

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686038

研究課題名(和文)ピコ秒パルス磁場を用いた垂直磁化ナノ磁性体の歳差運動誘起磁化反転

研究課題名(英文)Precessional switching on perpendicularly magnetized nanodots by picosecond pulse fields

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁化と磁場の双方が動的に変化する磁化ダイナミクスの効果を積極的に利用することにより、静的な磁場とは全く異なる磁化反転手法を実現することができる。本研究では、パルス磁場を磁化と直交方向に印加することによって大振幅の歳差運動を誘起する原理に基づいたナノ磁性体の非可逆磁化反転実験を行った。パルス磁場の立ち上がり時間が磁化の緩和時間程度(~100ps)よりも短い場合に顕著な反転磁場の低減効果が表れ、静的な磁場に比べて約70%の磁場で反転できることを実験・計算の双方から実証した。

研究成果の概要(英文)：New magnetization reversal methods can be realized by using the effect of magnetization dynamics, in which both magnetization and magnetic field are treated as time dependent terms. In this study, magnetization reversal experiments was carried out based on large angle precessional motion of magnetization produced by applying pulse field normal to the magnetization. Both experiments and calculation results showed that magnetization reversal field can be reduced down to 70 % of that in a static field by using pulse fields with rise time shorter than the relaxation time of magnetization.

研究分野：磁性材料・磁気工学

キーワード：磁化反転 磁化ダイナミクス 磁気記録

1. 研究開始当初の背景

強磁性体は、材料そのものが磁化の向きとして不揮発メモリ機能を示すことから、ハードディスクドライブ (HDD) などの磁気記録媒体や、ユニバーサルメモリの一種である磁気抵抗変化メモリ (MRAM) に用いられている。近い将来、これらのデバイスの動作周波数は磁化の反転時間や磁気共鳴周波数と同程度の時間領域である GHz 帯に達すると想定されている。この領域では、磁場・磁化の双方が時間とともに複雑に変化する磁化ダイナミクスを考慮する必要があり、活発な研究の対象となってきた。これまでの研究の中で、磁気共鳴や歳差運動などの磁化ダイナミクスの効果を積極的に利用することにより、磁化の反転に要する磁場強度を静磁場での限界以下まで低減できる可能性が示唆され、応用上の観点からも注目を集めていた。

歳差運動誘起磁化反転 (Precessional switching あるいは Ballistic Switching) と呼ばれる手法はそのうちのひとつであり、磁化の緩和時間よりも速く変化する磁場を用いて大きな初期トルクを発生させ、大振幅の歳差運動を誘起して磁化を非可逆的に反転させるものである。磁化に非平行なパルス磁場を印加すると、有効磁場と磁化の外積に比例したトルクが発生し、磁化は有効磁場の周りを歳差運動する。この時、図 1 (b) に示したように大きな歳差運動角を保つことができれば非可逆磁化反転を引き起こすことができ、静的な磁場に比べ最大で 50% の反転磁場低減効果が得られることが理論・計算で示されていた。ところが、実際の磁性材料では歳差運動と同時に有効磁場方向への緩和も生じるため、(a) のような小さな歳差運動になることを防ぐためには、おおよそ歳差運動周期程度である磁化の緩和時間以下の時間で磁場強度を変化させる必要がある。そのため、実験的な実証は磁気異方性が小さく歳差運動周期の長い軟磁性体で行われており、応用上重要な高磁気異方性垂直磁化膜では、加速器により発生させた電子塊を用いるきわめて特殊な手法による報告例があるのみであった。

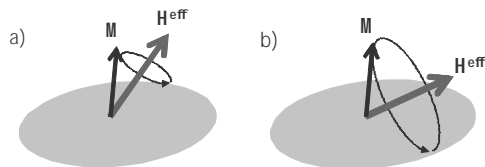


図 1 有効磁場 H^{eff} と磁化 M の歳差運動の様子

2. 研究の目的

本課題では、垂直磁気異方性材料をもつナノ磁性体における歳差運動誘起磁化反転による反転磁場低減効果の実験的な検証・原理の確立、およびそれを通じた非可逆反転ダイ

ナミクスの理解を目的とした。特に、磁化のダイナミクスに大きな影響を与えるパルス波形およびナノ磁性体の材料・形状パラメータに対する効果を実験・計算の両面から明らかにする。特に、初期トルクの発生に効率的なパルス磁場の立ち上がり速度に着目して研究を遂行した。また、歳差運動の減衰の理解・制御も重要な要素であり、減衰を表すパラメータである Gilbert damping () との関連を調べ、ナノ磁性体の Gilbert damping () を評価するための手法として単一のナノ磁性体の強磁性共鳴を評価する手法の確立も試みた。

3. 研究の方法

試料の構成

作製した試料の光学顕微鏡像の一例を図 2 に示す。まず、直径 80~200 nm の Co/Pt 多層膜ドットと異常 Hall 効果測定用の十字型電極を電子線リソグラフィーにより形成した。厚さ 400nm の SiO_x 絶縁層を成膜した後に、パルス磁場印加用の Cu 線路 (幅 5 μm) を形成した。この線路に GHz 帯の高周波成分を通過させる必要があることから、パルス磁場印加用の線路はインピーダンスを 50 Ω に整合させたコプレーナ型の線路とした。基板には高周波特性に留意し石英もしくは MgO 基板を用いた。

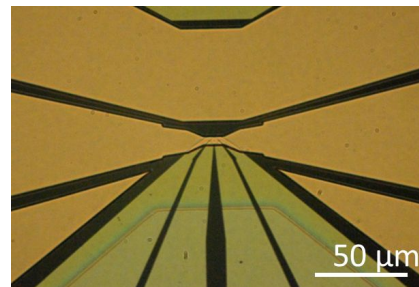


図 2 試料の光学顕微鏡像

パルス磁場発生

パルス磁場は図 2 に示した線路にパルス電流を印加することにより発生させた。図 3 に模式的に示したように、線路に電流が流れた場合、その下にある磁性ドットには膜面内方向に磁場が印加される。この時、磁性ドット位置での磁場強度と印加電流の関係はおおよそ 1 kOe/A と見積もられる。そこで、本研究では、最大 3.4A のパルス電流を発生できるパルス磁場発生器を採用し、自作したローパスフィルターを用いることで立ち上がり時間を 0.07 ~ 4 ns の間で変化させた。代表的なパルス波形の例を図 4 に示す。これらのパルス波形は、試料を通過した後の波形をオシロスコープにより検出したものである。

ナノ磁性体の強磁性共鳴の測定

強磁性体共鳴の測定で広く用いられる空洞共振器を用いる手法では、信号強度が試料の

体積に比例する．そのため，ナノ磁性体では大面積に微細加工を施す必要があり不向きである．そこで，本研究では，高周波磁場により励起された歳差運動に伴う，膜面に垂直な磁化の変化量を異常ホール効果により検出することで歳差運動角を評価した．

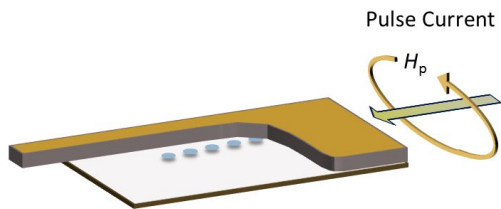


図3 パルス磁場印加の模式図

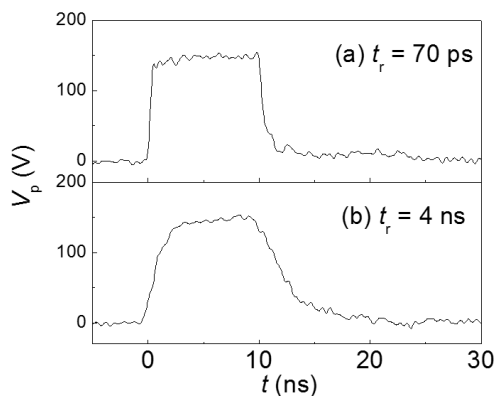


図4 電圧パルス波形の例

4. 研究成果

パルス磁場による歳差運動誘起磁化反転実験

パルス磁場による磁化反転実験は，膜面に垂直な方向に初期磁化方向と逆方向に直流磁場 H_{dc} を印加したうえでパルス磁場を重畳させ，残留磁化状態の磁化方向を評価して行った．図5に，パルス磁場振幅に対して，非可逆磁化反転に必要なとなった直流磁場 H_{dc} の大きさを示した．実験に用いたドットの直径は120nmである．パルス長は10nsで一定とし，立ち上がり時間 τ_r は 7×10^{-2} から4nsの間で変化させた．いずれのパルス磁場振幅においても， $\tau_r = 7 \times 10^{-2}$ nsの場合に必要な H_{dc} の値が $\tau_r = 1, 4$ nsの場合を大きく下回っていることがわかる．図5中の黒い点線は，磁化の一斉回転(Stoner-Wohlfarth model: S-W)をもとに計算した値であり，立ち上がりの遅い $\tau_r = 1, 4$ nsのパルス磁場で得られた結果とよく一致している．このことは，これらの時間領域では，動的な磁場の効果が見られないことを示している．その一方 $\tau_r = 7 \times 10^{-2}$ nsの場合には，その反転磁場はS-Wで示した値よりも大きく低下しており，直流磁場とパルス磁場を合成した反転に必要な磁場の大きさは約70%にまで低下することが明らかとなった．次にパルス磁場の立ち上がり時間を固定し，パルス長を0.7~10nsの間で変化させて同様の実験を行った．その結果，反転に必要な直流磁

場のパルス長に対する依存性は極めて小さく，緩和時間程度でパルス磁場が立ち上がることが重要な役割を果たしていることが示唆された．

これらの反転時の過渡状態を明らかにするために時間分解計測の取り組みを計画していたが，十分な異常ホール効果信号強度が得られず実現できなかった．そこで，反転時の磁化の軌道を計算機シミュレーションによって求めた．図6に(a)非反転時および(b)反転時の磁化の軌道を示す．二つの結果を比較すると，反転時には有効磁場の周りに大振幅の歳差運動が励起されて，もう一方の安定点の周りへと緩和していくことがわかる．種々のパラメータを変化させて計算した結果，立ち上がり時間が100ps以下の場合に動的効果による反転磁場の低減が顕著になることが分かった．この100psという時間は，計算で仮定した4kOeという磁気異方性から求められる歳差運動周期(~ 80 ps)とほぼ一致している．

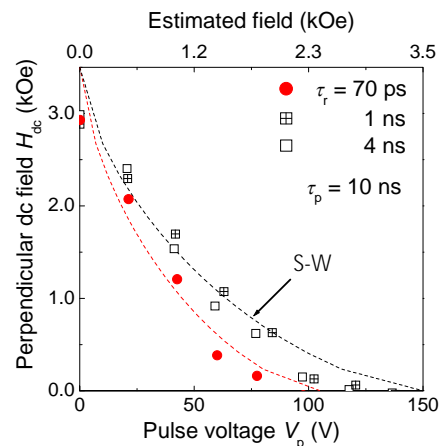


図5 反転に必要な直流磁場 H_{dc} のパルス磁場強度依存性

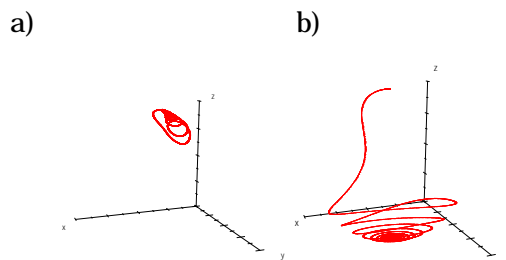


図6 (a)非反転時および(b)反転時の磁化の軌道

ナノ磁性体の強磁性共鳴測定

磁化の動的挙動を直接的に理解するためには，時間分解での測定が最も直接的であり望ましい．しかしながら，上述のように本研究で対象とする垂直磁化ナノ磁性体において十分な信号強度が得られず困難であった．そのため，時間の逆数である周波数分解の手法である強磁性共鳴の測定からアプローチ

することとした。しかしながら、これまでナノ磁性体の強磁性共鳴を測定した例はトンネル接合を除いて少なく、特に垂直磁化膜についての報告は皆無である。そこで、本課題では単一ナノ磁性体の強磁性共鳴を測定する手法の確立を目指した。測定試料の構成は図2に示したものとほぼ同様であり、パルス磁場の代わりに GHz 帯の高周波磁場を印加し、ナノ磁性体に誘起された歳差運動による膜面に垂直が磁化成分の変化を異常ホール効果を通じて検出した。図7に直径 400 nm のドットに、周波数 6 GHz、振幅 200 Oe の高周波磁場を印加した際に垂直方向の直流磁場を掃引して得られたプロファイルを示す。複数の強磁性共鳴に対応するピークが観測されており、解析計算および計算機シミュレーションから、これらのピークがドット内部に誘起される同心円状のスピンの定在波に対応することが明らかとなった。

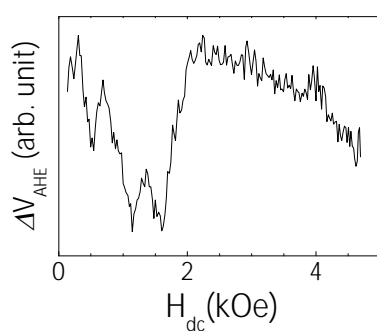


図7 直径 400nm の単一 Co/Pt 多層膜ドットの強磁性共鳴プロファイルの例

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 6 件)

N. Kikuchi, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Quantized spin waves in single Co/Pt dots detected by anomalous Hall effect based ferromagnetic resonance, *Applied Physics Letters* **105**, 242405 (2014), 査読有, DOI: 10.1063/1.4904225

M. Furuta, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu, Size dependence of magnetization switching and its dispersion of Co/Pt nanodots under the assistance of radio frequency fields, *Journal of Applied Physics* **115**, 133914 (2014), 査読有, DOI: 10.1063/1.4870451

N. Kikuchi, Y. Suyama, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Quasi-ballistic

magnetization switching in Co/Pt dots with perpendicular magnetization, *Applied Physics Letters* **104**, 112409 (2014), 査読有, DOI:10.1063/1.4869150

N. Kikuchi, Y. Suyama, S. Okamoto, O. Kitakami, Pulse rise time dependence of switching field of Co/Pt multilayer dot, *Electronics and Communications in Japan* **96**, 9 (2013), 査読有, DOI: 10.1002/ecj.11569
菊池伸明, 巢山宜裕, 岡本 聡, 北上 修, Co/Pt ドットの反転磁場のパルス磁場立ち上がり時間依存性, *電気学会論文誌* **132**, 838 (2012), 査読有,

DOI:10.1541/ieejfms.132.838

N. Kikuchi, Y. Murayama, Y. Murakami, S. Okamoto, D. Shindo, O. Kitakami, Correlation between switching field and microstructure of individual Co/Pt dots, *Japanese Journal of Applied Physics* **51**, 103002 (2012),

DOI:10.1143/JJAP.51.103002

[学会発表](計 14 件)

N. Kikuchi, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Ferromagnetic resonance on nanosized Co/Pt multilayer dots, The 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM), 平成 26 年 11 月 7 日, ホノルル (アメリカ合衆国)
菊池伸明, 古田正樹, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁, Co/Pt ナノドットの強磁性共鳴測定, 第 38 回 日本磁気学会学術講演会, 平成 26 年 9 月 3 日, 慶応大学 (神奈川県横浜市)

Co/Pt ナノドットのマイクロ波磁化反転, 菊池伸明, 古田正樹, 岡本聡, 北上修, 第 50 回日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門研究会, 平成 26 年 7 月 30 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)

N. Kikuchi, S. Okamoto, M. Furuta, O. Kitakami, T. Shimatsu, Ferromagnetic resonance measurements on single nanoscale Co/Pt dots with perpendicular anisotropy, the IEEE International Magnetism Conference,

INTERMAG Europe 2014, 平成 26 年 5 月 6 日, ドレスデン(ドイツ)

N. Kikuchi, S. Okamoto, M. Furuta, O. Kitakami, T. Shimatsu, Rise time effect on magnetization reversal of Co/Pt multilayer nanodots by nanoseconds pulse fields, Magnetism and Optics Research International Symposium, 平成 25 年 12 月 4 日, 大宮ソニックシティ (埼玉県大宮市)

N. Kikuchi, A. Hotta, K. Kadonosawa, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Time dependent coercivity of granular media in a time scale from nanosecond to sub-millisecond regime, the 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 平成 25 年 11 月 8 日, デンバー (アメリカ合衆国)

N. Kikuchi, Y. Suyama, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Irreversible magnetization reversal by in-plane pulse field in perpendicularly magnetized nanodots, 12th MMM-INTERMAG Joint Conference, 平成 25 年 1 月 16 日, シカゴ(アメリカ合衆国)

N. Kikuchi, Y. Suyama, S. Aizawa, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Magnetization reversal experiments on Co/Pt multilayer dot with a pulse field perpendicular to the magnetization, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS2012), 平成 24 年 10 月 4 日, 奈良新公会堂(奈良県奈良市)

菊池伸明, 岡本聡, 北上修, 垂直磁化微小ドットの磁化反転過程, 第 41 回スピンエレクトロニクス専門研究会, 平成 24 年 8 月 22 日, 東北大学(宮城県仙台市)

菊池伸明, 岡本聡, 北上修, 垂直磁化微小ドットの磁気特性, 電気学会オンチップ RF マグネティクス調査専門委員会, 平成 24 年 7 月 17 日, 日本交通協会(東京都千代田区)

{ その他 }
ホームページ等

http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/kita_kami/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 伸明 (KIKUCHI, Nobuaki)
東北大学・多元物質研究所・助教
研究者番号: 80436170

(3) 連携研究者

北上 修 (KITAKAMI OSAMU)
東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号: 70250834

岡本 聡 (OKAMOTO SATOSHI)
東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号: 10292278