

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656117

研究課題名(和文)ネオジウム磁石薄膜のマイクロ多極着磁とそのMEMSへの応用

研究課題名(英文)Micro multi-pole magnetization of NdFeB magnet and its application to MEMS devices

研究代表者

進士 忠彦 (Shinshi, Tadahiko)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：60272720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：薄膜ネオジウム磁石の微細着磁実現のため、レーザを用いた局所加熱により保磁力を低下し、外部静磁場により着磁する、レーザアシスト微細着磁法を提案、実証した。静磁場を発生する磁気回路は磁場解析を用いて設計、製作し、レーザ加熱条件は非定常熱伝導解析を用いて決定した。微細着磁実験では、石英基板上の厚さ4.5 μm の薄膜磁石に対し、100 μm 幅の磁化反転を200 μm ピッチで実現した。測定磁場と完全着磁を想定した磁場解析値がほぼ一致したことから、目標とした微細着磁の実現を確認した。また、微細着磁した薄膜磁石を用いたMEMSリニアモータの実現も併行して検討し、試作、駆動に成功している。

研究成果の概要(英文)：Recently, a multilayered thin film Nd₂Fe₁₄B/Ta permanent magnet (TFPM), which not only has a high remnant flux density and a high coercive force similar to those of conventional sintered bulk neodymium magnets, but also has high heat tolerance, was developed. In this study, micro magnetization assisted by laser heating under an external DC magnetic field was proposed and tested. The laser beam conditions were determined using unsteady heat conduction analysis. Using a magnetic field analysis simulator, neodymium PM arrays are designed to apply the DC magnetic field to the TFPM. Magnetized strips of 0.1mm in width were patterned in the TFPM of 4.5micrometer in thickness. Agreement between measured and simulated magnetic flux densities over the TFPM was obtained. Furthermore, a MEMS linear motor utilizing TFPM was also developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：ネオジウム磁石 薄膜 微細着磁 リニアモータ レーザ加熱

1. 研究開始当初の背景

薄膜では、バルクのネオジウム磁石に匹敵する残留磁束密度と保磁力を長年達成できなかった。これに対し、日立金属の上原が、NdFeB と Ta の多層膜 (NdFeB/Ta 多層膜) をスパッタ成膜することで、その問題を解決した。報告者は、このネオジウム磁石薄膜に MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 用材料としての将来性を強く感じ、H20~21 年度の挑戦的萌芽研究「高性能永久磁石薄膜マイクロアクチュエータ」で、上原と共同で、上記薄膜を用いた、大変形可能な片持ちはりアクチュエータや、面外の駆動が可能な 2 自由度アクチュエータの試作を実施した。この薄膜を、マイクロリニアモータ、マイクロ反磁性磁気浮上などに今後展開するためには、磁石薄膜のマイクロピッチ (0.1mm 以下) での多極着磁が不可欠である。

これに対して、申請者は着磁機メーカーと共同で、0.1mm ピッチの多極着磁用蛇行コイルを試作し、常温でのパルス着磁を試みた。しかしながら、磁石薄膜の保磁力が高く、着磁時にコイルに大電流が必要なため、ジュール熱によるコイルの断線により、ネオジウム磁石薄膜本来の磁石性能を引き出せていない。

一方、磁気記憶の分野では、磁石の保磁力が温度上昇とともに低下する特性を利用して、磁石薄膜をレーザーで急速加熱後、冷却中に着磁することで、常温時よりも低い磁界で、高い着磁特性を達成する方法 (熱アシスト着磁) が知られている。

2. 研究の目的

本研究では、バルクのネオジウム磁石に匹敵する残留磁束密度と保磁力を有するネオジウム磁石薄膜 (膜厚数 μm) のマイクロ多極着磁 (ピッチ 0.1mm 以下) の実現を第一の目的とする。従来の常温、空心コイルを用いた多極着磁は、着磁ピッチの狭小化、コイル断面の微小化、磁石薄膜の高保磁力のため、ネオジウム磁石薄膜への適用は困難である。このた

め、ネオジウム磁石の保磁力の温度依存性に着目し、保磁力が低下した高温状態でのマイクロ多極着磁技術の研究開発を目指した。また、上記技術が実現した場合、マイクロリニアモータなどに本技術の適用を試みた。

3. 研究の方法

(1) 提案する着磁手法

提案する微細着磁法では、磁石の加熱による保磁力の低下を利用する。保磁力の低下した磁石は、パルス磁場と比較し小さな静磁場での着磁が可能となる。提案する着磁法の概要を図 1 に示す。基板に成膜し、一方向着磁した薄膜磁石を、外部から与える静磁場中で、磁石表面をレーザーにより瞬間、かつ、局所的に加熱する。静磁場は、薄膜磁石の着磁方向とは逆にする。加熱し保磁力が低下した部分のみが外部静磁場により磁化反転する。反転した磁化は、レーザー照射停止後の基板冷却後も、維持される。

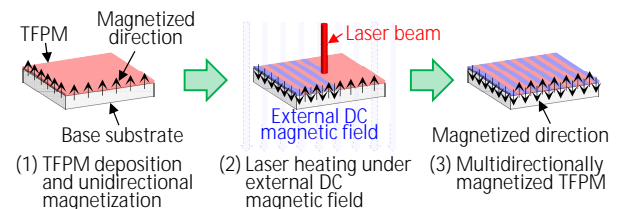


図 1 提案するレーザーアシスト着磁法

(2) 実験装置と実験条件

静磁場発生回路の設計と製作 使用する薄膜磁石は、室温において、0.94T 以上の磁場を印加することで不可逆減磁が生じることを、振動試料型磁力計 (以下、VSM) で確認している。より低い温度上昇で磁化反転を実現するためには、静磁場は大きいほうが望ましいが、一方、この磁場を超えると、非加熱部も減磁してしまう。このため、今回は、0.8~0.9T の静磁場を印加できる磁気回路の製作を目指した。

設計した磁気回路を図 2 に示す。30 × 10 × 10mm のネオジウム磁石を U 字型に組み合わせ、

磁極方向はハルバッハ状に配置した構造とした。静磁場解析ソフト（ANSYS, Inc., Maxwell 3D Ver. 15）により，試料を配置する位置において，0.8-0.9Tの磁場発生するように設計した。実際に製作した磁場発生装置を図2に示す。磁石を固定するため，非磁性ステンレス製の治具を用いた。

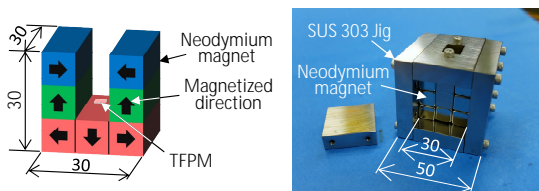


図2 着磁装置の設計

レーザー加熱条件の決定 レーザ加熱を模擬した非定常熱伝導解析を実施し，微細着磁に必要なレーザースポット径，走査速度，出力を決定した。今回使用する試料では，VSMを用いた予備測定より，300の加熱で磁化反転できることを確認したため，これ以上の加熱を目指した。

解析モデルとその物性値，および，レーザー条件を図3に示す。石英基板上に堆積した厚さ4.5 μm の薄膜磁石を，出力0.21W，波長532nm，スポット径25 μm のレーザーを100mm/sで直線状に走査し加熱するモデルとした。モデルの単純化のため，本来積層構造である薄膜磁石は単層構造とし，繰り返し周波数400kHzのレーザーは連続発振と仮定した。出力分布は，使用するレーザーをビームプロファイラ（Ophir Optronics Solutions Ltd.，

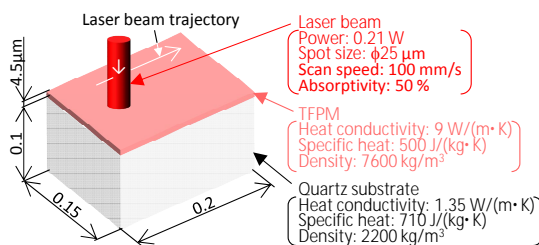


図3 レーザ加熱条件

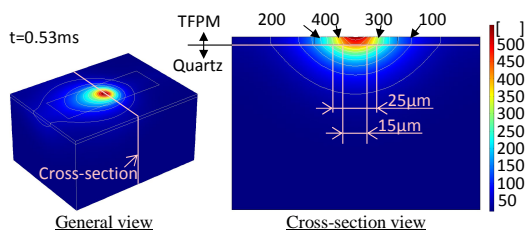


図4 レーザ加熱解析結果

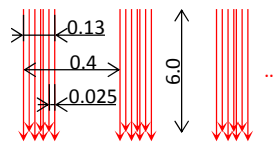


図5 加熱用のレーザー軌跡

BGP-USB-SP620)により測定した結果を用いた。レーザー反射率はダブルモノクロメータ式分光光度計(株式会社島津製作所,SolidSpec 3700DUV)で測定した結果50%であったため，レーザーが薄膜磁石を透過しないと仮定し，レーザー吸収率は50%とした。レーザー加熱は等熱流速加熱とし，その他の境界は断熱とした。解析には，汎用解析ソフト（COMSOL AB, COMSOL Multiphysics Ver. 4.3b）を用いた。

解析結果を図4に示す。この条件のレーザーで，幅25 μm の薄膜磁石が300以上に加熱できることを確認し，実験もこの条件を用いる。微細着磁実験 前述の通り製作した静磁場発生源，および，レーザー条件を用いて微細着磁実験を実施した。レーザーには，3次元走査機構を備えたYV04レーザーマーカ（Keyence Corp., MD-S9910）を使用した。図5にレーザー軌跡，および，目標とする着磁形状をそれぞれ示す。主に25 μm 間隔でレーザー走査し，200 μm 幅の磁化反転を400 μm ピッチで実現することを目指した。

4. 研究成果

微細着磁の評価のため，薄膜磁石から発生する表面磁束密度を測定した。測定では，図6に示すように，感磁面50 μm ×50 μm のホー

ル素子（旭化成エレクトロニクス株式会社，HG-0711）を用いて，感磁面への厚みも考慮し，薄膜磁石表面から100 μm 離れた位置での，薄膜磁石表面に垂直な方向成分を測定した．薄膜磁石をピエゾモータ（Physik Instrumente GmbH & Co. KG.，M-227.25）により面内一方向に移動させることで，薄膜磁石とホール素子の相対位置を変化させた．

比較のため，図7に完全な着磁を想定したモデルでの磁場分布を3次元静磁場解析ソフト（ANSYS，Inc.，Maxwell 3D Ver. 15）により計算した結果を示す．なお，磁石の残留磁束密度，および，保磁力はそれぞれ1.18T，810kA/mであり，これは，着磁に用いた試料をVSMで直接測定した値を用いている．実験した薄膜磁石から計測した磁束密度分布と，解析値との比較を図8に示す．解析値と測定値が概ね一致したことから，薄膜磁石の200 μm ピッチの完全着磁を確認した．また，レーザー照射範囲を狭めることで，目標の100 μm の着磁が可能なることも実験的に確認している．

MEMSリニアモータの試作 熱アシスト微細着磁実験の成功に先立ち，マイクロリニアモータの試作も研究スケジュールの都合上実施している．従来のマイクロコイルとパルス着磁法を適用し，0.5mmピッチで着磁した薄膜磁石を用いて，図9のようなマイクロリニアモータを設計し，図10の試作機の駆動に成功している．

今後の予定として，本研究で実現した微細着磁した磁石を使ったマイクロリニアモータの更なる高出力，小形化がある

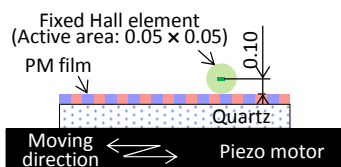


図6 表面磁束計測法

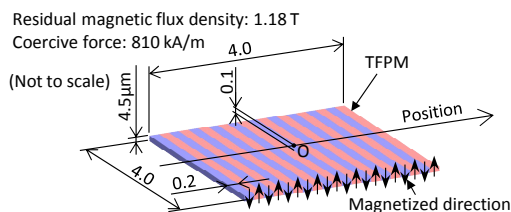


図7 着磁検証用磁場解析モデル

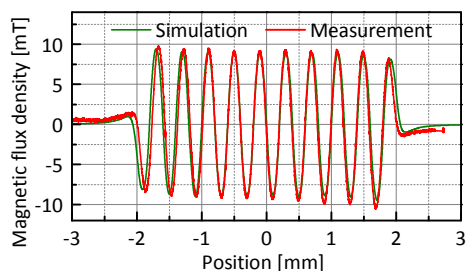


図8 微細着磁結果

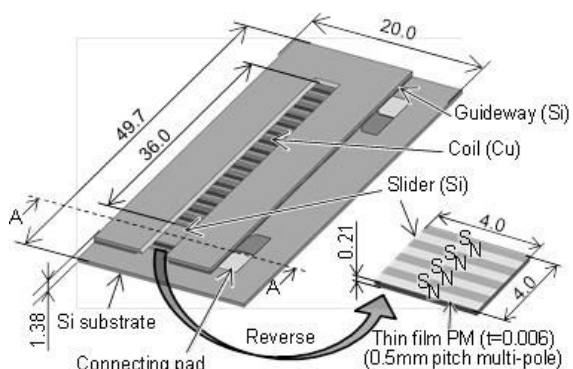


図9 MEMSリニアモータ概略図

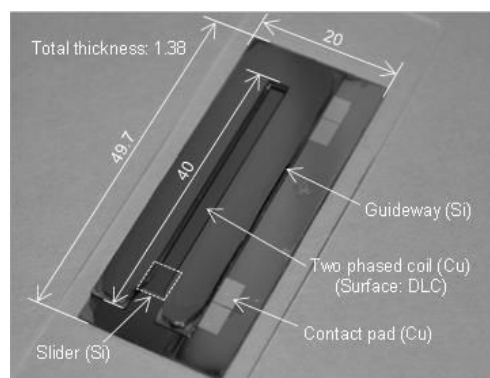


図10 試作MEMSリニアモータ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- 1) 藤原 良元, 石橋 正登, 進士 忠彦, 上原 稔, 堀 充孝, 藤原 関夫. 薄膜ネオジム磁石の交番着磁とそれを用いた MEMS リニアモータの試作, 精密工学会, Vol. 79, No. 8, p. 773-778, Aug. 2013.(査読有)
- 2) Chao Zhi, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara. Design and Analysis of a Thin Film Permanent Magnet Actuated Micro Pump, International Journal of Automation Technology, Vol. 7, No. 2, p. 196-204, Mar. 2013. (査読有)
- 3) Ryogen Fujiwara, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara. Positioning Characteristics of a MEMS Linear Motor Utilizing a Thin Film Permanent Magnet and DLC Coating, International Journal of Automation Technology, Vol. 7, No. 2, p. 148-155, Mar. 2013. (査読有)
- 4) 上原 稔, 進士 忠彦. Nd-Fe-B/Ta 多層永久磁石薄膜の特徴と磁気デバイスへの応用, 日立金属技報, 日立金属, Vol. 28, p. 14-19, Mar. 2012. (査読無)
- 5) Chao ZHI, Tadahiko SHINSHI, Minoru UEHARA. A Micro Pump Driven by a Thin Film Permanent Magnet, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol. 6, No. 7, p. 1180-1189, Oct. 2012. (査読有)

〔学会発表〕(計6件)

- 1) Ryogen Fujiwara, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara, Elito Kazawa, Micro Magnetic Patterning of Thin Film Neodymium Magnet for MEMS Devices, The 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Taiwan National University, 12-15th of Nov., 2013. (査読有)
- 2) 藤原 良元, 進士 忠彦, 上原 稔. 薄膜ネオジム磁石のレーザアシスト微細着磁, 日本機械学会第5回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 仙台, 2013.11.5~11.7(査読無)
- 3) Chao Zhi, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara, A Valveless MEMS Pump Utilizing a Thin Film Permanent Magnet, 14th International Conference on Precision Engineering, Awaji, Vol. 523-524, pp. 551-556, 8-10th of Nov. 2012. (査読有)
- 4) Chao Zhi, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara. Design of a Micro Pump Actuator Using a Thin Film Permanent Magnet, 16TH International Conference on Mechatronics Technology, Tianjin University, p. 29-34, 16-19th of Oct. 2012. (査読有)

- 5) Ryogen Fujiwara, Tadahiko Shinshi, Minoru Uehara, Michitaka Hori, Etsuo Fujiwara, Positioning of a MEMS Linear Motor Utilizing a Thin Film Permanent Magnet, 16TH International Conference on Mechatronics Technology, Tianjin University, p. 23-28, 16-19th of Oct., 2012. (査読有)
- 6) 藤原 良元, 進士 忠彦, 上原 稔, 堀 充孝, 藤原 関夫, 薄膜ネオジム磁石を用いたマイクロリニアモータ, 2012年度精密工学会秋季大会, 九州工業大学 p. 5-6, 2012.9.14~16(査読なし)

その他

(受賞)本研究に関連し, 2012年度精密工学会秋季大会にて, ベストプレゼンテーション賞受賞, 16th International Conference on Mechatronics Technology にて, BEST PAPER AWARD を受賞した.

ホームページ等

<http://www.nano.pi.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

進士 忠彦 (SHINSHI, TADAHIKO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号: 60272720