, *Microwave assisted resonant domain wall nucleation in permalloy nanowires.* (2012) submitted. 査読有

[学会発表] (計2件)

① J. Kwon, S. Mukherjee, M. Jamali, M. Hayashi and H. Yang, *Spin Wave Interference Induced by Two Pulses,* International conference of Young Researcher on Advanced Materials (ICYRAM), Singapore, Jul. 2nd (2012)

② S.S. Mukherjee, J. Kwon, M. Jamali, M. Hayashi and H. Yang. *Spin wave modulation via interference for magnonic logic circuits.* 56th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, AZ, Nov. 1st, (2011).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 将光 (HAYASHI MASAMITSU)

物質・材料研究機構磁性材料ユニットスピントロニクスグループ・主任研究員

研究者番号：70517854

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし