

超高密度ハードディスク用磁気記録メディアの開発

- ナノテクノロジーを適用したディスクリートラックメディア -

TDK株式会社 SQ研究所
次世代磁気記録デバイス開発グループ

要旨

近年、ブロードバンド通信の普及、デジタル放送の開始などを背景に、取り扱う情報データ量が級数的に増加している。その大量データを保存活用するために、高速性やコストに優れたハードディスクドライブがストレージ機器の主力として使用されている。携帯電話やビデオカメラなどのポータブル機器にもハードディスクドライブが搭載され始めて、より一層の小型大容量という要求を実現するため、記録密度をさらに高める新技術が求められている。

ハードディスクドライブの記録密度を高めるためには、従来磁気記録メディア(以下メディアという)の高性能化と磁気ヘッド幅の狭小化という手法が用いられてきたが、データトラックが狭まるにつれ隣接トラック間の磁気的影響や熱揺らぎ現象¹⁾⁻³⁾が無視できなくなっている。今回、データトラックを磁気的に分離して形成するディスクリートラックメディア⁴⁾⁻⁶⁾という、新しいアイデアのメディアを検討し、良好な結果が得られたので報告する。

ディスクリートラックメディアとは、電子線リソグラフィやナノインプリントリソグラフィ⁷⁾などの最新ナノテクノロジーを用いて、記録に不要な部分の磁性材料を除去(溝加工)して信号品質を改善しようとするものである。さらに、溝加工した後に、その溝を非磁性材料で充填して、ハードディスクドライブに要求されるオングストロームレベルの表面平坦性を実現した。またサーボパターンを形成したディスクリートラックメディアを試作し、スピンスタードにより記録再生特性を評価して、従来型メディアに比較して良好なエラーレート特性を得た。これらの結果から、本技術はメディアの記録密度を飛躍的に高め、超小型、大容量のハードディスクドライブ実用化に道を開いた。

将来、本技術を応用することで、例えば500円硬貨サイズで100ギガバイト保存可能な小型大容量のハードディスクが可能になり、超小型高精細HDビデオカメラをはじめ、ユビキタス社会に対応する超小型の高機能携帯端末が実現できると確信する。ディスクリートラックメディア作製技術は、より高度なパターンドメディア⁸⁾⁹⁾と呼ばれる次々世代メディアにも有効であり、今後のハードディスクドライブの記録密度増大に対して必須なブレークスルー技術である。

1. はじめに

HDDは、1956年に初めて登場して以来、大容量化と小型化の歴史を歩んできた。面記録密度(1平方インチの面積に記録できるビット数)は、この半世紀の間に実に7,000万倍に達している。図1に近年の面記録密度の推移を示した。1990年代半ば以降、記録密度は年率100%の伸びを示しているが、これは、書き込み、読み出しヘッドの高性能化とメディアの高性能化が両輪となって実現してきた。ヘッド技術については、近年、GMR(Giant Magneto-Resistive)ヘッドやTMR(Tunneling Magneto-Resistive)ヘッドに代表される磁気抵抗効果を利用した高感度ヘッドが搭載されるようになり、高密度化に大きく寄与してきた。一方、メディアにおいては、面記録密度を高めるために磁性層厚みを薄くすると共に粒径の微細化が進んだ。このため熱揺らぎの影響によって記録磁化が消失するという課題が発生した。そこで新たに投入された技術が垂直磁気記録方式¹⁰⁾である。垂直磁気記録とは記録磁化をメディア厚み方向に配列させる記録方式であり、熱揺らぎの低減や今後の高密度化に対して有効な方式である。

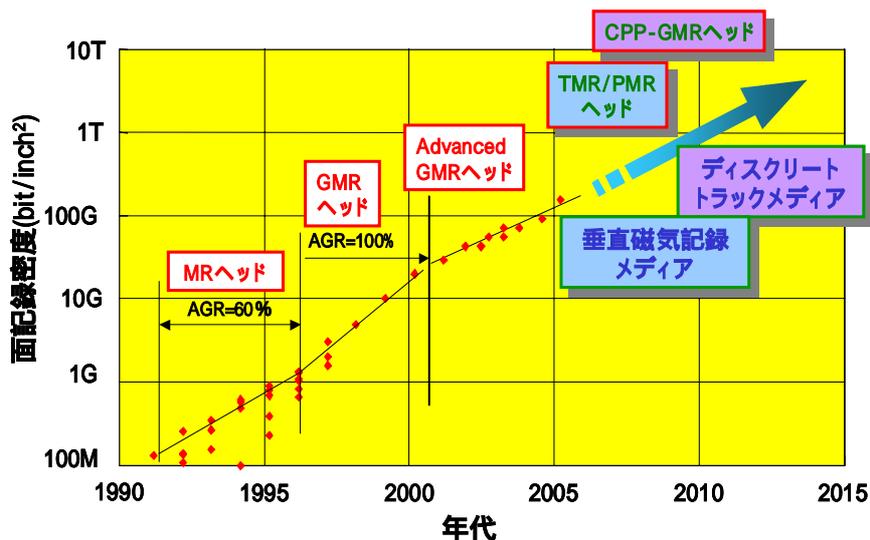


図1 ハードディスクドライブの面記録密度推移

しかしながら記録密度を高める際には、磁気ヘッド側面からの磁界広がり問題となる。磁界広がりにはヘッドを小さくしてもある値以下には小さくならず、結果として隣接トラックへの書き込み(サイドライト)が発生し既に記録したデータを消してしまう現象が発生する。また再生時には本来読み取るべきデータトラックの信号に加えて、隣接トラックからの余分な信号(この場合はノイズとなる)を読みこんでしまうクロストーク現象が発生する。これらサイドライトやクロストークなどの課題は現状の記録再生方式では解決しきれない問題である。

2. 課題解決のアイデア

2.1 ディスクリートトラックメディアとは

これらサイドライトやクロストークなどの影響を低減して、さらなる高密度化を達成するブレークスルー技術としてディスクリートトラックメディアが提案されている。図2にディスクリートトラックメディアのイメージ図を示す。ディスクリートとは“分離された”という意味であり、それぞれのデータトラックが形成された溝によって物理的、磁氣的に分離されているメディアである。ディスクリートトラックメディアは記録に必要なトラック部分のみを残して、トラック間には非磁性材料が充填されている。一旦形成した溝を埋め戻してメディア表面をオンストロームレベルの鏡面に仕上げるためには、半導体プロセスを凌駕する微細加工技術が求められる。

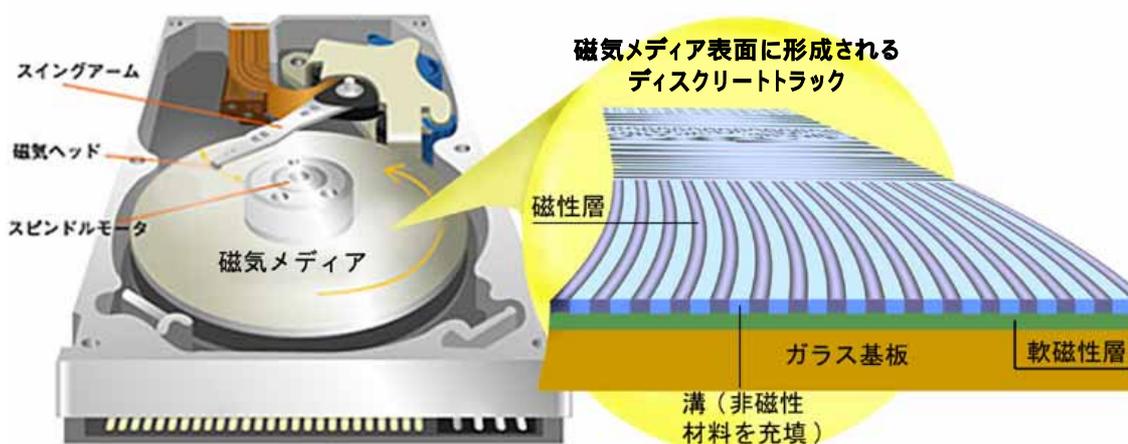


図2. ディスクリートトラックメディアのイメージ図

2.2 ディスクリートトラックメディアの優位性

ディスクリートトラックメディアはトラック間を溝により分離することで、隣に形成されたデータトラックへのサイドライト、クロストークを抑制して、格段に信号品質を改善することができる。図3、4に従来型メディア(磁性層が連続膜)の記録磁化状態とディスクリートトラックメディアの記録磁化状態の違い(シミュレーション結果)を示す。図3の従来型メディアでは隣接するデータトラックとの境界にノイズ成分が存在して信号記録状態が不明瞭であるが、ディスクリートトラックメディアの場合は境界にあたる部分の磁性層が除去されているために原理的にノイズとなり得ない。このため非常に明瞭な記録磁化状態となっている。

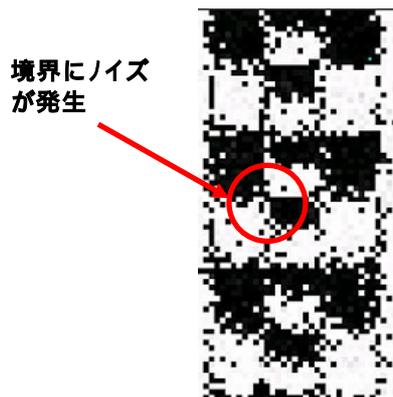


図3. 従来型メディアの記録磁化状態

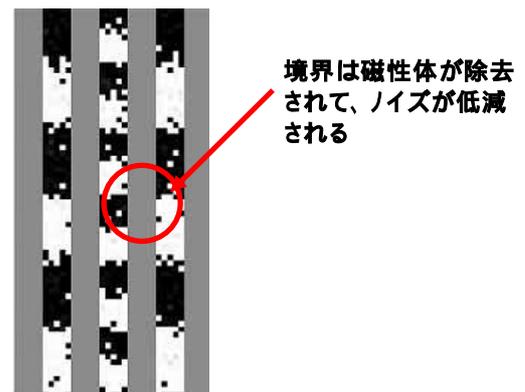


図4. ディスクリートトラックメディアの記録磁化状態

またディスクリートトラックメディアと従来型メディアの信号品質をシミュレーションにより比較したグラフが図5である。グラフの横軸はトラックピッチ(狭いほど高密度)、縦軸は信号品質をあらわすSN比(信号出力とノイズの比で大きいほど良い)である。将来トラックピッチが60ナノメートル(現状の約1/3)程度にまで縮まった場合、従来型メディアと比較しておよそ6dB(約2倍)のSN比が得られる。ディスクリートトラックメディアは記録密度が高まるほど、従来型メディアとのSN比の差が大きくなり、信号品質の優位性が高まることを示している。

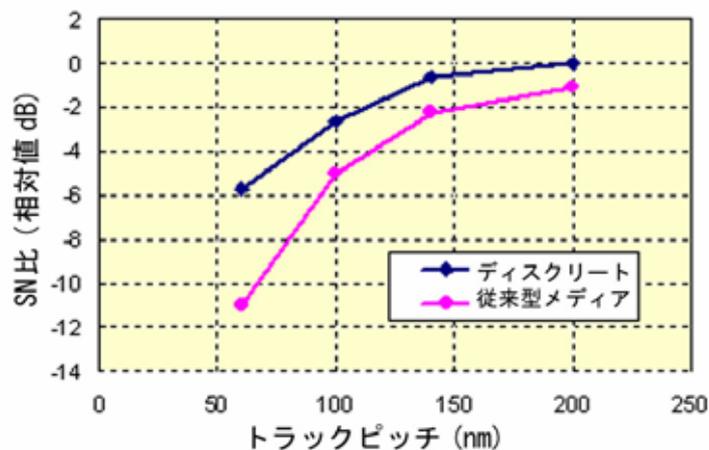


図5. ディスクリートトラックメディアの将来優位性

3. ディスクリートトラックメディアの作製

3.1 ナノレベル微細加工

ディスクリートトラック加工に必要な超微細加工、平坦化技術について紹介する。求められる加工精度はナノオーダーの位置精度、直線性であり、電子線リソグラフィ、ナノインプリントリソグラフィ、ドライエッチングなど半導体技術を超える最新技術を用いて初めて実現が可能になる。

図6にディスクリートトラックメディアの作製フローを示す。まず電子線リソグラフィー法を用いて原盤となるスタンプを作製する。このスタンプには前述したサーボ情報、データトラックなどのパターンが形成されている。出来上がったスタンプを用いて、ナノインプリントリソグラフィ法によりメディア上のレジスト樹脂にパターンを転写する(a)。転写された樹脂パターンをマスク材として、ドライエッチング手法でメディア表面に溝を加工形成する(b)。磁気ヘッドの浮上安定性を確保するために、一旦形成した溝に再び非磁性材料を埋め込み平坦化した後(c)、保護膜、潤滑膜を形成する(d)。

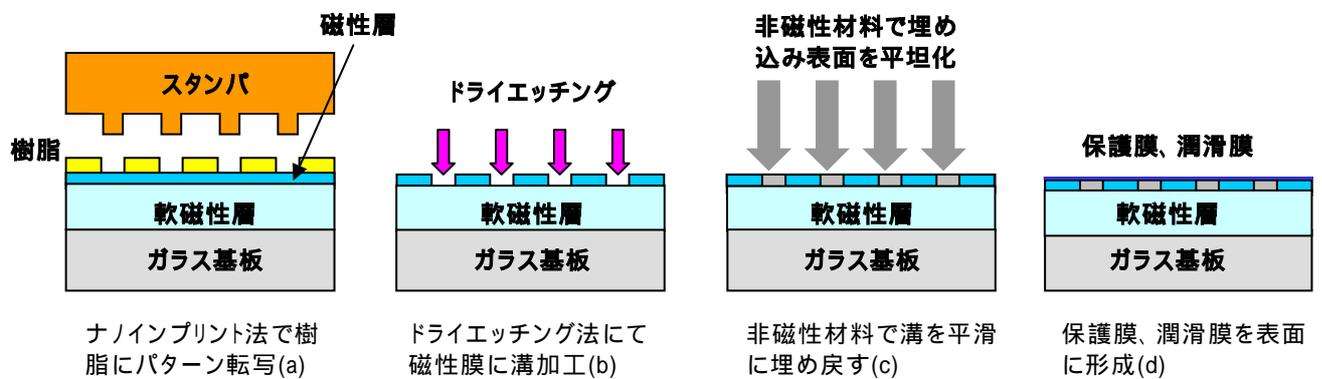


図6. ディスクリートトラックメディアの作製フロー

3.2 トラックフォロイング用サーボパターンの形成

ディスクリートトラックメディアの利点として、電子線リソグラフィの高性能描画技術を用いることで、非常に高精度なサーボパターン(図7)が形成可能である。形成したサーボパターン情報に基づき、磁気ヘッドを所定の位置にナノメートルオーダーで正確に移動させることができる。

またもう一つの利点としては、ディスクリートトラックメディアはデータトラック加工と同時にサーボパターンが形成されるプリフォーマットメディアである点が上げられる。このため現状のハードディスクドライブ製造時に必要とされる長時間のサーボ情報書き込み作業を必要としない。高精度なサーボパターン形成と低コスト化を可能にする、優れたサーボパターン形成手法である。

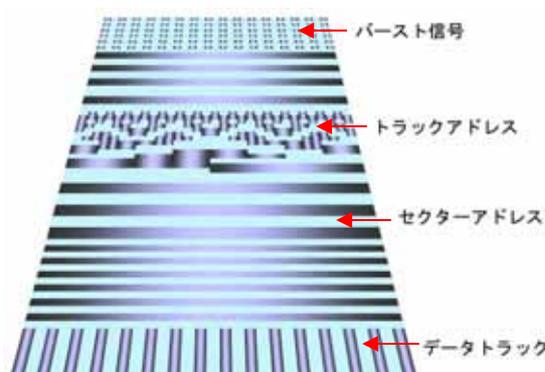


図7. 形成したサーボパターンのイメージ図

4. ディスクリートトラックメディアの性能評価

4.1 メディア表面平坦性

ハードディスクドライブにおいては、微弱な信号を再生するために磁気ヘッド浮上量は年々低くなってきている。最新のハードディスクドライブにおける磁気ヘッド浮上量は約10ナノメートル程度にまで低下し、これはジャンボジェット機が地上から1ミリメートル以下を飛行しているレベルに例えられる。ディスクリートトラックメディアの性能を最大限に発揮するためには、メディア上を磁気ヘッドが安定浮上できる信頼性確保が重要である。そのためにはメディア表面を可能な限り鏡面に近づけることが必要である。

図8にディスクリートトラック加工により溝を形成したメディア表面および断面の走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope) 写真を示す。ドライエッチング法により形成されたデータトラックの直線性、および断面形状は非常に良好である。この時点でメディア表面には、データ記録に必要なデータトラックと位置情報としてのサーボパターンにのみ磁性層が存在する。

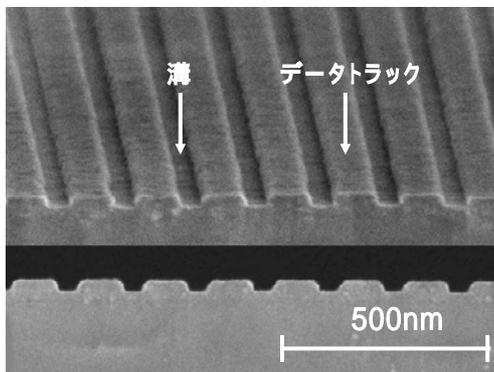


図8. 溝加工されたメディア表面

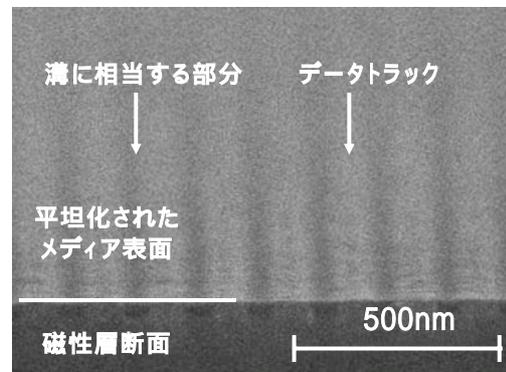


図9. 平坦化されたメディア表面

図9に形成した溝を埋め戻し、平坦化したメディア表面SEM写真を示す。スパッタリング法による埋め戻しプロセスと、ドライエッチング法による平坦化プロセスを最適な条件で組み合わせることで、メディア表面は溝加工する前と同等(表面粗さとしてオンゲストロームレベル)にまで平滑化される。従来の化学機械研磨法(CMP: Chemical Mechanical Polish)を用いた場合、研磨プロセスで発生するメディア表面のコンタミネーションや磁性層のダメージが避けられない。それに対して今回開発した平坦化技術は真空装置を用いたドライエッチングプロセスである。このためウェットプロセスであるCMP法と比較して、コンタミネーション低減やメディア表面平坦化の制御性に優れた手法である。

4.2 磁気ヘッドの浮上安定性

平坦化されたディスクリートトラックメディアの実用性を評価するために、試作したメディア上での磁気ヘッド浮上安定性を測定した(図10)。サンプルは2.5インチサイズ垂直磁気メディアを加工平坦化したメディアと、平坦化をしないで凹凸の残るメディアを作製した。測定にはサーボ制御機能を有するスピンスターを用いた。回転数は毎分4,200回転とし、そのときの磁気ヘッド浮上量はおよそ10nmであった。浮上変動量はヘッド背面の微小変動量をレーザードップラー変位計にて測定した。



図10. 磁気ヘッド浮上安定性の測定

図11、12に平坦化の有無による浮上変動量の違いを測定した結果を示す。図11のように溝加工した凹凸が残った状態のメディアの場合、浮上量は大きく変動しており、磁気ヘッドとメディアが接触して損傷する場合がある。一方、平坦化されたメディアの場合は、図12のようにその浮上量は非常に安定している。このことから本技術を用いて平坦化されたディスクリートラックメディアの実用性が確認できた。

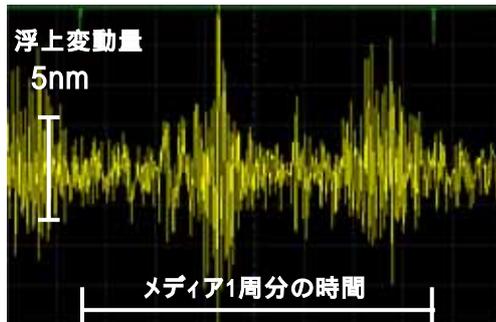


図11. 凹凸のあるメディアでの浮上量



図12. 埋め戻されたメディアでの浮上量

4.3 トラックフォロイング動作

ディスクリートラックメディアの作製においてそのサーボパターン位置精度と形状精度が非常に重要である。前述のサーボ制御機能付スピンドルを用いて試作したディスクリートラックメディアのトラックフォロイング動作を確認した。

図13において横軸は時間(ミリ秒)、縦軸は再生出力である。サーボ信号出力とデータトラック信号出力が交互に現れており、プリフォーマットされたサーボ情報により正確に磁気ヘッドがトラックフォロイングできていることが確認できる。このトラックフォロイング精度は電子線リソグラフィ、ナノインプリントリソグラフィを用いて形成されたサーボパターンの位置精度と形状精度が、数ナノメートルのオーダーで正確に形成できているからこそ達成できる精度である。今後さらに高密度化が進み、より高精度なパターン精度が求められる場合に対しても、技術的に対応可能であると考えられる。

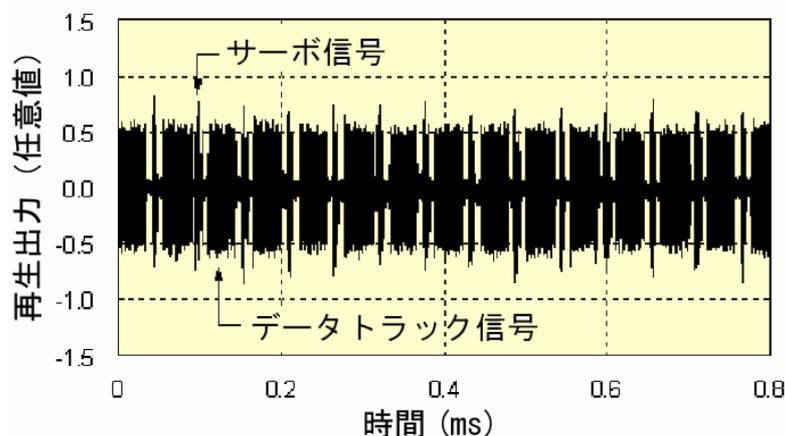


図13. トラックフォロイング動作中の再生信号出力

4.4 記録再生特性

ディスクリートトラックメディアの信号品質優位性を示す実測結果として、試作したディスクリートトラックメディアと従来型メディアのエラーレート比較結果を示す(図14)。測定の手順として、初めに中心トラック(オフセット位置ゼロ)に信号を記録し、次にその両サイドに180ナノメートルだけヘッドをオフセットさせて信号を記録し、サイドライト影響下でのエラーレート測定を行った。グラフ縦軸がエラーレート(対数)をあらわし、グラフは下に行くほどエラーの発生が少ない。

従来型メディアではサイドライトの影響を受けて、中心トラックのエラーレートが2桁以上悪化した。一方ディスクリートトラックメディアにおいてはその影響が低減されエラーレートの悪化は見られなかった。このことからディスクリートトラックメディアが隣接トラック記録の影響を受けにくいメディアであることが実測結果から明らかになった。今後メディアの記録密度が高くなるほど、サイドライトによる信号品質への影響は顕著になるため、ディスクリートトラックメディアの優位性は大きくなる。

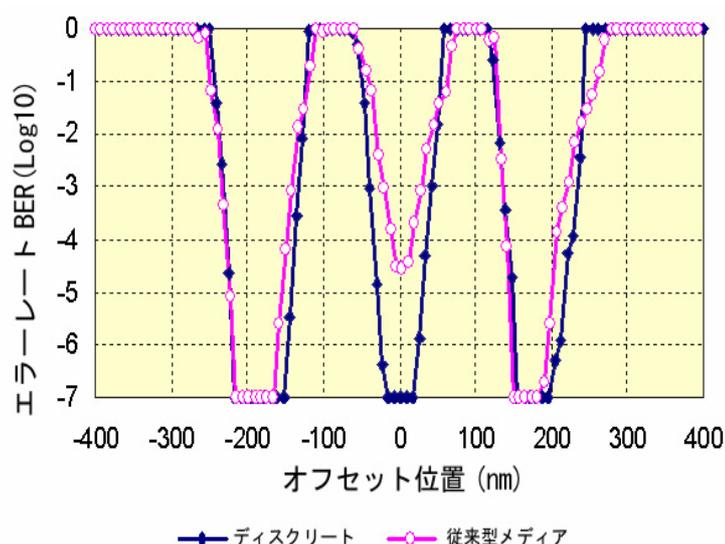


図14. ディスクリートトラックメディアのエラーレート優位性

5. まとめと将来展望

ハードディスクドライブの高密度化に対するブレイクスルー技術として、ディスクリートトラックメディアの検討をおこなった。結果として、1)ナノテクノロジーを駆使した微細加工技術、オングストロームレベルで制御可能な平坦化技術を実現して、磁気ヘッドの浮上安定性が確保できた。2)精度良く形成したプリフォーマットサーボパターンによるトラックフォロイング動作を検証した。3)記録再生特性における優位性として、サイドライトの影響を低減することによりエラーレートが改善された。これらの結果から、ディスクリートトラックメディアの優位性、実用性が検証できた。

既に産学の研究機関では一桁上の1テラビット/平方インチ(1テラビットは1,000ギガビット)の議論が活発になってきている。その実現にはディスクリート化技術をさらに発展させたパターンドメディア(信号をドットパターンとして記録するメディア)^{9),10)}等も検討されている。しかしハードディスクドライブの高密度化はメディア単体の開発だけでは達成することは困難である。ディスクリートトラックメディアなど高密度化に適したメディアの開発と共に、メディアに最適設計された磁気ヘッドや総合的なハードディスクドライブ技術の開発も必要とされる。

ディスクリートトラックメディア開発で培った微細加工や平坦化等の技術は将来の高密度メディ

アに対しても有効であり応用可能である。今後、1テラビット/平方インチを超える高記録密度を達成するためにナノプロセステクノロジーをさらに発展させて未踏領域の研究開発に取り組む所存である。

6. 参考文献

- 1) Pu-Ling Lu, Stanley H. Charap: *IEEE Trans. Magn.*, 30, No.6 (1994).
- 2) M.Takahashi: *OYO BUTURI*, 68, No.2, 185 (1999)(in Japanese).
- 3) H.Nishio, K.Hattori, S.Okawa, M.Fujita, T.Aoyama, I.Sato: *J.Magn.Soc.Jpn.*, 119(2001)(in Japanese).
- 4) S.E.Lambert, I.L.Sanders, A.M.Patlach, M.T.Krounbi and S.R.Hetzler: *J.Appl.Phys.*, 69, 4274 (1991).
- 5) Y.Soeno, M.Moriya, K.Ito, K.Hattori, A.Kaizu, T.Aoyama, M.Matsuzaki and H.Sakai: *IEEE Trans. Magn.*, 39, No.4 (2003).
- 6) K.Hattori, K.Ito, Y.Soeno, M.Takai, and M.Matsuzaki, *IEEE Trans. Magn.*, vol.40, no.4, pp.2510-2515, July 2004.
- 7) Stephen Y.Chou: *Proceedings of The IEEE*, 85, No.4 (1997).
- 8) Robert L.White: *IEEE Trans. Magn.*, 33, No.1 (1997).
- 9) T.Aoyama, I.Sato, S.Ishio: *OYO BUTURI*, 72, No.3, 298 (2003)(in Japanese).
- 10) N.Honda, K.Oouchi: *J.Magn.Soc.Jpn.*, 24, No.5 (2000)(in Japanese).