

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760228

研究課題名（和文） ナノ磁性体の大振幅磁場中における動的磁化挙動

研究課題名（英文） Magnetization dynamics of nanostructured magnet in a large amplitude field

研究代表者

菊池 伸明（KIKUCHI NOBUAKI）

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：80436170

研究成果の概要（和文）：本研究では、垂直磁化ナノ磁性体の非可逆磁化反転ダイナミクスに関する知見を得ることを目的として研究を遂行した。磁化反転時間および磁化の歳差運動周期と同程度であるサブナノ秒の大振幅・超短パルス磁場発生機構の開発を行い、それを用いて単一 Co/Pd および Co/Pt 多層膜ナノ磁性体の磁化反転実験を行った。これらのナノ磁性体の磁化反転過程は、交換結合長程度の反転核の発生およびその成長によって起こり、その挙動は単一の熱活性化モデルに基づきサブナノ秒領域から準静的磁場領域まで良く記述出来ることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In this research project magnetization behavior of nanoscale magnets with perpendicular anisotropy in sub-nanoseconds time regime has been investigated. A Pulse field generator with sub nanoseconds duration, which is comparable with magnetization reversal time, was developed. Magnetization reversal experiments were carried out on single dots of Co/Pd and Co/Pt multi layers. Magnetization reversal of those dots is governed by an embryo with a dimension of exchange length, and the behavior of those embryos can be well described with a thermally activated model from sub-nanoseconds to static time regime.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子・電気材料工学

キーワード：動的磁化挙動, パルス磁場, ナノ磁性体, 磁気記録

1. 研究開始当初の背景

大容量外部記憶装置の主流となっているハードディスクドライブ(以下, HDD)では、高画質の動画や並列処理など、近年の急激な情報量の増大に伴い、大容量化・高速化を図る必要に迫られていた。HDD においては記録媒体および、読み込み・書き込みに使うヘ

ッドのいずれにも磁性体を用いており、それら個々の要素を構成するナノ磁性体の磁化挙動の速度を、デバイス全体の動作速度が超えることはできない。ユニバーサルメモリとして期待される磁気抵抗メモリも含め、これらの不揮発メモリデバイスの動作周波数が磁化の共鳴周波数である GHz 帯に近づいて

きており、磁化のダイナミクスの効果が無視できない領域に入るため、動作の不安定性や反転磁場の著しい増大などの困難が指摘されていた。これらの点を考慮に入れ、1990年代から磁化ダイナミクスの研究が展開されていたが、その多くは小振幅磁場下の可逆磁化過程を取り扱った研究に集中していた。その一方で、不揮発メモリデバイスにおいて必要不可欠な磁化動作である非可逆過程に関する報告は少なく、特に、反転磁場の大きな高磁気異方性材料を用いたものは極めて少なかった。その理由の一つには、磁化の非可逆反転に必要な磁場の発生が困難であることがあり、これまで、加速器から放出される電子塊が作る電流磁場など、特殊な手法を用いた方法が報告されているのみであった。さらに、先述のようなメモリデバイスに用いるナノ磁性体においては、磁化の定量測定も極めて難しくなるため、磁気力顕微鏡などを用いた極めて定性的な評価法を用いた報告がわずかに行われているにすぎなかった。

このような状況の中、従来から静的な磁場に対する超高感度磁化測定手法として研究・開発を続けてきた、単一ナノ磁性体の異常 Hall 効果を検出する手法に、新規に開発したナノ秒領域の大振幅パルス磁場発生技術を組み合わせることにより、ナノ磁性体の動的磁化挙動の定量評価を推進してきた。直径 300nm の垂直磁気異方性を持つ Co/Pt ドットにおいては、2 ns 程度以下の時間で起こる反転核の生成と、磁場強度および磁場印加時間に強く依存するその反転核の成長という二段階のプロセスを明瞭に観測することに成功していた。その一方で、これまでに実現されたパルス長は最短でも 1.8ns であり、反転核の挙動の観測には十分ではなく、より一層のパルス長の短縮化が必要であるという課題が残されていた。

2. 研究の目的

HDD に代表される不揮発磁気メモリデバイスにおいては、磁化の非可逆反転動作が不可欠である。現在、その動作速度が向上しており、動作周波数と磁化の共鳴周波数が極めて近づいているため、従来の静的な磁化反転モデルが破綻する可能性が指摘されており、動的過程の理解の重要性が増している。そこで、本研究においては、磁化の反転時間、もしくは磁化の歳差運動周期と同程度の時間領域である、サブナノ秒のパルス磁場中での単一ナノ磁性体の磁化反転実験を行うことにより、磁化の非可逆反転ダイナミクスに関する知見を得ることを目的とする。また、サブナノ～ナノ秒領域での磁化挙動と、準静的磁場領域の反転挙動とを比較することにより、従来、熱安定性の議論に利用されてき

た古典的な熱活性モデルが適用できる時間領域に関する知見を得ることも試みた。

3. 研究の方法

(1) 試料の構成

作製した試料の走査型電子顕微鏡写真を図 1 に示す。十字型の異常 Hall 効果測定用の配線の中央に直径 300nm の Co/Pt 多層膜ドットを電子線リソグラフィにて形成した。厚さ 400nm の SiO_2 絶縁層を成膜した後に、パルス磁場印加用の Cu コイル (幅 $5 \mu\text{m}$, 内径 $3 \mu\text{m}$) を形成した。薄膜の作製は全てスパッタリングにて行い、基板には高周波特性に留意し、石英を用いた。

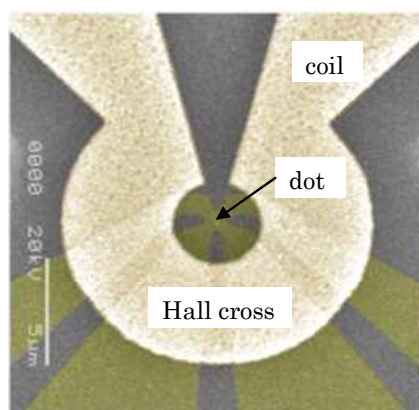


図 1 Co/Pt ドットと磁場印加用 Cu コイルの走査型電子顕微鏡像

(2) パルス磁場発生

本研究で必要とするパルス磁場強度を印加するためには、図 1 に示したコイルに数 A の電流を流す必要がある。しかしながら、このような大電流を供給でき、同時に、サブナノ秒のパルスを発生できる市販機器は存在しない。そのため、パルス磁場は 50Ω にインピーダンス整合した回路を作製し、その系に充電した電荷をリレースイッチの開閉に

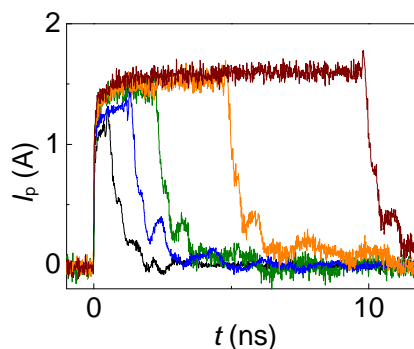


図 2 Cu コイル通過後のオシロスコープで計測したパルス波形

よりコイルを通して放電させることにより発生させた。また、高周波伝送線路の設計には微細加工パターン設計も含め細心の注意を払い、パルス立ち上がり時間 0.1 ns 以下を実現した。磁化反転実験には、パルス幅 $\tau_p = 0.6 \sim 10$ ns の範囲で変化させた。図 2 に実際にコイルを通過させたパルス波形の一例を示す。

4. 研究成果

図 3 に直径 300nm の Co/Pt 多層膜ドットの反転磁場 H_{sw} のパルス磁場印加時間 (τ_p) 依存性を示す。 $\tau_p < 5$ ns の領域では、パルス時間の減少に伴い、急激に反転磁場が増大している。このドットサイズ領域においては、反転核の生成とその成長という二段階のプロセスが存在するが、バイアス磁場の存在下で行ったため、このパルス磁場時間依存性は反転核生成磁場を反映しているものと考えられる。従来の報告でのナノ秒領域に比べて、サブナノ秒領域のパルスにおいては、明らかな時間の減少に伴った反転磁場の増大がみられている。

図 4 に、直径 300nm の Co/Pt 多層膜ドットの反転磁場 H_{sw} の磁場時間依存性を、パルス磁場と準静的 (dc) 磁場に対して示す。また、点線は、単一エネルギー障壁による熱活性プロセスを仮定し、Néel-Arrhenius 則により全時間領域にわたりフィッティングしたものであり、エネルギー障壁の大きさとして $210k_B T$ が得られた。この値は、おおよそ交換結合長程度の長さの反転核の大きさに相当している。図 5 に、直径 300nm の Co/Pt ドットの、 $\tau_p = 0.6$ および 10.3 ns のパルス磁場に対する反転確率を示す。各パルス磁場強度の条件に対して、20~50 回の反転実験を行い、統計的な処理を行った。反転確率はパルス磁

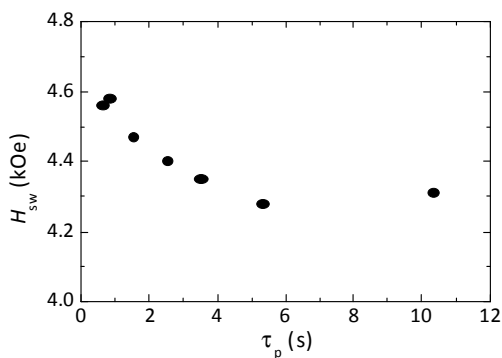


図 3 直径 300 nm の Co/Pt 多層膜ドットの反転磁場 H_{sw} のパルス磁場印加時間 τ_p 依存性。

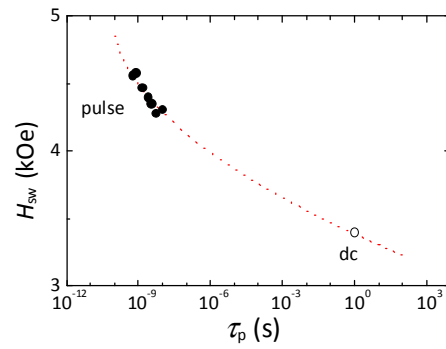


図 4 直径 300 nm の Co/Pt 多層膜ドットの反転磁場 H_{sw} のパルス磁場および dc 磁場印加時間 τ_p 依存性。

場強度の増加に伴って緩やかに増加し、その分散幅はパルス磁場の減少に伴い漸増した。

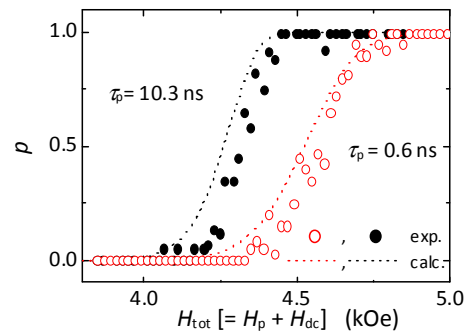


図 5 直径 300 nm の Co/Pt 多層膜ドットの反転確率 p の印加磁場時間 τ_p 依存性。点線は Néel-Arrhenius 式の熱活性反転核生成モデルにより計算した値。

図中に示した点線は、反転磁場の磁場時間依存性から求めたエネルギー障壁の大きさを仮定して反転確率を計算した結果を磁場の大きさに合わせて示したものである。実験結果と、計算結果は、値の大きさ、分布の形状いずれも極めて良い一致を示した。以上のことから、ナノ磁性体における反転核の生成プロセスが、記録の熱安定性・長期保存に関わる準静的な領域から高速性・ダイナミクスが問題になるサブナノ秒領域にわたる幅広い時間領域において、Néel-Arrhenius 則に従うとして取り扱うことができることを明らかにした。

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 4 件)

①. N. Kikuchi, Y. Suyama, S. Okamoto, and O. Kitakami, Co/Pt multilayer dot switching experiments with sub-nanosecond pulse field, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 109, 2011, pp. 07B904-1 ~ 3

②. Y. Suyama, Y. Murayama, N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 266, 2011, pp. 012183-1 ~ 5

③. N. Kikuchi, K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, O. Kitakami, and H. Aoi, Nucleation size of hcp-CoPt dot arrays characterized by time dependence of coercivity, 査読有, Vol. 200, 2010, pp. 102003-1~4

④. K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, N. Kikuchi, S. Okamoto, and H. Aoi, O. Kitakami, Remanence coercivity of dot arrays of hcp-CoPt perpendicular films, 査読有, Vol. 200, 2010, pp. 102005-1~4

[学会発表] (計 11 件)

①. N. Kikuchi, Y. Suyama, S. Okamoto, and O. Kitakami, Co/Pt multilayer dot switching experiments with sub-nanosecond pulse field, the 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 平成22年11月16日, Atlanta, USA

②. 菊池伸明, 巢山宜裕, 岡本聡, 北上修, サブナノ秒領域での Co/Pt ドットの反転磁場の磁場時間依存性, 第34回磁気学会学術講演会, 平成22年9月4日, つくば

③. 巢山宜裕, 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, パルス磁場による Co/Pd 多層膜ドットの磁化反転実験, 第34回磁気学会学術講演会, 平成22年9月4日, つくば

④. Y. Suyama, Y. Murayama, N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami, Magnetization reversal of single Co/Pd dot by nanosecond pulse field, The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 平成22年7月16日, Sendai, Japan

⑤. 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, ナノ秒パルス磁場による Co 系多層膜ドットの磁化反転実験, 第35回ナノマグネティクス専門研究会, 平成22年7月2日, 東京

⑥. 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, 単一 Co/Pt 磁性ナノドットの ns 領域における磁化反転

実験, 日本磁気学会第27回スピントロニクス研究会, 平成21年12月8日, 名古屋

⑦. 村山友祐, 巢山宜裕, 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, ナノ秒パルス磁場による Co/Pt ドットの磁化反転実験, 第33回日本磁気学会学術講演会, 平成21年9月13日, 長崎

⑧. 巢山宜裕, 村山友祐, 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, マイクロコイルを用いたナノ秒パルス磁場強度増大の試み, 第33回日本磁気学会学術講演会, 平成21年9月13日, 長崎

⑨. 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, Co/Pt ドットの磁化反転挙動のパルス磁場時間依存性, 第33回日本磁気学会学術講演会, 平成21年9月13日, 長崎

⑩. N. Kikuchi, K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Aoi, Nucleation size of hcp-CoPt dot arrays characterized by time dependence of coercivity, International conference on magnetism, 平成21年7月30日, Karlsruhe, Germany

⑪. N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, Nanosecond pulse field switching on a single Co/Pt nano dot, International Conference on magnetism, 平成21年7月28日, Karlsruhe, Germany

[その他]

研究室ホームページ

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/1aboratory/index.php?laboid=30>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池伸明 (KIKUCHI NOBUAKI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号: 80436170