

令和元年6月18日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06321

研究課題名(和文) 数値解析シミュレーションによる高周波アシスト磁気記録ヘッドの提案

研究課題名(英文) Numerical simulations of write head and spin-torque oscillator for microwave-assisted magnetic recording

研究代表者

金井 靖 (KANAI, YASUSHI)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：00251786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：数値解析計算機シミュレーションにより次世代の垂直磁気記録技術の候補である高周波アシスト磁気記録(MAMR)用の高周波発振素子(STO)と記録ヘッドを研究し、(1)記録ヘッドに挿入したSTOは安定に発振し難いため、いかに安定に発振させるかが本技術のキーであること、安定に発振させるため、(2)小面積のSTOは得られる磁界強度は大きく低下せず、また安定に発振すること、(3)媒体に対して斜めのSTOは安定に発振すること、(4)記録ヘッドギャップを非平行にすること、を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代社会は膨大なデジタルデータの蓄積と利用で成り立っている。生み出されるデジタルデータのうち、保存先のほとんどはハードディスクであり、その割合は全体の80%とも90%とも言われる。今回の成果が製品につながれば、媒体の枚数(したがってヘッド数)を増やすことなく記憶容量を現状の3倍程度にすることができる。これは単純に同じコストで3倍のデータを保存できるだけでなく、同じ消費電力で3倍のデータを保存でき、省エネルギーにもつながる。

研究成果の概要(英文)：Spin-torque oscillator (STO) and write head used for microwave-assisted magnetic recording (MAMR), one candidate for the future perpendicular magnetic recording, was investigated by using a computer simulation called micromagnetic simulation. We found that (1) once STO was inserted into write head main pole and trailing shield gap, it was hard to obtain a stable oscillation. Therefore, obtaining a stable STO oscillation is the key to realize the MAMR technology. To obtain a stable STO oscillation (2) small area STO had comparably large high-frequency field for its small area and oscillated stably, (3) STO tilted with regard to the medium surface oscillation stably, (4) non-parallel write head gap lead to a stable STO oscillation.

研究分野：工学

キーワード：高周波アシスト磁気記録 スピントルク発振素子 記録ヘッド マイクロマグネティック解析シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術の普及に伴い、誰でも簡単にデジタル情報を送受信できるようになった。その結果、生成・複製されるデジタル情報が爆発的に増加している。米国EMC社と米国IDC社が実施した2014年4月のデジタル・ユニバースの調査で、世界のデジタル情報量が2020年には44ゼタバイト(ZB = 1021 byte)に達すると予測した。2009年のデジタル情報量が0.8 ZB、2012年には2.8 ZB、2013年には4.4 ZBであったことを考えると正に情報爆発である。保存されるデジタル情報の80%以上はハードディスクドライブ(HDD)に蓄えられることから、半導体メモリの躍進は目覚ましいが、HDDや磁気記録の重要性は今後も変わらない。1977年、岩崎俊一教授(東北大学、当時)により提案された垂直磁気記録方式は、約30年を経て、2004年、東芝により製品化がアナウンスされた(発売は2005年)。2015年当時、市販のハードディスクドライブは全て垂直磁気記録方式に変わり、面密度も0.75 テラビット/平方インチ(Tbit/inch²)程度に達したが、2015年までの数年は面記録密度の更新がアナウンスされていなかった。2013年、シーゲート社から、2014年にはHGST社(現在Western Digital社)から次世代磁気記録方式のひとつと考えられているシングル記録(shingled magnetic recording: SMR)方式のHDDを既に市販していると公表された。しかし、SMR方式は熱磁気緩和のため最大面記録密度は1.5 Tbit/inch²程度と予測されており、HDDの面密度の増加は生成・複製される情報量の伸びよりも小さい。そのため、現状の記録方式では、貴重な情報(ビッグデータ)を記録できる手段が失われかねない。本申請で取り上げた、高周波アシスト磁気記録(microwave-assisted magnetic recording: MAMR)方式は熱アシスト磁気記録方式とともにHDDにおける次世代の高密度記録方式の候補である。MAMRにより超高密度を実現するためには、SMR方式が前提となる。

MAMR 研究を見渡すと、実験結果はほとんど報告がなく、報告例も計算機シミュレーションによる研究がほとんどであり、さらに最も重要な構成要素である高周波発振素子(spin torque oscillator: STO)は理想的に発振することを仮定して研究が進められていた。

蛇足ながら、研究開始当初は次世代磁気記録方式として、第1の候補は熱アシスト磁気記録(heat-assisted magnetic recording: HAMR)であり、MAMRは傍流という立場であった。情報が公開されている範囲で判断すると、多くの研究資源(人、もの、金)はHAMRに割かれ、MAMRは一部の研究機関、研究者に限られた資金の中で取り組んでいるような状況であった。

2. 研究の目的

3次元空間でLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を解くマイクロマグネティック計算機シミュレーション(マイクロマグ解析)を用い、高周波アシスト磁気記録方式の高速・高密度書き込みヘッドの構造および材料を提案する。すなわち、STO素子単体およびSTO素子と誘導型記録ヘッドの相互作用を考慮したマイクロマグ解析により、面記録密度4 Tbit/inch²以上かつ記録周波数2 GHz以上を実現する垂直磁気記録用書き込みヘッド(誘導型記録ヘッドおよびスピントルク発振素子)の構造および材料を提案する。これは、今後の高周波アシスト磁気記録方式の基礎データとなる。

3. 研究の方法

マイクロマグ解析を用いて、①STO素子単体(isolated STO)の解析を行い、構造と材料特性をおおよそ決める。②STO素子をライトヘッドに組み込んだ統合モデル(integrated model)の解析を行い、STO素子が安定に強い磁界を発生するような構造と材料の最適化を図る。また、③記録媒体磁化シミュレーションは連携研究者の協力も得て進める。④これらを繰り返し行って最適化を図る。なお、⑤マイクロマグ解析は、これまでに科学研究費補助金により開発した独自ソフトウェアおよび市販のソフトウェアとする予定であったが、計算効率を重視し、市販のソフトウェア(富士通製EXAMAG)を主体とした。

4. 研究成果

(1) 高周波発振素子 (spin torque oscillator: STO) は高周波アシスト磁気記録 (MAMR) において最も重要な構成要素であり, STO が安定に発振することは MAMR の必須条件である. 研究当初は, 図 1 に示すように, 媒体に対して垂直な STO を検討した.

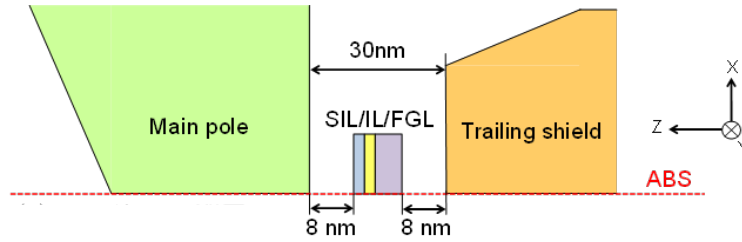


図 1 媒体に対して垂直な高周波発振素子 (STO) と記録ヘッドの模式図

STO 膜面に垂直で一様な交流磁界を加えると, 記録ヘッドに組み込まない STO (孤立 STO) は磁界の強度に比例した周波数で発振する. 具体的には, $30\text{ nm} \times 30\text{ nm} \times 10\text{ nm}$ の孤立 STO 素子は 9 kOe から 14 kOe 程度の印可磁界 (STO 膜面の中心) で発振する. しかし, STO を記録ヘッドに組み込んだ場合 (統合 STO), 記録ヘッド主磁極-トレーリングシールド間の磁界 (ギャップ中磁界) は STO 膜面で不均一であり, 孤立 STO が発振する磁界強度 (9 kOe から 14 kOe) では発振せず, 図 1 の構造では 17 kOe 程度の強い磁界を加えないと発振しない.

(2) 記録ヘッドは高い線記録密度を得るために, 発生する磁界の勾配を高く保たねばならない. そのため, ギャップを狭めることは必須であり, 最新の高周波アシスト用ではない市販品はギャップ長が 20 nm 以下である. これまでのモデル計算ではギャップ長を 30 nm としていたが, 図 2 に示すように, 高周波アシスト用記録ヘッドも 20 nm 以下として研究を進めた. また高トラック密度化のためサイドシールドも配した. 一方, 狭いギャップにより,

記録ヘッド-STO の静磁気相互作用は強くなり, STO は発振し難い. 上記の観点から, 図 3 に示すように, 厚い高周波発振層 (field generation layer: FGL) や三層構造の STO よりも構造が簡単な二層の素子が好ましい. このうち, 反射のスピントルクを利用した STO はスピン注入層を厚くせねばならないため透過のスピントルクを利用した STO が望ましい.

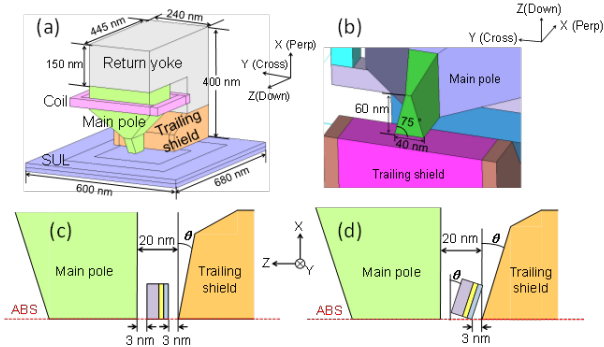


図 2 狭ギャップヘッドと STO

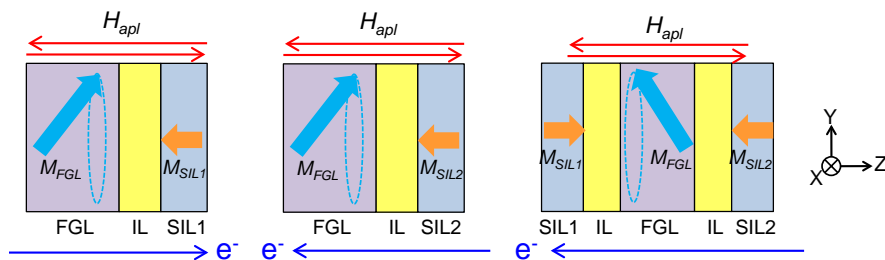


図 3 3 種類の STO 素子モデル. (a) 反射のスピントルクを用いた 2 層モデル, (b) 透過のスピントルクを用いた 2 層モデル, (c) 透過および反射のスピントルクを用いた 3 層モデル.

(3) 図 4 のような記録ヘッドの主磁極面(トレーリング側)にテーパがない場合, 斜め STO のトレーリングシールド面(ギャップ側)を主磁極面(ギャップ側)よりも傾け, STO をシールド面と同じ角度だけ傾けた構造は, 断面が矩形である(後述の台形ではない)限り, 安定に発振することを見出した. これを図 5 に示す.

(4) 現在市販されている(MAMR 用ではない)垂直ヘッドは主磁極(MP)およびトレーリングシールド(TS)が, 強い記録磁界と急峻な磁界勾配を得るために媒体に対して斜めであり, MP-TS のギャップ(MP-TS gap)も斜めである. よって, 図 6 に示すように, スピントルク発振素子(STO)も媒体に対して斜めの構造となるのが自然である. この斜め構造を前提に, 強い高周波磁界を得るため, 高周波発振層(FGL)がヘッド媒体摺動面(ABS)に露出する構造を検討した. この構造の STO は矩形ではなく, 台形であり, 矩形 STO と比べると体積が小さい. そのため, 図 7 に示すように, スピン注入層(SIL)が台形の短辺側にある, 体積が小さい構造は注入されるスピンの不足し, FGL は安定に発振しない.

(5) これまでは, STO素子のみの孤立モデルおよびSTO素子と記録ヘッドの統合モデルを検討し, 媒体の記録シミュレーションは切り離して行ってきた. 我々はこれを一括して取り扱い, シミュレーションの近似度合い

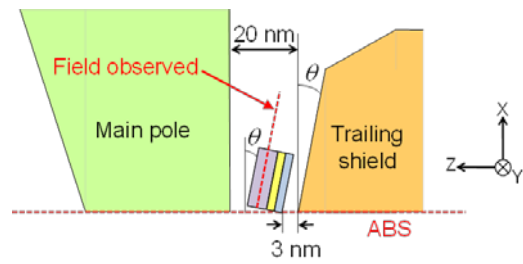
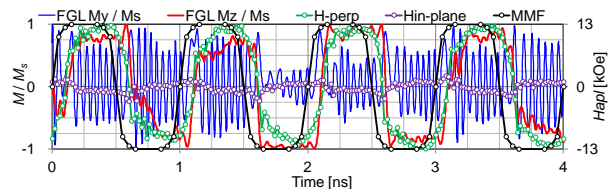
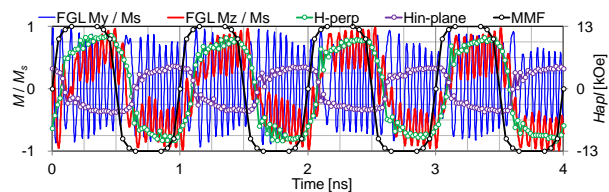


図 4 媒体面に対して斜めの(垂直ではない) STO と記録ヘッド構造の一例



(a) $\theta = 10^\circ$



(b) $\theta = 40^\circ$

図 5 STO の傾きに対する高周波磁界発生層(FGL)の回転 vs. 時刻(斜め STO モデル). $MMF = 0.12 AT_{pp}$, $J = 2.0 \times 10^8 A/cm^2$. STO 素子(30 nm x 30 nm)

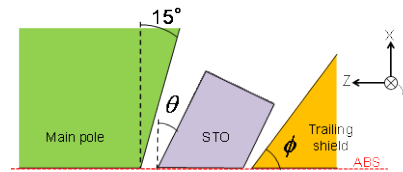
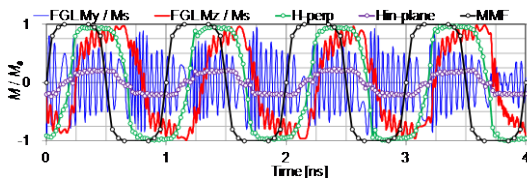
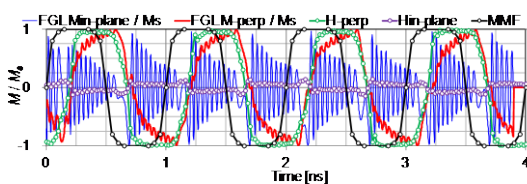
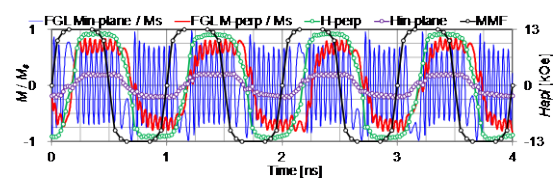


図 6 主磁極(MP)がテーパ角度(15°)とトレーリングシールド(TS)の角度(ϕ)が異なる構造



$\theta = 15^\circ, \phi = 15^\circ$, (left) FGL on MP side and (right) FGL on TS side



$\theta = 30^\circ, \phi = 30^\circ$, (left) FGL on MP side and (right) FGL on TS side

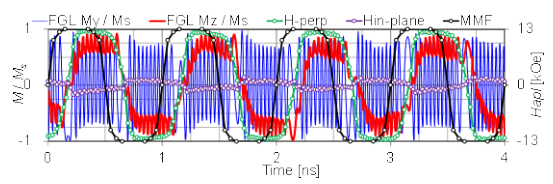


図 7 図 6 の統合型 STO における FGL の回転 vs. 時刻. FGL が MP 側にある場合と FGL が TS 側にある場合

を上げて、実際に近いモデルで検討を行った。図8(a)と同(b)より、STOの発振は記録ヘッドのギャップに挿入した際に発振が大きく乱れる。一方、図8(b)と同(c)より、媒体記録層を考慮してもSTOの発振にほとんど影響がない。なお、計算時間の問題から現状のソフトウェアおよびハードウェアでは媒体信号対雑音比(SNR)などを求めることは不可能であった。

以上、今回の事業で得たMAMRの材料および構造に対する知見を表1にまとめた。

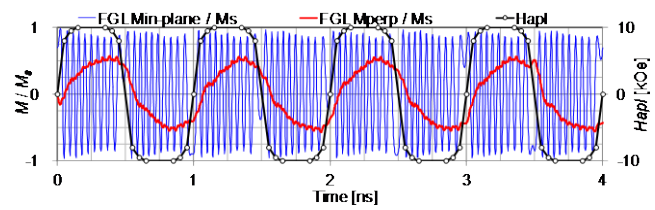
最後に、申請時の目標としていた面密度4 テラビット/平方インチ(Tbit/inch²)、記録周波数2GHzの記録は2次元平面では条件を見出せず、3次元記録の検討が必要であることを述べた。

以上の研究成果は審査付き学術論文(24編)にまとめた。また、審査付き国際会議(28件、うち招待講演6件)、審査なし国内学会(37件)および米国とメキシコの大学における招待講演(3件)にて報告した。

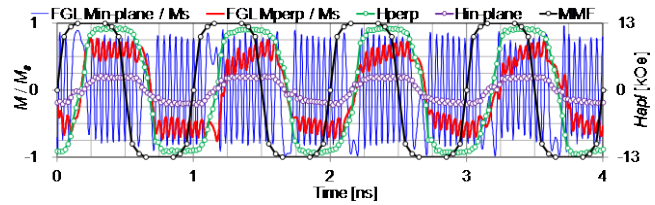
5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計24件)

1. Y. Kanai, R. Itagaki, S. J. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic model simulations considering write head, spin-torque oscillator, and double-layered medium altogether," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 55, no. 3, 3000613, Mar. 2019. (invited) DOI: 10.1109/TMAG.2018.2869208
2. Y. Kanai, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, "Micromagnetic model analysis of spin-transfer torque oscillator and write heads for microwave-assisted magnetic recording," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 53, no. 2, 3000211, Feb. 2017 (invited). DOI: 10.1109/TMAG.2016.2606494

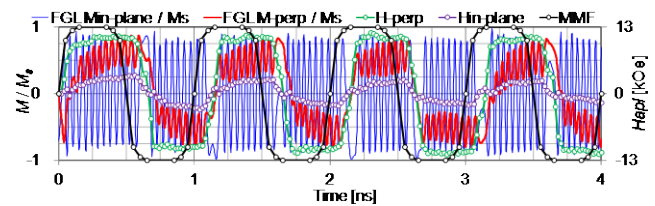
ほか22件



(a) Isolated



(b) No recording layer, with soft magnetic underlayer



(c) With recording layer, with soft magnetic underlayer

図8 FGLの回転vs. 時刻. 孤立STO, SULは考慮するが媒体記録層を考慮しない場合, SULおよび媒体記録層を考慮する場合.

表1 今回の科学技術研究補助金を得た研究により得られた知見および結果のまとめ

Parameters	Mar-19	Apr-16
Spin torque	Transmission	Reflection
STO area	20 nm × 20 nm	30 nm × 30 nm or larger
FGL $4\pi M_s$	20 kG	16 kG
SIL $4\pi M_s$	10 kG	8 kG → 6 kG
STO tilt angle	15 deg	0
MP taper angle	15 deg	0
TS angle	15 deg	0
MP - TS gap	20 nm, parallel	(1) 30 nm, parallel -> (2) 30 nm, non-parallel -> (3) 20 nm, non-parallel
FGL arrangement	MP side	TS side

〔学会発表〕（計 66 件）

1. Y. Kanai, R. Itagaki, S. Greaves, and H. Muraoka, “Micromagnetic model simulations considering write head, spin-torque oscillator and double-layered medium altogether”, *The 29th Magnetic Recording Conference (TMRC2018)*, C2, Milpitas, CA, U.S.A, Aug. 2018 (invited).
2. Y. Kanai, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, “Micromagnetic model analysis of spin-transfer torque oscillator and write heads for microwave-assisted magnetic recording,” *The 27th Magnetic Recording Conference (TMRC 2016)*, Stanford, CA, U.S.A., Aug. 2016 (invited).

ほか 64 件

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2)研究協力者

連携研究者氏名：グリーンズ サイモン

ローマ字氏名：Simon GREAVES

連携研究者氏名：村岡裕明

ローマ字氏名：Hiroaki MURAOKA

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。