

HDDの高記録密度化を可能にする マイクロ波アシスト磁気記録技術

Microwave Assisted Magnetic Recording Technology for HDDs Achieving Higher Recording Density

前田 知幸 MAEDA Tomoyuki 山田 健一郎 YAMADA Kenichiro

大量のデジタルデータに、適切な待ち時間かつ低コストでアクセス可能なHDD（ハードディスクドライブ）は、高度な機械学習やAI技術の実現を支える情報ストレージとして、今後も更なる高記録密度化が求められている。しかし、ヘッドの小型化や記録媒体の微細化で高記録密度化を進めていく従来方式は、物理的な限界に近づきつつある。

東芝グループは、HDD高記録密度化のブレークスルー技術として、記録ヘッドにスピントルク発振素子（STO：Spin Torque Oscillator）を設けて記録媒体への記録能力を向上させる、マイクロ波アシスト磁気記録（MAMR：Microwave Assisted Magnetic Recording）方式の開発を進めている。今回、超小型のSTOと、大規模なMAMRシミュレーション技術を開発し、MAMR方式のHDD試作品により記録性能が従来方式に比べ向上することを確認した。

The capability of hard disk drives (HDDs) to store and provide access to large volumes of digital data with an appropriate latency time at low cost is resulting in increasing demand for HDDs with higher recording density as information storage devices supporting the development of high-level machine learning and artificial intelligence (AI) technologies. However, incremental improvements in conventional methods for achieving higher density that depend on downsizing of the magnetic heads and miniaturization of the bit size on the recording media are close to reaching a limit.

As a solution to this situation, the Toshiba Group has been engaged in the development of microwave assisted magnetic recording (MAMR) technology and has achieved a technological breakthrough in increasing the density of HDDs using a head with a spin torque oscillator (STO) to enhance the recording performance. We have now developed an extremely compact STO and a large-scale simulation technology for MAMR. We have conducted demonstration tests of prototype HDDs using the newly developed MAMR technologies, and confirmed that the MAMR HDD achieves higher recording performance compared with conventional HDDs.

1. まえがき

スマートフォンや、各種センサー、クラウドコンピューティングなどの普及により、世の中で生成されるデジタルデータは指数関数的に増大している。これに加えて、今後5G（第5世代移動通信システム）や自動運転などが実用化されれば、より一層のデジタルデータの増大が見込まれる。また、これらのデジタルデータを活用した、高度な機械学習などAI技術の開発も進められている。大量のデジタルデータに、適切な待ち時間かつ低コストでアクセス可能なHDDは、それらの技術の実現を支える情報ストレージとして、今後も更なる高記録密度化が求められている。

従来の高記録密度化は、基本的にはスケールアップ、すなわち記録再生ヘッドの素子サイズの縮小、及び記録媒体の記録層結晶粒の微細化により実現されてきた。しかし、近年、スケールアップによる高記録密度化は物理的な限界に近づきつつある。記録ヘッドにおいては、主磁極の寸法縮小に伴い、記録に必要な記録磁界の確保が難しくなってきた。また、記録媒体においては、記録層結晶粒の微細化

に伴い、記録磁化が環境温度の熱エネルギーによって不安定化する、熱擾乱（ねつじょうらん）の影響が顕著になりつつある。熱擾乱の耐性を向上させるには、記録媒体の記録層結晶粒の磁気異方性エネルギー K_u を高める必要があるが、一般に、高 K_u 化は、記録に必要な磁界強度の目安となる記録媒体の保磁力の増加を招く。すなわち、スケールアップ、記録安定性、及び記録容易性は、互いに相反する要求となっており、HDDの高記録密度化におけるトリレンマと呼ばれている。

このトリレンマを打破するブレークスルー技術として、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方式の開発を進めている。ここでは、MAMR方式について、熱アシスト磁気記録（HAMR：Heat Assisted Magnetic Recording）方式との比較や、動作原理、MAMR方式のHDD試作品による記録再生実験の結果などについて述べる。

2. エネルギーアシスト記録技術

エネルギーアシスト記録技術としては、MAMR方式と

HAMR方式の二つが主に検討されている。MAMR方式は、STOで発生させたマイクロ波を記録磁界に重畳し、記録に必要な磁化反転磁界を低減させることで、記録容易性を高める。これに対してHAMR方式は、近接場光を用いて記録媒体を局所的に加熱し、記録層結晶粒をキュリー温度^(注1)近傍まで昇温して記録媒体の保磁力を低下させることで、記録容易性を高める。

両方式で記録密度のポテンシャルを比較すると、MAMR方式は、磁化反転磁界を1/3程度に低減できるとの見積もり⁽¹⁾がある一方で、HAMR方式は、記録媒体をキュリー温度まで加熱することで、理論上必要な記録磁界をゼロ近傍まで低減できる。しかし、現在、記録媒体に用いられているコバルトクロム白金 (Co-Cr-Pt) 合金材料は、組成にもよるが、キュリー温度が500℃以上と高温であるため、HAMR方式の適用が難しく、HAMR用の新しい記録媒体材料の開発が必要となる。また、高温に加熱することによる記録媒体表面の保護層及び潤滑剤層の特性劣化も懸念される。東芝グループは、両方式が持つ特徴を鑑み、MAMR方式によるエネルギーアシスト記録技術のいち早い実用化を目指している。

3. MAMR方式の動作原理

MAMR方式は、記録磁界にマイクロ波を重畳させて記録媒体に印加し、記録媒体の磁化との磁気的相互作用、すなわち強磁性共鳴を生じさせることで記録磁化を大きく歳差運動させる。その結果、従来方式に比べ、低い記録磁界で記録媒体の磁化反転が可能になる。したがって、記録ヘッドでは、新たにマイクロ波を発生させる素子が必要であり、記録媒体では、所定のマイクロ波との適切な相互作用を生じさせることが必要となる。

3.1 MAMR用記録ヘッド

MAMR用記録ヘッドには、マイクロ波を効率良く発生させる素子として、STOが用いられる。図1に示すように、STOは記録磁界を生じさせる主磁極と補助磁極のギャップ間に挿入された構成となっている。また、STOは、マイクロ波を発生させるマイクロ波発生層 (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) を備えており、磁性体である主磁極、SIL、FGL、補助磁極の間には導電性の非磁性材料から成る層が設けられている^{(2), (3)}。記録時は、ギャップ内には記録磁界に応じた磁界が発生しており、FGL及びSILはギャップ内磁界の方向に磁化される。ここで、DC (直流) のSTO駆動電流を印加すると、SILとFGLの間のスピントルクを介した相互作用により、FGLの磁化が歳差運動を起こす (以下、

(注1) 強磁性体が常磁性体に変化する転移温度。

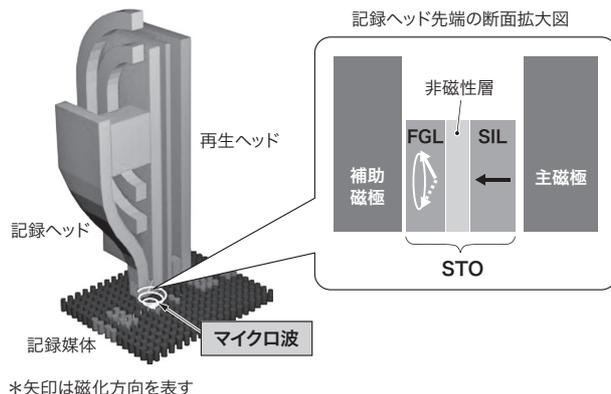


図1. MAMR用記録再生ヘッドの構造

記録ヘッド先端の主磁極と補助磁極のギャップ間に、STOが挿入されている。

Structure of MAMR read and write heads

発振と呼ぶ)。FGLの磁化の発振によってマイクロ波が発生し、記録磁界に重畳されて記録媒体に印加される⁽⁴⁾。

3.2 MAMR用記録媒体

MAMR用記録媒体には、STOから印加されたマイクロ波に対し、記録媒体結晶粒の磁化との強磁性共鳴を効率良く生じさせることが求められる。具体的には、記録媒体結晶粒の異方性磁界 H_k を、マイクロ波の発振周波数に対して共鳴条件を満たすように調整する必要がある。一方で、 H_k の増加は、記録媒体の保磁力の増加を招く。このため、記録層を H_k の異なる層で多層化することで、マイクロ波アシスト効率と適度な保磁力の両立を図るなどの工夫がなされている。

4. MAMR方式の実現に向けた要素技術開発

MAMR方式の実現を目指し、STOの設計を含むMAMRシミュレーション技術を開発した。以下に、この技術を用いて開発したMAMR用記録再生ヘッド・記録媒体による記録再生実験結果を示す。

4.1 STO技術

マイクロ波発生源である超小型のSTOを試作した。このSTOの抵抗値の変化 dR と印加磁界 H の関係を図2に示す。ギャップ内磁界に相当する磁界の印加及びSTO駆動電流の印加により、FGLの磁化の発振に対応して dR が大きくなることを確認した。ここでSTO発振周波数は22 GHzであった。 dR は H の方向 (正負) に対して対称であり、記録磁界が正負のいずれの場合においても同様な発振をすることが確認された。これらにより、STO発振周波数・発振特性ともに良好な、超小型のSTOを実現した。

4.2 MAMRシミュレーション技術

記録磁界の印加、STOの発振、記録媒体の磁性粒子の

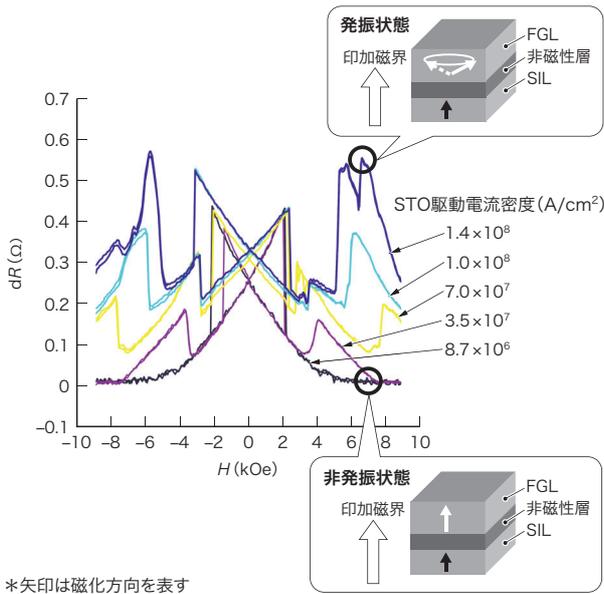


図2. STOのdRとHの関係

FGLの磁化状態に応じて、dRが大きくなっている。

Relationship between rate of change in STO resistance and applied magnetic field

応答、及び記録磁区の形成といった一連のMAMR過程を統合的に解析できる、大規模なMAMRシミュレーション技術を開発した。計算規模が非常に大きいため、機械学習などでも使用されているGPU (Graphics Processing Unit) 上で動作するようにした。

まず、簡易的なMAMR用記録ヘッドモデルで、STO発振特性と発生するマイクロ波を計算した。その結果、STOは21 GHzで発振しており、マイクロ波はSTO近傍に局在していることが分かった。これは、MAMR方式に適した発振状態と考えられる。次に、STO及び記録ヘッドから発生する磁界を用いて、記録媒体への記録シミュレーションを実施した。その結果、20 GHzのマイクロ波の印加によって、SNR (Signal to Noise Ratio) が、最大7 dB向上することを確認した(図3)。このことは、MAMR方式が実現可能であり、従来方式よりも高記録密度化できることを示している。

4.3 MAMR用記録再生ヘッド・記録媒体を用いたMAMR技術の検証

上記のMAMRシミュレーション技術を用いて設計したSTOを搭載したMAMR用記録再生ヘッドを試作し、MAMR技術の検証を行った。STO発振周波数を測定した結果、23 GHzで安定して発振していることを確認した。次に、記録媒体の記録特性を確認した。図4は、記録励磁電流 I_w に対する上書き特性の変化を示しており、MAMR方式(STOオン時)では上書き特性が約10 dB向上することを確認し

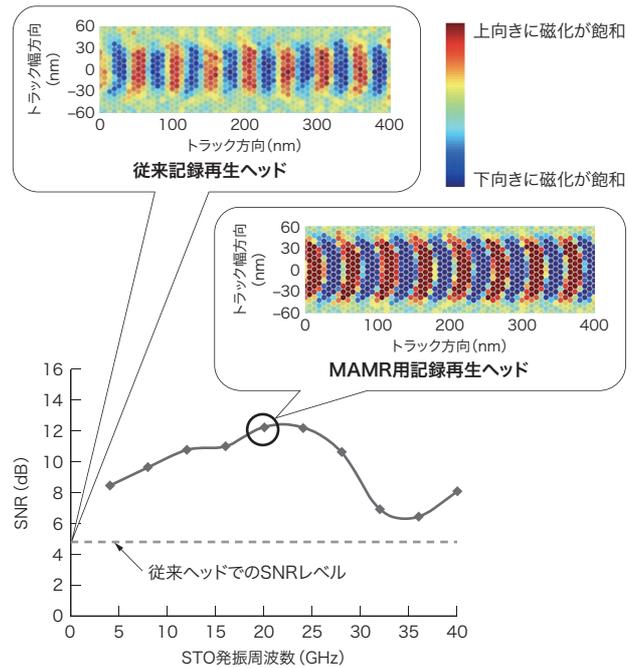


図3. MAMR用記録再生ヘッド・記録媒体モデルによるシミュレーション結果

MAMR用記録再生ヘッドでは、マイクロ波を印加することで、最大7 dBのSNR向上効果が得られることが分かった。

Results of simulations of signal-to-noise ratio (SNR) of conventional and MAMR read and write heads

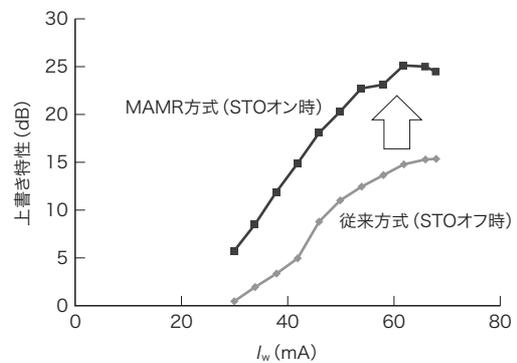


図4. MAMR用記録再生ヘッドの記録特性の評価結果

適切な I_w では、STOを駆動することで、MAMR方式の上書き特性が約10 dB向上することを確認した。

Results of evaluation of overwrite performance of MAMR read and write heads

た。これは、4.2節の記録シミュレーションから得られた結果と同様に、STOから発生したマイクロ波により良好な記録が可能であること、すなわちMAMR方式が検証されたことを示している^{(5), (6)}。これらの結果から、MAMR方式は、トリレンマを打破する高 K_u 記録媒体への記録が可能で、次世代HDDの高記録密度技術として有望であると考えられる。

5. MAMR 用記録再生ヘッド・記録媒体を実装した HDD 試作品での評価

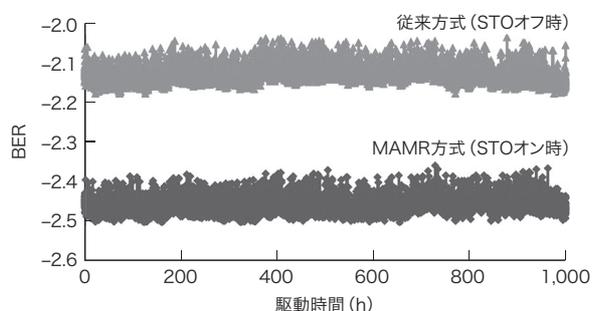
東芝グループは、このMAMR方式を適用した記録再生ヘッド・記録媒体を搭載したニアライン向け3.5型HDDの開発を進めている。記録再生ヘッド用プリアンプにSTO駆動用電源を追加し、記録媒体9枚、MAMR用記録再生ヘッド18本を実装した3.5型HDD試作品において、多台数での評価を行った。図5にビット誤り率(BER)の経時変化について、従来方式(STOオフ時)とMAMR方式(STOオン時)とで比較した結果を示す。記録媒体は、従来方式と類似の記録媒体材料を用いており、現行製品の最高記録密度に近い記録密度で得られたデータである。MAMR方式(STOオン時)では、BERが大きく改善していることが分かる。

一般に、STO駆動電流が大きいほどマイクロ波の強度が大きくなるため、MAMRアシスト効果も増大し、BERの改善量も大きくなる。しかし、過大な電流を印加すると、ジュール発熱やSTO内のエレクトロマイグレーションなどによって、信頼性が低下することが懸念される。図5に示した例では、1,000hまで記録動作を繰り返してもBER特性に変化は見られず、懸念されたSTOの劣化は確認されなかった。また、適正なSTO駆動条件を把握することもできた。

今後、更なる高信頼化を実現できるMAMR用記録再生ヘッドの開発、及びSTO駆動条件の適正化を進め、従来のHDDとほぼ同様の仕様・製品寿命を満足する大容量HDDの実現を目指していく。

6. あとがき

HDDの高記録密度化のトリレンマを打破するエネルギーアシスト記録技術において、MAMR方式を次世代有力候



*BERは、常用対数表示

図5. MAMR方式のHDD試作品の長期信頼性評価

MAMR方式ではBERの改善効果が見られ、1,000hまで安定動作していることを確認した。

Results of long-term reliability tests of prototype MAMR HDDs

補と位置付け、その実用化の検討を行った。マイクロ波発生源である超小型STOの動作を含む、統合的な大規模MAMRシミュレーション技術を開発し、MAMR方式が実現可能であることを示した。また、この結果を用い、超小型STOを搭載したMAMR用記録再生ヘッドを作製して記録媒体への記録再生実験を行うことで、上書き性能の向上効果及びBERの改善効果を実機で確認した。これにより、MAMR方式は、トリレンマを打破する記録技術として有望であることが実証できた。現在、MAMR用記録再生ヘッド・記録媒体を搭載した、ニアライン向け3.5型HDDの製品化に向けた開発を進めている。

更なる高記録密度化には、記録媒体の記録層結晶粒の微細化と高 K_u 化を推し進める必要がある。近年、現行のCo-Cr-Pt合金の数倍から数十倍の K_u が得られる材料として、鉄白金(Fe-Pt)規則合金が検討されている⁽⁷⁾。MAMR方式の実現と記録媒体の新材料開発により、今後もHDDの高記録密度化を推進していく。

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) Yamada, K. et al. "STO Oscillation and Its AC Field in MAMR Heads". Digests of The 24th Magnetic Recording Conference TMRC 2013, Tokyo, 2013-08, IEEE. 2013, Session E-E1, p.64-65.
- (6) Takeo, A. "MAMR - R/W Performance Improvement by Mag-Flip STO Assist". 2014 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2014). Dresden, Germany, 2014-05, IEEE. 2014, Session AD-02.
- (7) Weller, D. et al. High K_u materials approach to 100 Gbits/in². IEEE Trans. Magn. 2000, **36**, 1, p.10-15.



前田 知幸 MAEDA Tomoyuki
研究開発本部 研究開発センター
バックエンドデバイス技術ラボラトリー
日本磁気学会会員
Backend Device Technology Lab.



山田 健一郎 YAMADA Kenichiro
研究開発本部 研究開発センター
バックエンドデバイス技術ラボラトリー
Backend Device Technology Lab.