

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26790010

研究課題名(和文)高周波ベクトル磁場検出・磁気力顕微鏡の開発と磁化ダイナミクスの解析

研究課題名(英文) Development of magnetic force microscopy for vector detection of high frequency magnetic field and the investigation of dynamic behavior of magnetization in magnetic domains.

研究代表者

木下 幸則 (Kinoshita, Yukinori)

秋田大学・理工学研究科・助教

研究者番号：10635501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ギガ(G)Hzを越える高周波の磁場は、磁気記録ヘッドや医療用ナノ磁性粒等の先進磁性デバイス/材料において、その機能発現に重要な役割を果たしている。本研究では、高周波磁場のベクトル検出(強度と方向、極性の同時検出)が可能でナノメートルの空間分解能を有する磁気力顕微鏡を開発する事を目的として、以下の成果を得た。1)常磁性探針を用いた高周波磁場の周波数変換検出法の理論を確立し、2)高周波磁場計測に適した低ノイズの磁気力顕微鏡を開発した。これらを用いて、3)高周波磁場の周波数変換検出に成功し、4)微細な磁性材料に適した、撮像速度を改善した高周波磁場イメージング手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Radio-frequency (RF) magnetic field over GHz plays important roles on the performances of recent advanced magnetic devices/materials such as a magnetic recording heads and magnetic nanoparticles for medical applications. This research aims at developing high-frequency magnetic force microscopy (MFM) which allows the vector detection/imaging of RF magnetic field on magnetic surfaces with nanometer spatial resolution. We have successfully developed a theory of frequency down conversion of RF field using paramagnetic tip and built up a MFM system for RF magnetic field measurements. And also we have demonstrated the frequency down conversion detection of RF field on magnetic recording head and improved scan speed for fine magnetic domain imaging.

研究分野：走査プローブ顕微鏡

キーワード：磁気力顕微鏡 高周波磁場 ベクトル検出 常磁性 周波数変換 磁気記録ヘッド

1. 研究開始当初の背景

磁気力顕微鏡 (MFM) は、表面の漏洩磁場と磁性探針の磁化に作用する磁気力の勾配を検出する事で磁性材料やハードディスクデバイス等の磁気デバイス表面の磁区構造観察を実現している。近年では、情報記録の高速化・高密度化が進む磁気記録分野や、磁性ナノ微粒子を用いた高周波温熱治療等の先進医療分野で、高周波で特異な機能を発現する磁性材料の研究開発が急速に進展している。こういった背景を受け、MFMの分野では、高周波磁場の空間分布計測や、高周波領域での磁性体の磁化状態の詳細な解明の実現が強く求められていた。中でも、磁気記録分野では、記録素子の小型化と発生磁場の高周波化 (~GHz) が進み、一般的なMFMを用いた磁気記録素子の製品検査では、空間分解能と高周波帯での検出感度が不足しているという状況であった。

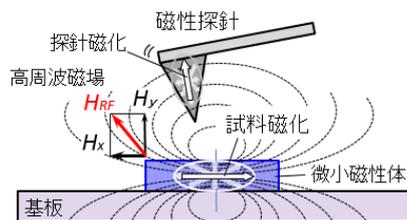


図1 ベクトル検出高周波磁気力顕微鏡

MFMの空間分解能と感度を改善するには、探針と試料間に働く様々な相互作用力の中から、磁気力のみを分離抽出する事が必要である。これには一般に、ロックインアンプを用いた変調計測が有効であり、申請者らは、通常のMFMとは異なり、磁性探針と試料間に交流の磁気力を発生させる事で磁気力の変調計測を行ってきた。本手法を用いた交流磁場計測では、試料磁場の強度と極性が同時に可視化できるものの、検出可能な周波数が、探針の機械的共振周波数 (数MHz程度) に制約され、GHz帯の高周波磁場の直接検出は困難であった。

一方、1990年代初頭から、磁気記録ヘッドから発生する高周波磁場に低周波の変調を加える事で、高周波磁場を間接的に計測する研究成果が複数報告されていた。しかし、方向と強度を持ったベクトル量である磁場に対し、方向と強度、極性の同時検出 (ベクトル検出) は困難であった。そこで、申請者らは、これまで使用してきた変調式MFMを拡張する形で高周波磁場のベクトル検出が可能な磁気力顕微鏡 (図1) を開発する着想に至り、研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究は、探針磁化の低周波変調を利用した周波数変換法と、磁化が磁場に完全に比例する常磁性探針を用いて、「GHz帯の高周波磁場の強度と方向、極性の同時検出が可能で、かつナノメートルスケールの空間分解能を

有するベクトル検出・高周波磁気力顕微鏡を開発する」事を目的とする。

具体的な課題は、以下の2点である。

- 1) GHz帯の高周波磁場を探針の機械的振動の変化で捉えるための理論を構築する。
- 2) 高周波磁場のベクトル検出に必要な探針磁化の励磁の条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)高周波磁場のベクトル検出法の理論構築

ベースとなる変調式MFMでは、交流の試料磁場とそれによって励磁された探針磁化の積に起因する交流の磁気力を、探針振動の周波数変調の強度から計測している。本研究では、これを拡張し、①高周波磁場に低周波の変調を加える事で、高周波磁場の勾配に比例する項を低周波領域に変換 (ダウンコンバート) し、②面内と垂直磁場成分の独立検出が可能な磁気力顕微鏡の計測理論を構築する。

(2)高周波対応磁気力顕微鏡の試作

磁気記録ヘッドの駆動用の高周波発振器および高周波伝送路を既設の磁気力顕微鏡に組み込み、高周波磁場計測用の磁気力顕微鏡を試作する。

(3)高磁化率な常磁性材料の開発

磁気記録ヘッドの表面では、磁極のみが高周波の強磁場を発生し、その他の領域は磁場を発生しないため、MFM観察では、磁場はゼロから記録磁場の強度である数10kOeまでダイナミックに変化する。このため、強磁性探針では磁場応答の非線形性によってMFM像にアーティファクトが生じやすい。そこで、本研究では、磁化が磁場に対して完全に線形に応答し、また強い磁場でも飽和しない常磁性探針を新たに開発する。磁化率の向上と磁場応答の線形性は両立しにくいので、磁極部分でのMFM像のプロファイルから、磁性探針材料としての良否を判断し、組成を最適化する。

(4)高周波磁気力顕微鏡の計測系の改良・調整

最初に磁気記録ヘッドを観察試料として、高周波伝送路のロスが少ない低い周波数 (<100MHz) でMFMイメージングを行う。感度と空間分解能を従来のMFMと比較して、高周波磁場のダウンコンバート検出法の有効性を確認し、徐々に磁場の周波数を上げて観察を行う。得られた磁場像から空間分解能を見積もり、探針の成膜プロセスにフィードバックし、常磁性探針の感度と先端半径を調整する。

(5)高周波磁性材料の観察実験

磁気記録ヘッドや先進医療用磁性ナノ粒子等の高周波磁場で用いる機能性磁性材料に対して、試料表面磁場のベクトル成分マッピングを実証する。

調を印加したときの、探針の振動スペクトルを示す。探針が、振幅変調された高周波磁場を受けると、探針の磁化は磁場と同じように振幅変調された周波数成分を持つ。その結果、探針試料間の磁気力には、両者の積で生じる複数の周波数成分が現れる。図では、探針振動を示す中心周波数~300kHz から変調周波数だけ離れた位置に側帯波が認められる。このことから、GHz 帯の磁場が探針の機械的振動で検出可能な低い周波数に変換され、検出されている事がわかる。

(5)高周波磁場の変調条件の最適化

本研究で提案した周波数変換法では、高周波磁場の変調周波数が低く、十分な解像度の磁気像を得るための撮像時間は、1 フレーム当たり 10 分弱である。この手法を数 10nm 程度のギャップ（磁場の極性が変わる領域）幅しかない磁気ヘッドの観察に適用した場合、熱ドリフトにより、磁気像の歪が生じ、試料磁場分布の正確な評価が困難となる。そこで、数 100Hz からサブ MHz の周波数でも高周波磁場の周波数変換検出が可能な新たな方式を考案し、1 フレーム数分程度の撮像速度の向上を実現した。これにより、近年のギャップ幅の狭い磁気ヘッドに対しても適用が可能となった。

本研究では、磁気力顕微鏡の高周波計測へ向けた改造及び、周波数変換法の実証、高周波垂直磁場イメージングの確認までを終える事ができた。今後は高周波磁場の面内検出を中心に研究を推進する予定である。

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)

[学会発表] (計 7 件)

- ① F. Zheng, S. Yoshimura, Y. Zheng, G. Egawa, Y. Kinoshita, and H. Saito, "Fabrication of high-coercivity FePt-MgO tips for magnetic force microscopy and direct measurement of tip-coercivity by pulse magnetic field", INTERMAG 2014, Dresden, Germany, 2014/3/4-8
- ② 吉村 哲, 番匠春嵐, 郑 富, 江川元太, 木下幸則, 齊藤 準:「交番磁気力顕微鏡を用いた強い直流磁場計測に向けた高磁化率 Fe 基常磁性および Ag-Co 超常磁性探針の開発」, 第 38 回日本磁気学会学術講演会, 慶應義塾大学, 2014 年 9 月 2 日~5 日
- ③ 伊集院寛仁, 滝口史典, 江川元太, 木下幸則, 吉村 哲, 齊藤 準:「ソフト磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による磁気記録ヘッドの交流磁場イメージング」, 第 38 回日本磁気学会学術講演会, 慶應義塾大学, 2014 年 9 月 2 日~5 日

④ 水谷広志, K. Srinivasa Rao, 郑 富, 吉村哲, 江川元太, 木下幸則, 齊藤 準:「高保磁力 FePt 系探針の側面方向成膜による先端先鋭化と交番磁気力顕微鏡による磁気記録ヘッドの 5 nm 分解能・交流磁場イメージング」, 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 名古屋大学, 2015 年 9 月 8 日~11 日

⑤ Y. Kinoshita, G. Egawa, S. Yoshimura, H. Saito, "Radio Frequency Magnetic Field Measurement by Using Alternating Magnetic Force Microscopy", The International Symposium on Recent Trends in Analysis Techniques for Functional Materials and Devices, Osaka University, 2015/12/3. [招待講演]

⑥ Y. Kinoshita, "Quantitative Stray Magnetic Field Measurement by Using Force Modulation Magnetic Force Microscopy with Superparamagnetic Tip", The 2nd international symposium on "Recent Trends in Analysis Techniques for Functional Materials and Devices" Osaka university, Osaka, 2017/1/18. [招待講演]

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

木下 幸則 (KINOSHITA Yukinori)
秋田大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 10635501