Influence of Write Head Width in Discrete Track Recording

K. Nishikawa, H. Teguri, M. Ohtake, M. Hashima*, A. Iida, S. Eguchi, and A. Tanaka

Storage Laboratories, Fujitsu Laboratories Ltd., 10-1 Morinosato-wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0197, Japan

*Business Incubation Laboratories, Fujitsu Laboratories Ltd., 10-1 Morinosato-wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0197, Japan

To investigate the influence of the variation of the write track width in the discrete track recording, we calculated the off-track capability (OTC) of the write/read head using Landau-Lifshitz-Gilbert micromagnetic simulations. Recently, the OTC has become increasingly important in the system design of the hard disk drive (HDD). As for the write head, it is a serious problem that the write track width varies significantly in the manufacturing processes. In the simulations, we evaluated the OTC of the write/read head as a function of the write track width on both conventional and discrete track media from the viewpoint of the signal-to-noise ratio (SNR). As a result, we found that the OTC of write/read head on discrete track media was superior to that of conventional media for variations of the write track width.

Key words: micromagnetics simulation, write track width, discrete track medium, off-track capability, signal-to-noise ratio

ディスクリットトラック記録方式における記録トラック幅ばらつきの影響

西川 清, 手操弘典, 大竹雅哉, 橋間正芳*, 飯田安津夫, 江口 伸, 田中厚志

株式会社富士通研究所 ストレージ研究所, 神奈川県厚木市森の里若宮 10 - 1 (〒243-0197)

*株式会社富士通研究所 ビジネスインキュベーション研究所, 神奈川県厚木市森の里若宮 10 - 1 (〒243-0197)

1 はじめに

ハードディスク装置 (HDD) が垂直記録方式へと移り、大容量化・高密度化へ流れは留まることを知らない。ヘッド・媒体間の物理的スペーシングが究極に狭められた状況において、高密度記録を実現していくためには、数多くの個別の技術的課題を克服するのは勿論のこと、ヘッド、媒体、および装置のそれぞれのマージンの最適な配分が重要となってきた。ヘッドに関して言えば、トラック密度の向上に伴い、記録トラック幅 (記録ヘッドにおける主磁極のトラック幅方向の物理的寸法、以下同様) が縮小し、ヘッド磁界強度は低下する。ある一定の必要ヘッド磁界を確保するため、狭い記録トラック幅を精度良く製造上コントロールし、その記録トラック幅ばらつきを抑えていくことが、ハードディスク装置を量産していく上でますます重要となってきた。現状、最新の微細加工技術を用いた場合でも、目標とする記録トラック幅に対して、標準偏差でおよそ 10 % 程度のばらつきが生じてしまう。

一方、記録媒体においては、サイドイレーズの抑制、およびグラニュラ粒子サイズ縮小に対する熱安定性の確保から、媒体異方性磁界 (H_k) を記録可能な範囲で、ぎりぎりまで高くする傾向にある。したがって、目標とする寸法よりも記録トラック幅が狭く出来上がった場合に記録し難くなり、媒体磁化の信号とノイズの比 (SNR) を十分に確保できなくなる可能性がある。逆に、記録トラック幅が広く出来上がった場合には、自己トラックを十分に飽和記録できたとしても、隣接トラックへの漏れ磁界の増大により、許容範囲以上のサイドイレーズが生じてしまう。記録ヘッドにおけるトラック幅の微細加工限界、

ヘッド漏れ磁界によるサイドイレーズ、クロストークなどの問題が顕在化してきており、従来の改良手法による面記録密度の向上に限界が見えつつある。

本稿では、物理的に溝を形成することで、サイドイレーズ、およびクロストークなどに対する改善が期待されているディスクリットトラック記録方式¹⁻⁹⁾に着目し、ディスクリット媒体と従来の連続媒体において、記録トラック幅のばらつきが与える影響について、マイクロマグネティックシミュレーションによる比較検討をおこなった。

2 計算モデル

三次元有限要素法で計算した記録ヘッド磁界分布を用い、LLG 方程式に基づいたマイクロマグネティックス法を用いたシミュレーションにより、媒体上に記録される磁化状態を求めた。

記録ヘッドには、トレーリングシールドタイプのヘッド¹⁰⁾を用い、記録トラック幅 70 ~ 110 nm, 駆動コイル電流 (起磁力: MMF) 0.1 および 0.2 AT をパラメータに、主磁極の飽和磁束密度を 2.3 T として、ヘッド磁界計算をおこなった。裏打ち層 (SUL) の膜厚を 60 nm, 飽和磁束密度を 1.5 T, 記録ヘッドから媒体記録層表面までの磁気スペーシングを 8.5 nm とした。Fig.1 に、記録磁化シミュレーションに取り込んだヘッド磁界分布を示しており、媒体の膜厚方向に、媒体表面から 8.75 nm (記録層膜厚の 1/2) 入った位置におけるトラックセンターのプロファイルを示す。縦軸は、Stoner-Wohlfarth モデルに基づいた有効磁界 (以下、すべて有効磁界) で表しており、記録

Fig. 1 Write head field distribution along the down-track direction, where the write track width is 80 nm and the magnetomotive forces (MMF) are 0.1 and 0.2 AT.

Fig. 2 Maximum write head field as a function of the write track width, where the MMF are 0.1 and 0.2 AT.

トラック幅 80 nm, 起磁力 0.2 AT のとき, トレーリングシールドエッジ近傍で, 17.3 kOe の最大ヘッド磁界強度が得られている。Fig.2 には, 横軸に記録トラック幅 (図中では Write track width, 以下同様) をとり, 縦軸に最大ヘッド磁界強度をプロットした図を示している。Fig.2 の最大ヘッド磁界強度の記録トラック幅依存性より, 起磁力が 0.2 $\Rightarrow$ 0.1 AT に半減した場合に, 磁界強度は一様に約 1.3 kOe 減少し, また記録トラック幅が 10 nm 変動すると, 磁界強度が約 0.8 kOe 変化する。

一方, 記録磁化シミュレーションにおける記録媒体のパラメータとしては, 平均粒径サイズ 7.3 nm, 記録層の膜厚 17.5 nm, 異方性磁界 (H_k) 13.5 kOe, 飽和磁化 (M_s) 500 emu/cm³, 粒子間の交換結合定数 (A^*) 0.5×10^{-7} erg/cm としたボロノイ形状粒子による単層膜媒体を用いて検討をおこなった。なお, 各パラメータについては, 次のようにばらつきを与えた。平均粒径サイズについては, 平均 (ノミナル) 値に対して 15 % の標準偏差をもつ対数正規分布, 異方性磁界 (H_k) および 飽和磁化 (M_s) については, ノミナル値に対して, それぞれ独立に 8 %, 10 % の標準偏差をもつ正規分布とした。 H_k 容易軸方向の分散角度については 1.3° とした。また, ディスクリット媒体のモデル化に際しては, 本稿では, 線記録密度 1550 kFCI とした 400 Gbps の面記録密度をターゲットに, 従来の連続媒体との比較検討をおこなうため, トラック密度 258 kTPI (トラッ

クピッチ: 98 nm) に対して, ランド幅を約 60 nm (トラックピッチの約 60 %), 溝幅を約 40 nm とした。

再生 (SNR) 計算では, 再生ヘッドの物理的な幅を 60 nm とし, 3 次元的に与えたヘッド感度プロファイルを用いて, 記録磁化シミュレーションにより求めた媒体磁化状態との畳み込みにより媒体 SNR を見積もった。本稿における媒体 SNR は, 信号およびノイズの両者を rms 値で求め, その比から求めている。

3 再生ヘッドのオフトラック特性

Fig.3 に, 従来の連続媒体とディスクリット媒体に対して, 記録トラック幅 80 nm の記録ヘッドを用い, 単一周波数の信号で記録をおこなったシミュレーションによる磁化状態を示す。Fig.3 では, 記録トラック周囲の磁化から静磁界の影響を平均化するため, AC イレーズした状態において, はじめに, センタートラックに高密度 (775 kFCI) で記録をおこない, さらにその左右両側に, センタートラックから 1 トラックピッチ (98 nm) 離して低密度 (194 kFCI) で記録をおこなっている。HDD 装置評価では, 信号をランダムに記録したパターンにおける媒体 SNR でテストをおこなっているが, 装置の運用上, 仕様にある最高線記録密度の単一周波数の信号が繰り返し並ぶようなことはほとんどないこと, またシミュレーション上, ランダムに記録した信号の媒体 SNR が精度良く見積もれないという理由から, 本稿では, センタートラックにできる限り高密度, かつ信号出力の確保できる 775 kFCI における媒体 SNR で議論をおこなっている。

Fig.4 には, Fig.3 の 3 本のトラックを記録した磁化状態から算出した媒体 SNR のオフトラック特性の結果を, 従来の連続媒体 (破線) とディスクリット媒体 (実線) との比較で示している。Fig.4 の媒体 SNR オフトラック特性の結果より, 連続媒体のトラックセンターにおける媒体 SNR は, ディスクリット媒体に比べて約 1.5 dB 高いことがわかる。しかしながら, 再生ヘッドをオフトラックさせた場合, 連続媒体における媒体 SNR は急激に低下しており, 例えば, 所定のビットエラーレートが確保できる媒体 SNR を 12 dB とした場合に, ディスクリット媒体は, 連続媒体に比べて, オフトラックマージンが 39 nm から 65 nm に拡がることが読み取れる。したがって, 所定のビットエラーレートに相当する媒体 SNR が確保できるならば, ディスクリット媒体のほうが, 連続媒体に比べて, オフトラックマージンの点で優れている。

4 記録ヘッドのオフトラック特性

Fig.5 左図に, 従来の連続媒体において, 記録ヘッドのトラック幅を横軸にとり, センタートラックのみに高密度 (775 kFCI) で記録したときのトラックセンターにおける媒体 SNR (1 Track write) と, さらにセンタートラックから左右両側に 1 トラックピッチ (98 nm) 離して, 低密度 (194 kFCI) で記録したときのトラックセンターの媒体 SNR (3 Track write) とをプロットした図を示す。但し, トラックセンターにおける媒体

Fig. 3 Calculated magnetization pattern of (left) conventional medium and (right) discrete track medium using trailing shielded write head, where the write track width is 80 nm and the MMF is 0.2 AT.

Fig. 4 SNR as a function of the off-track position of read head on conventional and the discrete track media.

SNR は、物理的な幅 60 nm の再生ヘッドが、トラックセンターにオントラックしたときの SNR 値を意味する。ディスクリット媒体の場合について、同様な計算をおこなった結果についても、Fig.5 の右図に示している。Fig.5 左図の連続媒体の場合、センタートラックに 1 本のトラックのみを記録したときの媒体 SNR は、記録トラック幅に比例して媒体 SNR は増大する。しかしながら、3 本のトラックを記録した場合に、媒体 SNR は、記録トラック幅の増加にともない著しく低下し、記録トラック幅が 90 nm で、すでに媒体 SNR の劣化が見えはじめている。

一方、ディスクリット媒体の場合（Fig.5 右図参照）、記録トラック幅が 110 nm の場合を除いては、1 本のトラックのみ記録した場合と、3 本のトラックを記録した場合で比較しても、トラックセンターにおける媒体 SNR はほとんど変化していない。また、記録トラック幅の増加に対しても、記録トラック幅 100 nm まで媒体 SNR はほとんど劣化せず、ディスクリット媒体のほうが、記録トラック幅のばらつきに対して、安定した記録性能が確保できる可能性を示している。すなわち、従来の連続媒体は、記録トラック幅が増加するにつれて、隣接トラック記録時のサイドイレースやクロストークの影響を受けて、媒体 SNR が劣化しやすいが、ディスクリット媒体では、物理的に溝を形成することによって、隣接トラックから受ける影響が抑制され、記録トラック幅変動に対するマージンが拡大することを示している。

Fig. 5 SNR as a function of the write track width on (left) conventional and (right) discrete track media.

Fig. 6 SNR as a function of the off-track position of write head on conventional and discrete track media.

次に、Fig.6 には、連続媒体とディスクリット媒体において、トラックピッチを 98 nm に固定したまま、記録トラック幅 80 nm の記録ヘッドを、ある一方向から隣接トラックのオフセット量を変えて、記録をおこなった場合の媒体 SNR のふるまいを示している。Fig.6 は、前述の Fig.3 と同様、AC イレース状態を初期状態とし、センタートラックに、はじめ高密度（775 kFCI）の単一周波数の信号で記録をおこない、そのトラックのセンター位置を基準（ゼロ）とし、片方の側から、低密度（194 kFCI）で記録をおこなっては、トラックセンターにおける媒体 SNR を見積もることを繰り返しておこなった結果を示している。連続媒体の場合、記録ヘッドをトラックセンターから約 100 nm まで近づけると、媒体 SNR が劣化し始めるのに対し、ディスクリット媒体では、約 90 nm まで近づけても劣化は見られていない。すなわち、ディスクリット媒体は、物理的に溝を形成しているために、隣接トラックからの影響を受け難くっており、片側からの寄せ書きに対して、約 10 nm オフトラックマージンが拡大することを示している。実際のドライブ評価と同様、左右両側から寄せ書きしてくる場合を考慮すると、ディスクリット媒体のほうが、約 20 nm オフトラックマージンで有利となってくる。

最後に、ディスクリット媒体に対し、記録ヘッドのトラック

Fig. 7 SNR of discrete track media as a function of the off-track position of write head for various write track widths.

幅をパラメータにして、Fig.6 と同様に、寄せ書きした結果を Fig.7 に示す。ディスクリート媒体において、片側から寄せ書きしてくる記録ヘッドが十分に離れた位置では、媒体 SNR は記録ヘッドのトラック幅に依らず、約 15 dB 以上の安定した性能が確保できている。連続媒体の場合、トラック幅 80 nm を有する記録ヘッドを用いると、トラックセンター（基準）位置から約 100 nm まで近づけると、媒体 SNR が劣化する（Fig.6 参照）のに対し、ディスクリート媒体の場合、トラック幅 90 nm を有する記録ヘッドで、トラックセンター（基準）位置から約 100 nm 付近まで近づけてきても、媒体 SNR の劣化は全く見られていない。したがって、ディスクリート媒体では、従来の連続媒体に比べて、約 10 nm 程度増大した記録トラック幅でも許容できることを示唆している。

以上より、ディスクリート媒体と組み合わせることにより、記録および再生のオフトラックマージンは拡大し、ヘッドの製造工程における記録トラック幅のばらつきを、 80 ± 10 nm で許した場合でも、媒体 SNR 値の変動や劣化は見られず、想定している 400 Gbps (258 kTPI $\times$ 1550 kFCI) 仕様を、余裕をもって満たすことができる。

5 まとめ

ディスクリート媒体と従来の連続媒体において、記録トラック幅のばらつきが与える影響について、マイクロマグネティックシミュレーションによる比較検討をおこなった。シミュレーションの結果、従来の連続媒体では、想定しているトラックピッチ 98 nm (トラック密度: 258 kTPI) において、記録トラック幅のばらつきに対するマージンが数 nm 程度しかないのに対して、ディスクリート媒体では、左右両側からの寄せ書きに対し、約 20 nm オフトラックマージンが拡大する。ヘッド製造工程における記録トラック幅に 80 ± 10 nm のばらつきが生じた場合でも、媒体 SNR の変動や劣化は見られない。すなわち、物理的に溝を形成したディスクリート媒体を用いることにより、従来の連続媒体に比べて、記録トラック幅ばらつきに対する媒体 SNR 特性の変動や劣化が抑えられ、記録および再生のオフトラックマージンは拡大する。ディスクリート媒体の適用により、歩留まり良く HDD 装置が製造できるようになる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、株式会社富士通研究所 ストレージ研究所、富士通株式会社 ストレージプロダクト事業本部の各関係部門の皆様には、多大なご協力及び適切なご助言をいただいたことに深く感謝いたします。

References

- 1) S. E. Lambert, I. L. Sanders, A. M. Patlach, and M. T. Krounbi: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 3690 (1987).
- 2) D. Wachenschwanz, W. Jiang, E. Roddick, A. Homola, P. Dorsey, B. Harper, D. Treves, and C. Bajorek: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 670 (2005).
- 3) S. Haratani, A. Kaizu, and I. Sato: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 3220 (2003).
- 4) Y. Soeno, M. Moriya, A. Kaizu, and M. Takai: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3220 (2005).
- 5) A. Kaizu, Y. Soeno, M. Takai, K. Tagami, and I. Sato: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 3220 (2006).
- 6) S. J. Greaves, H. Muraoka, and Y. Kanai: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2408 (2006).
- 7) S. J. Greaves, H. Muraoka, and Y. Kanai: *J. Appl. Phys.*, **99**, 08F903 (2006).
- 8) X. Che, Y. Tang, H. Lee, S. Zhang, K. Moon, N. Kim, S. Hong, N. Takahashi, M. Moneck, and J. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2292 (2007).
- 9) Y. Tang, X. Che, H. Lee, and J. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 4780 (2008).
- 10) M. L. Mallery: *US Patent A.P.*, US 4 656 546 (1987).

2009 年 10 月 21 日受理, 2010 年 2 月 24 日採録