

HDDの更なる高記録密度化を可能にする 次世代エネルギーアシスト記録技術 MAS-MAMR

MAS-MAMR: Next-Generation Energy-Assisted Magnetic Recording Technology for HDDs with Higher Recording Density

前田 知幸 MAEDA Tomoyuki 山田 健一郎 YAMADA Kenichiro

高度な機械学習やAIで大量のデジタル情報を処理できるようになり、HDD（ハードディスクドライブ）は、適切な待ち時間と低コストでデータにアクセス可能であることから、基幹となるストレージとして更なる高記録密度化が求められている。

東芝グループは、マイクロ波アシスト記録（MAMR：Microwave Assisted Magnetic Recording）の次世代技術と位置付けたMAS-MAMR（Microwave Assisted Switching-MAMR）の開発を進めている。実用化に向けて、今回新たなスピントルク発振素子（STO：Spin Torque Oscillator）を設計した。シミュレーションにより、STOの発振効率が向上し、マイクロ波磁界のトラック幅方向への広がりを抑制可能なことが確認できた。また、記録密度の向上も期待でき、MAS-MAMR実用化のブレークスルーにつながる技術である。

Hard disk drives (HDDs) providing access to large volumes of data with a reasonable latency time at low cost are playing a key role in information storage devices accompanying the expansion of high-level machine learning and artificial intelligence (AI). Efforts are being made to realize HDDs with higher recording density.

The Toshiba Group has positioned microwave-assisted switching microwave-assisted magnetic recording (MAS-MAMR) technology as a next-generation energy-assisted magnetic recording technology to increase the recording density of HDDs, and has been engaged in the development of MAS-MAMR aiming at its practical realization. As part of this approach, we have designed a new type of spin torque oscillator (STO) and confirmed through simulations that it can achieve an improvement in oscillation efficiency as well as a reduction in the expansion of the microwave magnetic field in the cross-track direction. This type of STO is expected to increase recording density, leading to a breakthrough in achieving the practical use of MAS-MAMR.

1. まえがき

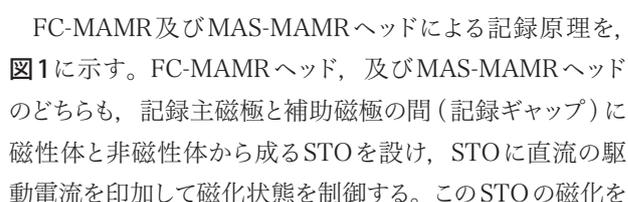
スマートフォンや、各種IoT（Internet of Things）センサー、クラウドコンピューティングなどの普及によって、世の中のデジタルデータ量は指数関数的に増大している。また、5G（第5世代移動通信システム）の普及及び自動運転の実用化により、更なるデジタルデータ量の増大が予想されており、これらのデジタルデータの機械学習やAIへの活用が図られている。大量のデジタルデータに、適切な待ち時間と低コストでアクセス可能なHDDは、これらの技術を支える基幹のストレージである。今後のデジタルデータの爆発的な増大に備えて、HDDを更に高記録密度化していくことが求められている。

HDDの高記録密度化は、これまで、主に記録再生ヘッドの素子サイズ、及び記録媒体の記録層結晶粒径を微細化し、記録ビットサイズを縮小することで実現されてきた。しかし、このスケールリングによる高記録密度化が、近年困難になりつつある。特に、記録ヘッドでは素子サイズの縮小に伴って、媒体に印加できる記録磁界強度が低下する問題

があり、高記録密度化を阻害する要因の一つとなっている。

これに対して東芝グループは、エネルギーアシスト記録技術の一つである、MAMR方式の検討を進めている。MAMR方式には、FC-MAMR（Flux Control-MAMR）方式と、MAS-MAMR（Microwave Assisted Switching-MAMR）方式があり、前者を先行して実用化し（この特集のp.7-10参照）、後者を次世代技術と位置付けて開発している。ここでは、MAS-MAMR方式の概要、この方式の実用化における問題、及びそれを克服する新たなSTOの設計について述べる。更に、設計したSTOを用いた記録密度のシミュレーション結果についても述べる。

2. MAMR技術（FC-MAMR方式、及びMAS-MAMR方式）

FC-MAMR及びMAS-MAMRヘッドによる記録原理を、1に示す。FC-MAMRヘッド、及びMAS-MAMRヘッドのどちらも、記録主磁極と補助磁極の間（記録ギャップ）に磁性体と非磁性体から成るSTOを設け、STOに直流の駆動電流を印加して磁化状態を制御する。このSTOの磁化を

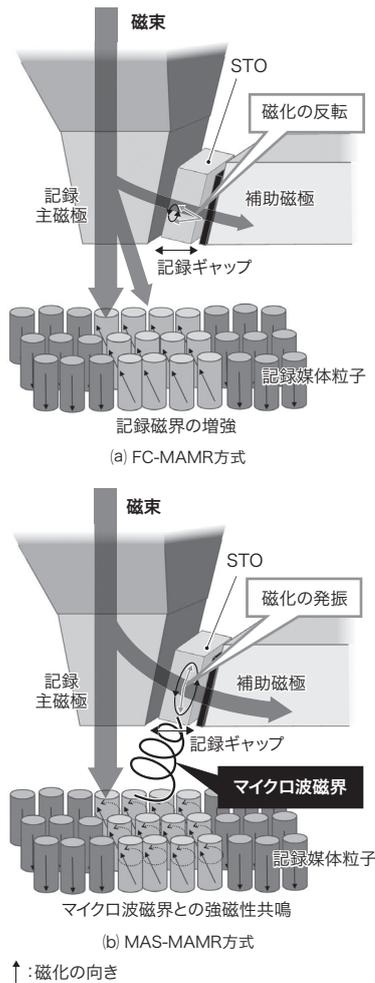


図1. FC-MAMR及びMAS-MAMRヘッドによる記録原理

FC-MAMRヘッドでは記録ギャップ内の磁束の一部を媒体表面に誘導するのに対して、MAS-MAMRヘッドではマイクロ波磁界を媒体表面に印加する。

Recording mechanism of flux control MAMR (FC-MAMR) and MAS-MAMR heads

利用して、記録能力を高める。

FC-MAMR方式では、STOの磁化を、記録ギャップに生じる磁界に対して反転させることで、記録ギャップの磁束の一部を媒体側に誘導し、記録主磁極からの記録磁界に重畳することで記録磁界を増強する。これに対してMAS-MAMR方式では、STOの磁化を歳差運動させる(以下、発振と呼ぶ)ことでマイクロ波磁界を発生させ、このマイクロ波磁界と記録媒体の磁化とに強磁性共鳴を生じさせることで、記録に必要な磁界を低減できる。FC-MAMR方式は、記録媒体磁化の強磁性共鳴を必要としないため、通常の記録媒体をそのまま利用でき、既に実用化済みである。一方、MAS-MAMR方式は、記録磁界を1/3程度まで低減できるという見積もりも報告されており⁽¹⁾、FC-MAMR方式よりも高記録密度化できるポテンシャルがある。しかし、強磁

性共鳴を効率良く生じさせる専用媒体の開発が必要なほか、STO設計にも克服すべき問題がある。

3. MAS-MAMR用STO設計の課題

MAS-MAMR用STOには、マイクロ波磁界を生じさせる磁界発生層(FGL: Field Generation Layer)と、FGLにスピントルクを注入するスピン注入層(SIL: Spin Injection Layer)があり、磁性体である記録主磁極、FGL、SIL、及び補助磁極の間には、導電性の非磁性材料の層が設けられている^{(2), (3)}。記録磁界発生時、記録ギャップ内には記録磁界に比例した磁界が発生しており、FGL及びSILは記録ギャップ内の磁界の方向に磁化される。STOに直流電流を印加すると、FGLの磁化はSILからトルクを受けて発振する。FGLの磁化の発振によってマイクロ波磁界が生じ、記録時に記録磁界に重畳されて媒体に印加される⁽⁴⁾。

従来のSTOは、FGLが1層、SILが1層又は2層から成る構成が主として検討されてきた。しかし、これを記録ギャップ内に組み込む場合、FGLと記録主磁極・補助磁極との間に磁氣的な相互作用があること、マイクロ波周波数と記録媒体の共鳴周波数に差があること、及びマイクロ波磁界のトラック幅方向への広がりがあることが、実用化の問題として挙げられる。以下に、それぞれの詳細について述べる。

3.1 STOと磁極との磁氣的相互作用

STOは、記録ギャップに設けられているが、現行ヘッドの記録ギャップ長が20 nm前後と狭いため、FGLと両磁極間には磁氣的相互作用が生じる。この磁氣的相互作用が、FGLの発振を阻害し、FGLの発振に必要な電流密度を増大させるという問題がある。

MAS効果を発揮するのに必要なマイクロ波磁界強度を得るためには、15 ~ 20 nm・T以上の発振磁化膜厚(発振層の磁化と膜厚と発振効率の積)が必要になることがこれまでの検討で分かっている。しかし、この発振磁化膜厚を得るのに必要な電流密度が、磁氣的相互作用のために3倍程度に増加することがシミュレーションで見積もられており、STOの長期信頼性に支障が出るおそれがある⁽⁵⁾。このため、MAS効果と長期信頼性を両立させるには、スピントルクの注入効率の向上や磁極との相互作用の低減が必要である。前者の対策として、例えばSILを2層化したdual-SIL型が提案されている⁽⁶⁾。

3.2 マイクロ波周波数

ギャップ組み込み型のSTOの場合、FGLの発振周波数は、記録ギャップ内の磁界強度に大きく依存する。現行ヘッドの記録ギャップ長である20 nm前後の条件で、発振磁化膜厚が20 nm・TのFGLを仮定した場合、発振周波数は

40 GHzを超える⁶⁾。一方、現行の記録媒体材料の共鳴周波数は20～30 GHzの範囲であり、整合が取れない状況にある。発振周波数の低減には、記録ギャップを広げる必要があるが、一般に広磁気ギャップ化は記録ヘッドの特性劣化を招くため、MAS-MAMRによるエネルギーアシスト効率が低い場合には十分な記録密度が得られない。したがって、MAS効果の最大化と記録ヘッド特性の両立を図る記録ギャップ長設計が、必要となる。

3.3 マイクロ波磁界分布の影響

現行の記録ヘッドでは、記録磁界のトラック幅方向への広がりを抑制する目的で、記録主磁極周辺に磁性体から成るシールドが設けられており、これにより狭トラック化を実現している。しかし、STOから発生するマイクロ波磁界は、4章で述べるようにトラック幅方向への広がりが比較的大きく、かつ現行ヘッドのシールドでは遮蔽が困難なため、トラック幅方向への書きにじみが生じ、トラック幅の狭小化が阻害される。

記録能力の向上と狭トラック化のトレードオフを解決して高記録密度化を図るには、マイクロ波磁界のトラック幅方向への漏えい抑制が必要となる。

4. MAS-MAMR実用化に向けた新設計STO

3章で述べたMAS-MAMR用STOの問題を克服するため、SILが1層とFGLが2層の合計3層で構成される、

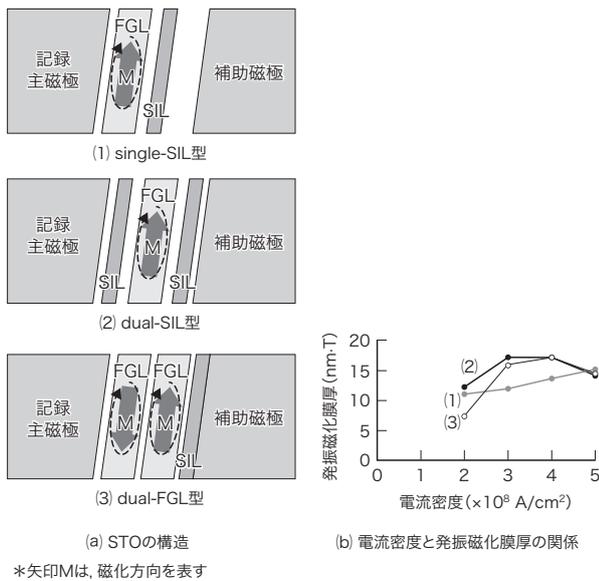


図2. STOタイプ別の発振振幅と電流密度の関係

dual-FGL型及び dual-SIL型で、大きな発振振幅が得られる。
Relationship between oscillation amplitude and applied bias current density in three types of STOs

dual-FGL型のSTOを設計した⁶⁾。二つのFGLの間には、お互いの磁化方向が反平行を向くような磁氣的相互作用を与えている。図2(a)の(1)と(2)に single-SIL型と従来の dual-SIL型、(3)に新たな dual-FGL型の構造を、それぞれ示す。図2(b)に、STOタイプ別の電流密度と発振磁化膜厚の関係を示す。dual-SIL型及び dual-FGL型では発振効率が向上し、長期信頼性を確保できる $3 \sim 4 \times 10^8$ A/cm²の電流密度範囲において、15 nm·Tを超える発振磁化膜厚を実現できることが分かる。

dual-SIL型及び dual-FGL型のSTOについて、マイクロ波磁界強度分布を、図3(a)及び(b)にそれぞれ示す。

dual-SIL型では、記録主磁極の中にマイクロ波磁界強度の大きい部分があり、記録主磁極と強い磁氣的相互作用が働いていることが示唆される。また、マイクロ波磁界がトラック幅方向に漏えいしていることが分かる。

これに対して今回設計した dual-FGL型では、従来の dual-SIL型で見られたような記録主磁極位置での強いマイクロ波磁界は認められず、記録主磁極との磁氣的相互作用

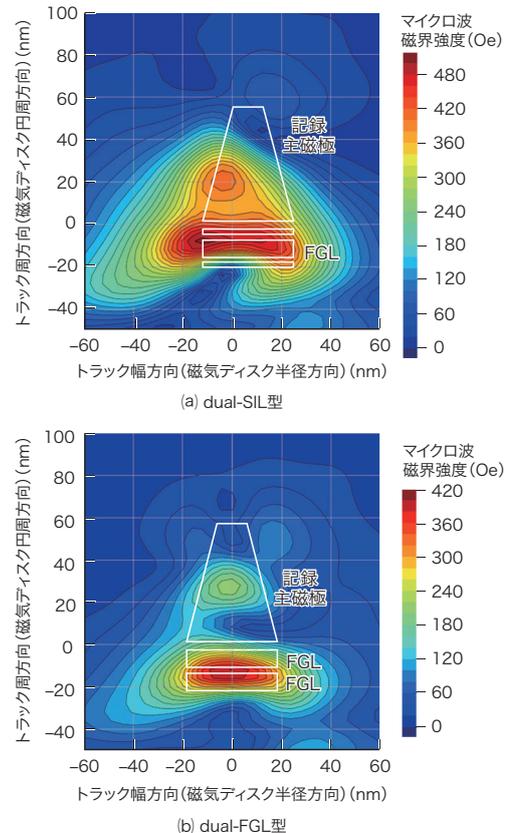


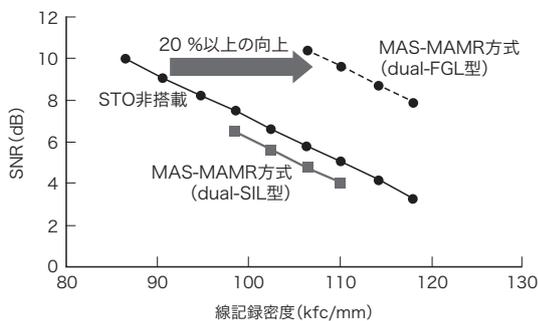
図3. STOタイプ別のマイクロ波磁界強度分布

dual-FGL型では、マイクロ波磁界強度の記録主磁極内分布が小さく、トラック幅方向の分布も抑制されていることが分かった。

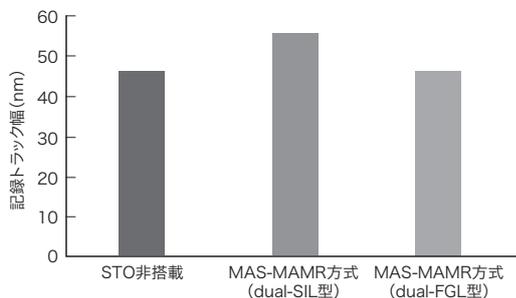
Microwave magnetic field intensity distribution in two types of STOs

が低減していることが分かる。また、トラック幅方向へのマイクロ波磁界の漏えい量が dual-SIL 型に比べて少ないことが分かる。これらは、2層の FGL 磁化が反平行を保った状態で発振していることによるものと、推定している。

図4(a)に、dual-SIL型とdual-FGL型のSTOが理想的な発振をした場合の、線記録密度(単位長さ当たりの磁化パターン)とSNR(Signal to Noise Ratio)の関係を、また図4(b)に記録トラック幅を、STO非搭載の場合と比較して示す。dual-SIL型は、発振磁化膜厚の増大が期待できるにもかかわらず、SNRは大きくなく、またトラック幅も広がる傾向にある。これは、記録ギャップ長が広がったことに加え、図3に示したdual-FGL型とのマイクロ波磁界分布の違いによるものと考えられる。これに対してdual-FGL型は、SNRが増加し、STO非搭載の場合と比較して、同じSNRと記録トラック幅の条件で、20%以上高い線記録密度が得られる結果となった。これらのシミュレーション結果から、dual-FGL型のSTOは、MAS-MAMR方式に適用する場合の問題を克服可能であり、実用化に向けて有望な素子構成であると考えられる。



(a) 各方式における線記録密度とSNR



(b) 各方式における記録トラック幅

fc: 磁化反転

図4. STO非搭載の場合とSTOタイプ別のMAS-MAMR方式における、記録性能のシミュレーション結果

dual-FGL型のMAS-MAMR方式では、STO非搭載の場合に比べて20%以上高い線記録密度を期待できることが分かった。

Results of simulation of recording performance of conventional method without use of STO and MAS-MAMR methods

5. あとがき

HDDの更なる高記録密度化を実現するエネルギーアシスト記録技術において、MAS-MAMR技術を次世代の最有力候補と位置付けて、その実用化の検討を行った。実用化における問題を洗い出し、それらを克服できる新たなSTOとして、dual-FGL型を設計した。シミュレーションにより、STOの発振効率が向上し、マイクロ波磁界のトラック幅方向への広がりを抑制できることを確認した。更に20%以上の記録密度の向上が期待でき、設計したSTOがMAS-MAMR方式の実用化のブレークスルーとなり得ることが分かった。

現在、MAS-MAMR実用化に向けて、専用媒体の最適設計とともに、試作機を用いた記録密度の向上効果の実証を進めている。

文 献

- (1) Zhu, J. G. et al. Microwave Assisted Magnetic Recording. IEEE Trans. Magn. 2008, **44**, 1, p.125-131.
- (2) Shiroishi, Y. et al. Future Options for HDD Storage. IEEE Trans. Magn. 2009, **45**, 10, p.3816-3822.
- (3) Xi, H. et al. Microwave generation by a direct current spin-polarized current in nanoscale square magnets. Appl. Phys. Lett. 2004, **84**, 24, p.4977-4979.
- (4) Narita, N. et al. Analysis of Effective Field Gradient in Microwave-Assisted Magnetic Recording. IEEE Trans. Magn. 2014, **50**, 11, 3203004.
- (5) Takagishi, M. et al. Design Concept of MAS Effect Dominant MAMR Head and Numerical Study. IEEE Trans. Magn. 2021, **57**, 3, 3300106.
- (6) Narita, N. et al. "Study of direction of microwave chirality effect on recording property in MAMR." The 26th Magnetic Recording Conference (TMRC 2015), Minneapolis, MN, 2015-08, IEEE. 2015, p.1-20.



前田 知幸 MAEDA Tomoyuki

研究開発センター 先端デバイス研究所 ストレージデバイス技術ラボラトリー
日本磁気学会会員
Storage Device Technology Lab.



山田 健一郎 YAMADA Kenichiro

研究開発センター 先端デバイス研究所 ストレージデバイス技術ラボラトリー
Storage Device Technology Lab.