5章 将来の大容量化技術

5-2 薄膜テープ

立花 淳一†

キーワード：データストレージ、磁気テープ、スパッタリング、面記録密度、垂直磁気記録

1. まえがき

クラウドコンピューティング、ビッグデータなどの要請により、世の中で扱われるデータは増加の一途を辿っている。近年、磁気テープにおいては、コスト、消費電力、スペース、ディザスタ・リカバリ等の点で、他の記録メディアに対する優位性が見直されており、爆発的に保存データが増大する将来において、大量のデータを、安定に、長期間、安価に保存できるメディアとして、磁気テープはますます注目を集めつつある。

薄膜テープは、真空プロセス等により磁性層が形成され、基板上に配向性に優れた薄層磁性膜が均一に設けられることで高い記録再生特性が期待できる。薄膜テープとして、磁性層を蒸着法にて形成した蒸着テープが商品化されており、家庭用ビデオカメラフォーマットのDVCや、業務用ビデオフォーマットであるDVCAM、8mmカートリッジのデータストレージテープフォーマットAITなどが世に出ている。

近年、磁気テープの活躍の場は、主にデータストレージ分野に移行しており、将来的には特にアーカイブの分野で大容量メディアとしての期待が高まりつつある。現在、この分野では、塗布型テープが主流であるが、垂直磁気異性を有する板状BaFe磁性粉を用いて、垂直配向を施した磁気テープの研究が進められており、塗布型テープとして最高の記録密度である123 Gb/in²の達成が報告されている¹⁾。しかしながら、塗布型テープの面記録密度の向上は、主に磁性粉の微細化技術により促進されており、熱擾乱による磁化減衰の問題から、磁性粒子の更なる微細化は困難な領域に入りつつある。このような状況が、熱擾乱に強く、かつ、磁性粒子サイズの微細化が可能である、CoPtCr酸化物グラニューラ薄膜を磁性層として形成した薄膜テープが将来の大容量磁気テープとして大いに期待される所以である。これまでに、2011年、単層の軟磁性裏打ち層(SUL: Soft

Magnetic Underlayer)を有し、CoPtCr酸化物を磁性層とした磁気テープにより、45 Gb/in²実証が報告されており²⁾、2014年には、反平行強磁界結合SUL層(APC-SUL膜: Antiparallel Coupled SUL)を有するCoPtCr酸化物を磁性層とした磁気テープにより、148 Gb/in²の面記録密度が実証されている³⁾。

本稿では、薄膜テープの特徴である磁性薄膜の構造および特性を中心に、薄膜テープとしての高密度化技術について解説する。

2. 薄膜テープの高密度化技術

ここでは、垂直磁気記録用薄膜テープを例として、その特徴である、①多層膜構造、②均一に独立した磁性粒子構造、③ポリマ基板上的成膜技術、を中心に、高密度記録化の鍵となる技術について解説する。

2.1 薄膜テープの構造

記録密度が高くなるに従い、小さなサイズの磁性体が求められるようになる。これは、記録密度が高くなるほど、1ビットの情報を記録する磁気テープ上の面積が小さくなり、記録分解能を高めるために、より小さなサイズの磁性体が必要となるためと理解される。情報記録を研究開発する大学や企業のメンバで構成される米国のコンソーシアムINSIC (Information Storage Industry Consortium)は、2022年度の磁気テープの面記録密度を53 Gb/in²と予想しているが⁴⁾、この場合、1ビットの記録に要する面積は約12000 nm²程度であり、幅が約480 nm、長さが約25 nmの長方形に相当する。

スパッタ法に代表される薄膜形成法を用いる薄膜テープでは、金属、酸化物、窒化物、およびそれらの複合材料等、材料の選択幅が広く、さらに、さまざまな機能を有する薄膜を多層構造とすることにより、数nm程度の微細なサイズの磁性体を均一に形成することができる。図1に垂直磁気記録用薄膜テープの構成の模式図を示す。ポリマの基材上に、記録ヘッドによる記録を補助する役割として配されるSUL層、結晶配向促進を目的とする下地層、磁性体サイズの均一性の確保を目的とする中間層、および記録を直接担う磁性層とそれぞれ機能が異なる多層膜で形成されてい

† ソニーストレージメディア・アンド・デバイス株式会社 オプティカル&テープメディア事業部門
"Thin Film Magnetic Tape" by Junichi Tachibana (Sony Storage Media and Devices Corporation, Miyagi)

図1 薄膜テープの構造模式図

る．さらに，その上に保護膜層および潤滑剤層が設けられた構造となっている．

次に，148 Gb/in²の記録密度実証テープにおける多層膜の構造について解説する³⁾．図2は，基板上に形成された多層膜の断面透過型電子顕微鏡 (TEM) 像である．基板上にTiCr層が形成され，その上に，SUL層として1 nm程度の極薄いRu層を介してCoZrNb層を積層させた膜が設けられている．この構造は，APC-SUL構造と言われ，上下層の軟磁性層が反強磁性結合することで磁壁をピン止めし，磁壁移動に伴うノイズの発生を抑えるとともに，外部への漏えい磁界を抑制することを目的とする^{5) 6)}．この反強磁性結合の制御には，1 nm以下のオーダーでの膜厚制御が不可欠であり，薄膜プロセスにより実現可能な技術である．

さらに，その上に，下地層として，TiCr層/NiW層，中間層としてRuの2層膜⁷⁾，磁性層としてCoPtCr-SiO₂層が形成されている．下地層および中間層の目的は，六方稠密格子構造 (hcp) であるCoPtCr-SiO₂層のhcp-CoPtCr (002) 面を垂直方向に配向させることである．まず，体心立方格子構造 (fcc) であるNiW層のfcc-NiW (111) 面に，hcp構造であるRu層のhcp-Ru (002) 面をヘテロエピタキシャル成長させ，さらに，CoPtCr-SiO₂層のhcp-CoPtCr (002) 面を成長させている．また，中間層であるRu層では，結晶配向の促進とともに，CoPtCr-SiO₂層のカラム形状を制御する目的も同時に担っている．

2.2 磁性粒子の微細化と熱擾乱の影響

図3は，この薄膜テープのCoPtCr-SiO₂磁性層を表面より観察した平面TEM像である．図中の灰色あるいは黒く見える部分がCoPtCr磁性粒子であり，白く見える部分がSiO₂相である．直径約8 nmの磁性粒子が酸化物により分離された状態で均一に分布した構造であることがわかる．CoPtCr磁性粒子を酸化物等の非磁性材料が取り囲んだ構造はグラニュラ構造といわれ，この構造により，個々の磁性粒子が磁気的に分離されることにより高い保磁力が実現される^{8) 9)}．分離が不十分である場合，この磁性粒子が磁

図2 薄膜テープ多層膜の断面TEM像

図3 薄膜テープ磁性層の平面TEM像

氣的に複数個結合した磁気クラスタを形成し，実質的な磁性粒子サイズが大きくなりノイズが増大する．Ru中間層がこの磁性層におけるグラニュラ構造と結晶配向の両立の鍵であり，主に成膜時のガス圧等のスパッタ条件の最適化により実現される．その他，Ru-Cr膜等の第2元素添加の例も知られている¹⁰⁾．

磁性粒子サイズが小さくなると，熱の影響で記録磁化が反転してしまういわゆる熱擾乱の影響が顕著となる．熱擾乱の影響を受けずに記録を保持するためには，磁気異方性エネルギー K_u ，粒子体積 V_{act} の積をボルツマン定数 k_B と絶対温度 T の積で除した値 $K_u V_{act} / k_B T$ が60以上であることが必要である．主にCoPtCr系合金材料を使用する薄膜テープにおいては，磁気異方性エネルギーが高いことから，磁性粒子径が数 nm オーダとなった場合でも高い $K_u V_{act} / k_B T$ を実現できる．例えば，148 Gb/in²の記録密度

実証テープにおける磁気異方性エネルギーは 3.4×10^6 erg/cm³であり、 $K_u V_{act}/k_B T$ は62と算出され、磁性粒子径が8 nm程度の場合においても $K_u V_{act}/k_B T > 60$ を満足している³⁾。

2.3 ポリマ基板上的薄膜形成技術

これまで記述した技術は、いずれもハードディスクで確立された技術の薄膜テープへの応用であり、ガラス基板やアルミ基板などの算術平均粗さ (Ra) 1 nm 以下の平滑性や吸着ガスの脱離の容易さ等を基本に確立された技術である。しかしながら、薄膜テープでは、これらに比べて、表面性が粗く、水分等の吸着ガスの多いポリマフィルムを用いていることから、これらの課題に対する独自の薄膜形成技術が必要となる。

薄膜テープでは、ガラス基板やアルミ基板よりも表面の粗いポリエチレンテレフタレート (PET) 等のポリマ基板を用いており、その表面粗さが膜の結晶成長に影響を与えることが懸念される。特に、多層構造膜のうち比較的設計膜厚の厚いSUL層でその影響が大きく、SUL膜結晶の粗大化により、その上に成長する下地層/中間層/記録層の結晶配向が乱れることが問題となる¹¹⁾。SUL膜結晶の粗大化には基板の表面性が影響している¹²⁾。図4に表面性の異なる基板上に同一の条件にて成膜した場合のそれぞれの膜のX線回折プロファイルを示す。(a)は、Raが0.2 nmである基板上に、SUL層、下地層、中間層、および磁性層が成膜されている。(b)はRa 1.5 nm, (c)はRa 2.2 nmの基板上にそれぞれ同じ多層膜を成膜した。基板の表面が平滑であるほどRu膜のhcp-Ru (002) 配向強度が高くなることがわかる。また、hcp-Ru (002) ピークにおけるロッキングカーブより求められる結晶配向の分散を表す評価指標である $\Delta\theta_{50}$ は、それぞれ、(a) 3.5°, (b) 8.5°, (c) 11.2°であり、基板表面が粗くなるほど、Ru膜のc軸結晶配向が大きく低下することがわかる。基板の表面が粗くなるほどSUL層の表面が荒れ、その上に成長する下地層、中間層の結晶が粗大化し、c軸結晶配向が乱れると考えられる。

図4 表面性の異なる基板上のRu膜のX線回折プロファイル

これらは、ハードディスクに比べて表面の粗いポリマ基板を用いる薄膜テープにおいて顕著となる現象である。148 Gb/in²の記録密度実証テープでは、平滑な表面が得やすいアモルファスSUL膜材料を採用した上で¹³⁾、さらに、基板の表面性とSUL膜成膜時の投入電力、ガス圧等のスパッタ条件の最適化を行うことにより、ポリマ基板上においても良好な結晶配向を有する膜の形成に成功している。

2.4 記録再生特性と実用特性

高い線記録密度を実現するためには、記録再生用の磁気ヘッドと磁気テープの間隔 (スペーシング) を数十 nm オーダとする必要がある。磁気テープの表面平滑性を高めることで、スペーシングを小さくすることは可能であるが、磁気テープは磁気ヘッドと常時接触しているため、これに伴う摩擦の増大および耐久性の確保が同時に課題となる。ハードディスクにおいてもスペーシングは高記録密度化の重要な課題であるが、基本的に、磁気ヘッドはメディアに対して浮上しており、接触していないことから、低スペーシング状態における摩擦および耐久性については、磁気テープにおいて特に重要な課題といえる。

図5に、薄膜テープの原子間力顕微鏡 (AFM) による薄膜テープの表面プロファイルを示す。測定エリアは30 μm × 30 μmである。Raおよび十点平均粗さ (Rz) はそれぞれ1.4 nm, 21 nmである。この平滑な磁気テープにおいて磁気ヘッドとの摩擦の低減と耐久性を確保するために、磁性層上に数nm程度のDiamond Like Carbon (DLC)膜を設け、さらに潤滑剤を塗布している。これらの技術は、商品として実績のある蒸着テープの技術をベースとしており、薄膜テープの実用特性向上にも応用されている。

図6に、現在のリニアテープフォーマットで用いられている再生ヘッドのトラック幅よりも十分に狭いトラック幅

図5 薄膜テープのAFM像

図6 薄膜テープのSNRの記録密度依存性

図7 薄膜テープの耐久性

77 nmであるTMRヘッドを用いて測定したSNRの線記録密度依存性の結果を示す。保護膜厚は3 nmと6 nmであり、垂直方向の保磁力は3400 Oeである。高い記録密度を実現するためには、トラック幅の狭い磁気ヘッドを用いた場合においても高い記録密度領域で十分なSNRを確保できるメディアが必要となる。保護膜厚が3 nmの磁気テープでは、高い線記録密度896 kbpIにおいても、製品レベルで必要とされる訂正前のエラーレート 10^{-4} の確保が見込まれるSNR 17 dBが得られている⁴⁾。トラック密度を再生ヘッドトラック幅77 nmの2倍である154 nmと仮定すると、この線記録密度は、面記録密度148 Gb/in²に相当し、薄膜テープは高い記録密度を実現する可能性を有することがわかる。

図7に、市販の磁気テープ評価装置により測定した薄膜テープの耐久性の結果を示す。ここで用いたテープはSUL膜を設けていないいわゆる単層垂直膜テープであり、保護膜は5 nmである¹⁴⁾。比較として、市販の塗布型テープの結果も示した。薄膜テープでは25,000パスの走行においても出力の低下が見られず、原理確認レベルではあるが、市販の磁気テープと同等の耐久性を確認できている。

3. むすび

ここで解説したように、薄膜テープはハードディスクの

高密度化技術との親和性が高いことから、将来への高記録密度化への道が拓けている。現在の記録密度は148 Gb/in²であるが、現在の市販のハードディスクの面記録密度は1 Tb/in²に達している¹⁵⁾。このことから、更なる、磁性粒子の微細化技術、熱安定性に優れた材料等の技術を導入することにより、ハードディスクの高記録密度技術に、磁気テープの特徴である高体積容量の特徴を併せ持つ、1巻でペタバイト級の記録容量を有する磁気テープの登場も期待できると考える。

(2016年1月29日受付)

〔文 献〕

- 11) M.A. Lantz, et al: "123Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape", IEEE Trans. On Magn., 51, 11, Art ID 3101304 (Nov. 2015)
- 12) S. Matsunuma et al: "Playback performance of perpendicular magnetic recording tape media for over-50-TB cartridge by facing targets sputtering method", J. Magn. Magn. Mat., 324, pp.260-263 (Feb. 2012)
- 13) J. Tachibana et al: "Exploratory Experiments in Recording on Sputtered Magnetic Tape at an Areal Density of 148Gb/in²", IEEE Trans. Magn., 50, 11, Art ID 3202806 (Nov. 2014)
- 14) Information Storage Industry Consortium (INSIC) 2012-2022 International Magnetic Tape Storage Roadmap, <http://www.insic.org/news/2012Roadmap/12index.html> (accessed Jan. 11, 2016)
- 15) B. Acharya et al: "Anti-parallel coupled soft underlayers for high-density perpendicular recording", in Proc. 9th Joint MMM-Intermag Conf., GD-10 (2004)
- 16) S.C. Byeon and W.D. Doyle: "Synthetic antiferromagnetically coupled FeCo/Ru/FeCo soft underlayers for perpendicular recording", in Proc. 9th Joint MMM-Intermag Conf., GD-11 (2004)
- 17) R. Muraki, T. Uzumaki and A. Tanaka: "Microstructure Improvement of Thin Ru Underlayer for CoCrPt-SiO₂ Granular Perpendicular Media", IEEE Trans. Magn., 41, 10, pp.3169-3171 (Oct. 2005)
- 18) M. Zheng et al: "SNR improvement of granular perpendicular recording media", IEEE Trans. Magn., 39, pp.1919-1924 (July 2003)
- 19) H. Uwazumi et al: "CoCrPt-SiO₂ granular media for high-density perpendicular recording", IEEE Trans. Magn., 39, pp.1914-1918 (July 2003)
- 20) S.N. Piramanayagam et al: "Grain size reduction in CoCrPtSiO₂ perpendicular recording media with oxide-based intermediate layers", Appl. Phys. Lett., pp.162504-1-162504-3 (2006)
- 21) T. Hikosaka et al: "Low Noise FeAlSi Soft Magnetic Under-Layer for CoPtCrO Double-Layered Perpendicular Recording Media", IEEE Trans. Magn., 37, 4, pp.1586-1588 (July 2001)
- 22) 立花淳一ほか: "スバット磁気テープにおける面記録密度148Gb/in²の基礎的検証", 信学技報, MR-2015 (2015)
- 23) M. Futamoto et al: "CoCr-alloy perpendicular magnetic recording media for high-density recording", J. Magn. Magn. Mater., 235, pp.281-288 (2001)
- 24) N. Sekiguchi et al: "The Development of Perpendicular Magnetic Recording Tape by Roll-to-Roll In-Line Sputtering", IEEE Trans. Magn., 50, 11, Art ID 3202904 (Nov. 2014)
- 25) 中 洋之, 阿部隆男: "世界最大記録密度1Tb/in²を実現した2.5型HDD", 東芝レビュー, 70, 8, pp.25-28 (2015)

たちばな じゅんいち
立花 淳一 1992年、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年、ソニー(株)入社。現在、ソニーストレージメディア・アンド・デバイス(株)オプティカル&テープメディア事業部門シニアエンジニア。