

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：33108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560425

研究課題名(和文)次世代垂直磁気記録用高密度高周波記録ライトヘッドの提案

研究課題名(英文)A proposal of high-density, high-frequency recording write head for perpendicular magnetic recording in the next generation

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：高周波電流に対して最適な記録磁界を発生するための熱アシスト磁気記録ヘッドの構造を提案した。短いヨーク長、熱アシスト素子を配する凹型構造および軟磁性裏打層を配する本ヘッドによれば、最大8テラビット/平方インチの面記録密度を得る可能性を示した。
ライトヘッドのギャップ中に高周波を発生する素子(スピントルク発振素子:STO)を組み込んだ複合型ライトヘッドにおいて、ライトギャップを媒体に対して斜めに形成し、STOも斜めに製膜した構造を採用すれば、記録磁界が強くなり、かつSTOが安定して発振する可能性があることを示した。

研究成果の概要(英文)：For heat-assisted magnetic recording (HAMR), write head structure with dent for optical element, short yoke, and soft magnetic underlayer was proposed, which worked for high-frequency recording current. The maximum areal density of 8 terabit per square-inch was predicted with the write head.

For microwave-assisted magnetic recording (MAMR), tilted, not perpendicular to the media plane, spin-torque oscillator (STO) inserted into the tilted write head gap was proposed. The head had a large recording field and stable STO oscillation.

研究分野：工学

キーワード：垂直磁気記録 マイクロマグネティック解析 記録ヘッド

1. 研究開始当初の背景

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).本研究開始当初までに市販のハードディスクドライブは全て面内記録方式から垂直磁気記録方式に変わった.面密度は750ギガビット/平方インチ(Gigabit/inch²)程度に達していたが,伸びは緩やかであった.一方,熱磁気緩和のため面記録密度の限界は従来の垂直磁気記録方式では1.0-1.5 Terabit/inch²とされており,そのため,早急に新たな記録方式(次世代垂直磁気記録方式)を取り入れざるを得ない状況にあった.本研究を開始した当初は高周波アシスト磁気記録方式(Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR),熱アシスト磁気記録方式(Heat Assisted Magnetic Recording: HAMR),ビットパターン媒体(Bit-Patterned Magnetic Recording: BPMR)およびシングル記録方式(Shingled Magnetic Recording: SMR)の4つが次世代垂直磁気記録方式の候補とされていた.

2. 研究の目的

計算機シミュレーションを用いて,次世代垂直磁気記録方式の高速・高密度書き込みヘッド(ライトヘッド)を提案する.すなわち,3次元空間で,1)垂直磁気記録単磁極ヘッドおよび軟磁性2層垂直磁気記録媒体の系全体を考慮して, Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を解くマイクロマグネティック計算を行い,動的な記録ヘッド内部の磁化変化,動的な記録磁界分布などを求め,高密度および高速応答を実現するライトヘッド構造,材料を提案する.また,2)ライトヘッド,連続およびBPMの記録層を含む系全体のマイクロマグネティック計算を行う.これによって,3)2-4テラビット/平方インチ(Terabit/inch²)なる面密度を実現するための,連続媒体およびBPMに対応した次世代垂直磁気記録の重要な構成要素となる単磁極ヘッドを提案する.

3. 研究の方法

(1) 2-5 GHzという高い周波数のマイクロマグネティクス解析を行うため,現有のソフトウェアにうず電流項を加え,近似の程度を上げる.さらに,新しい計算機システムを導入

し,アルゴリズムの改良とともに,計算の高速化を図る.

(2) 現有のマイクロマグネティクス解析ソフトウェアはヘッド単独の評価に留まるため,動的なヘッド磁界計算と残留媒体計算とを組み合わせる.

(3) マイクロマグネティクスシミュレーションにより,構造と磁性材料の両面から次世代磁気記録の4種類の方式に対応した磁気記録ライトヘッドの提案を行う.

4. 研究成果

(1) 差分法のソフトウェアで,うず電流の計算は立方体構造では可能となったが,斜め構造がある場合は差分格子で渦電流の法線方向の連続性を保つことが困難であることが分かった.優先度の問題より,渦電流プログラムの記録ヘッドへの適用は断念した.計算システムの高速化は新たに導入されたハードウェアにより実現された.当初は2台の計算機を導入する予定であったが,高性能化および低廉化により3台を導入した.また,市販ソフトウェア(富士通製 EXAMAG)によりスピントルク素子を含む高周波アシスト磁気記録用ヘッドの計算を行った.

(2) 記録ヘッドの動磁界解析およびマイクロマグネティック媒体記録シミュレーションを組み合わせた評価を行った.具体的には, i)ライトヘッドの記録磁界を,時系列を追って3次元空間で,マイクロマグネティック解析により求め, ii)その結果をマイクロマグネティック媒体記録シミュレーションに引き渡し, iii)媒体残留磁化パターンを評価したところ,媒体の逆磁区核形成磁界を適当に選択することにより,記録ヘッドのシールド部から発生する不要磁界によるノイズは大幅に低減できることが分かった.一方,これまでの方法(Maxwell方程式を解く有限要素法により得た静磁界分布を媒体計算に渡して,個々に計算を進める方法)との差異は顕著とは言えないことが分かった.計算の効率を考慮すると,全体を一度に解く手法が必ずしも優れているとは言えない.

(3) 次世代垂直磁気記録システムに用いられ

るライトヘッド構造および材料の提案を行った。優先度の問題から本件に重点を置いた。

平面型記録ヘッドおよび従来構造記録ヘッドモデリングにより高速応答を決定する本質的な因子を見出した。すなわち、コイルの構造と主磁極とコイルの相対位置、シールドの構造、主磁極先端の構造、および主磁極とシールドの距離、などである。

高周波アシスト磁気記録 (microwave assisted magnetic recording: MAMR) において、STO 単体および記録ヘッドに組み込んだ場合について材料と構造の両面から検討を進め、STO と記録ヘッドの相互作用により発振条件 (材料、構造、電流密度) が厳しくなることを報告した。また、ライトギャップ (記録ヘッド主磁極とトレーリングシールド間の空間) を媒体に対して斜めに形成し、高周波を発生する素子 (スピントルク発振素子:STO) も斜めに製膜した構造 (図 1) を採

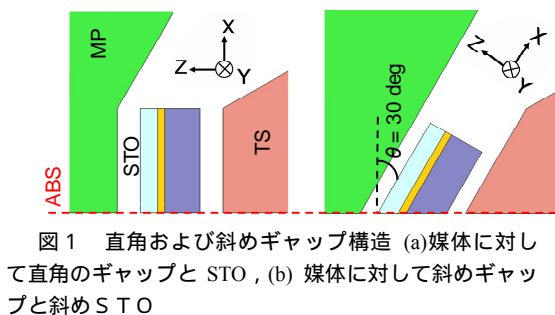
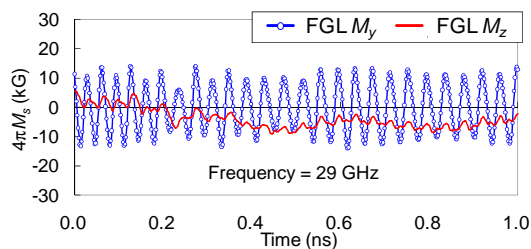
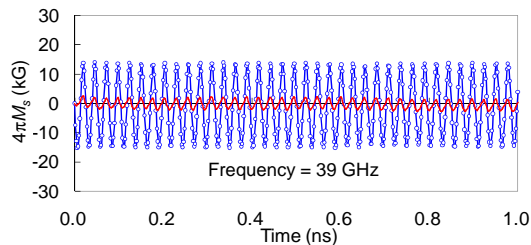


図 1 直角および斜めギャップ構造 (a)媒体に対して直角のギャップと STO, (b) 媒体に対して斜めギャップと斜め STO



(a)



(b)

図 2 (a) 直角ギャップおよび(b)斜めギャップ中に STO を配した場合の発振特性

れば、記録磁界が強く、かつ STO が安定して発振する可能性があることを示した (図 2)。

熱アシスト磁気記録 (heat-assisted magnetic recording: HAMR) について、高周波電流に対して最適な記録磁界を発生するための構造を提案した (図 3)。ヨーク長を短くする、ヒートシンクを兼ねた軟磁性裏打層を配する、などを提案した。シングル記録方式を熱アシスト磁気記録と組み合わせると面密度 8 Terabit/inch² が期待できる。なお、非シングル記録では 4.4 Terabit/inch² であった (図 4)。

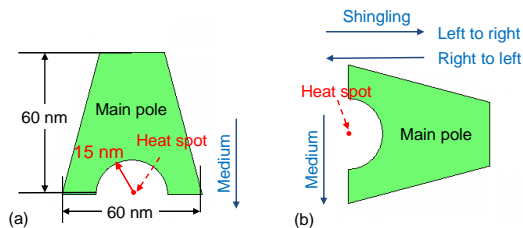


図 3 媒体摺動面から見た熱アシスト磁気記録用ヘッド (a) 磁気ポールが光素子のトレーリング側にある場合 (b) シングル磁気記録を想定し、90度回転した場合。シングルの方向は左から右 (L-R) と右から左 (R-L) を想定した。

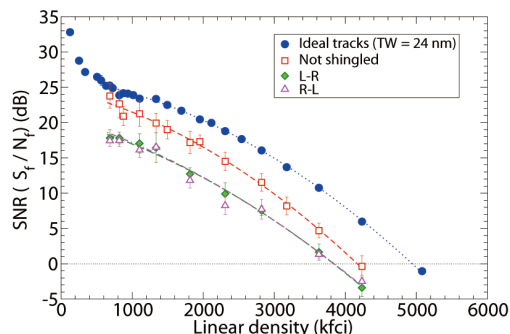
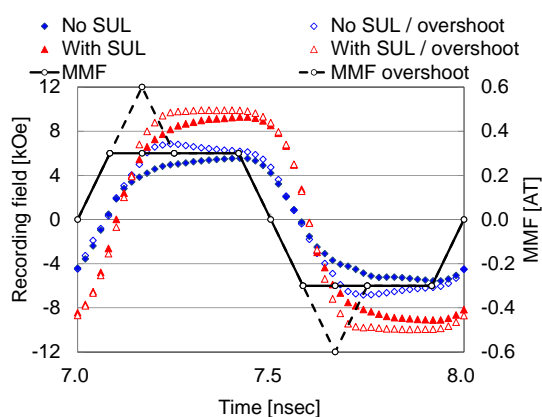
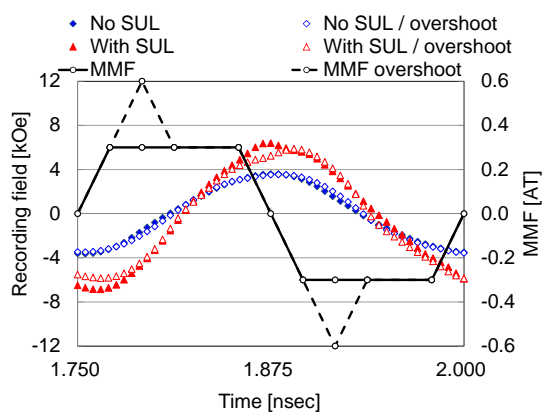


図 4 シングル記録 (L-R: 左から右と R-L: 右から左) および非シングル記録方式の線密度に対する信号対雑音比

図 5 には記録電流 1 GHz および 4 GHz に対する記録磁界の応答を示した。1 GHz では記録電流のオーバーシュートは効果があった (立ち上がりが速い、最大磁界が大きい) が、4 GHz ではほとんど効果がない。また、記録媒体の軟磁性裏打層は、特に 4 GHz で強い記録磁界を得られるので有用である。



(a) 1 GHz



(b) 4 GHz

図5 記録電流 4 GHz に対する記録磁界の応答。いろいろな構造の記録ヘッド（記録媒体の軟磁性裏層あり，なし；記録電流のオーバーシュートあり，なし）

シングル磁気記録 (shingled magnetic recording: SMR) と 2 次元磁気記録方式 (two-dimensional magnetic recording: TDMR) を組み合わせた検討を進めた。リード素子を複数個使った読み出しに関わる信号処理が主な研究課題である。申請者は記録ヘッドを担当し，研究連携者に加え，愛媛大学，シンガポール A*STAR の DSI および米国 ASTC を通じた米国諸大学と共同で研究を進めた。

ビットパターン媒体 (bit-patterned magnetic recording: BPMR) については，巨額の投資が必要であり BPMR 研究の進捗が遅れているため，今回の研究対象から除外した。

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 19 件)

Y. Kanai, S. J. Greaves, K. Yoshida, and H. Muraoka, Micromagnetic model analysis of

high frequency heat-assisted magnetic recording, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 117, 2015, pp. 17C506 - 17C506-4, DOI:10.1063/1.4908024

T. Katayama, Y. Kanai, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, Micromagnetic model analysis of integrated single-pole-type head with tilted spin-torque oscillator for high-frequency microwave-assisted magnetic recording, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 117, 2015, pp. 17C503 - 17C503-4, DOI:10.1063/1.4907328

T. Katayama, Y. Kanai, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, Model analysis of tilted spin-torque oscillator with magnetic write head for shingled microwave-assisted magnetic recording, IEEE Trans. on Magn., 査読有, Vol. 50, No. 11, 2014, 3001904, DOI:10.1109/TMAG.2014.2325609

Y. Kanai, H. Tamura, H. Hosokai, K. Yamakawa, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, Micromagnetic model analysis of planar-type write head field response and dependence on pole tip, return yoke, and shield structure, IEEE Trans. on Magn., 査読有, Vol. 49, No. 9, 2013, pp. 4970-4976, DOI:10.1109/TMAG.2013.2251893

Y. Kanai, H. Hosokai, K. Yamakawa, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka, Micromagnetic model analysis of planar type recording write heads for high transfer-rate recording, IEEE Trans. on Magn., 査読有, Vol. 48, No. 5, 2012, pp. 1723-1730, (invited).

DOI:10.1109/TMAG.2011.2171927

[学会発表](計 50 件)

Y. Kanai, S. Greaves, K. Yoshida, and H. Muraoka, Micromagnetic model analysis of high-frequency thermally-assisted magnetic recording, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM), Nov. 4, 2014, Honolulu, HI, (U.S.A.)

T. Katayama, Y. Kanai, K. Yoshida, S.

Greaves, and H. Muraoka, Micromagnetic model analysis of integrated SPT head with tilted STO for high-frequency microwave-assisted magnetic recording, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM), Nov. 4, 2014, Honolulu, HI, (U.S.A)

T. Katayama, Y. Kanai, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, Model Analysis of Oblique STO Oscillator with Magnetic Write Head for Shingled MAMR, IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG Europe 2014), May 6, 2014, Dresden (Germany)

Y. Kanai, H. Tamura, K. Yamakawa, K. Yoshida, S. Greaves, and H. Muraoka, Model Analysis of magnetic write head for shingled thermally-assisted magnetic recording, IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG Europe 2014), May 6, 2014, Dresden (Germany)

H. Tamura, Y. Kanai, K. Yoshida, K. Yamakawa, S. J. Greaves, and H. Muraoka, Planar head field responses to high-frequency write current on shield structures, ICAUMS 2012 / 36th Conference on Magnetism in Japan ,Oct. 4, 2012, 奈良県新公会堂 (奈良県・奈良市)

〔その他〕

ホームページ等

新潟県地域共同リポジトリ

<http://nirr.lib.niigata-u.ac.jp/handle/10623/6903>

6 . 研究組織

(1)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 : 0 0 2 5 1 7 8 6

(3)連携研究者

グリーブズ サイモン(GREAVES, Simon)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号 : 6 0 3 7 5 1 5 2

村岡 裕明 (MURAOKA, Hiroaki)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号 : 2 0 2 3 9 4 7 9

吉田 和悦(YOSHIDA, Kazuetsu)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号 : 9 0 3 2 7 7 1 8