Contact Reading/Writing of Continuous Media and Patterned Media with a Static-tester

R. Tatsuno, H. Saga*, K. Miura, H. Aoi, and H. Muraoka

Research Institute of Electrical Communication, Tohokuto Univ., Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

* Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 2880 Kohzu, Odawara, Kanagawa, 256-8510, Japan

We measured perpendicular magnetic recording media with a static tester to analyze the read-write characteristics (SN ratio, ATE, and recording margin) of future bit patterned media (BPM). We clarified that the measured current of a granular-type perpendicular magnetic recording medium's reproduction waveform at half pulse width, T_{50} , and the magnetization transfer parameters, were small. The read-write resolving power is thought to improve and reproduce a steep magnetization transition through contact recording. Furthermore, we measured the BPM samples and ascertained that the actual measured values conformed to those calculated qualitatively. In addition, we found the dot pitch from a reproduction wave did not depend on the dot size, and it was almost the designed value, and we confirmed that the standard deviation was around 6% of the dot pitch at dot lengths longer than 40 nm.

Key words: Perpendicular magnetic recording, magnetic spacing, contact recording, bit patterned medium

スタティックテスタによる連続媒体とパターン垂直媒体の コンタクト記録・再生

竜野良亮・嵯峨秀樹*・三浦健司・青井基・村岡裕明

東北大学電気通信研究所, 宮城県仙台市青葉区片平2丁目1-1 (〒980-8577)

*日立製作所中央研究所, 神奈川県小田原市国府津 2880 番地 (〒256-8510)

1. はじめに

磁気記録のさらなる高記録密度化のためパターン垂直媒体^{1)~3)} (BPM) の検討がなされている。しかしながら BPM に関する報告はシミュレーションが中心であり実際の記録再生特性に関する報告例は少ない。我々は BPM の試作と再生波形の取得を通して、現行の微粒子型連続媒体とは異なる BPM 固有の波形形状やノイズ特性の明確化を目標に検討を行っている。現在、小面積の試作段階の直線状 BPM サンプルを評価できる非回転型評価装置 (スタティックテスタ) を開発中である⁴⁾。スタティックテスタではヘッドと媒体が接触して記録再生を行なうためスペーシングロスが小さい測定が可能であり、分解能の高い記録再生が可能である。本論文では、スタティックテスタを用いて市販連続媒体の記録再生特性の測定並びに波形観測を行なった上で、DC 磁化された試作 BPM の再生を行い、その再生波形の解析を行なったので以下に報告する。

2. スタティックテスタの装置構成

スタティックテスタの構成を Fig. 1 に示す。ヘッド・ディスク間の相対的な移動はピエゾステージによる2次元直線運動である。下から順に除振台、ピエゾステージ、回転ステージ、X-Y ステージを配置し、X-Y ステージ・回転ステージによりヘッド/トラック位置合わせを行い除振台により外部からの振動の影響を低減している。また、正確な位置検出のためにX/Y 軸 (ダウントラック/クロストラック) 方向それぞれにレーザ測長計を設置している。再生ヘッドの出力信号は AD 変換ボードによりデジタル信号に変換され、PC に取り込まれる。

スタティックテスタと現行のディスク型媒体測定装置 (スピンス

タンド) との違いは主に次の3点である。

1. 媒体移動方式の違い

スピンスタンドが媒体を回転させて測定するのに対し、スタティックテスタは媒体を微量の直線移動により測定を行なう。このことにより、非ディスク形状、あるいは小面積の試作段階のサンプルに対し記録再生評価を行なうことが可能である。

2. ヘッドと媒体との相対速度の違い

スピンスタンドが 10~20 m/s であるのに対し、スタティックテスタでは数百 μ m/s である。このことより、信号帯域は著しく狭くなり、システムノイズが少ない再生波形の観測が可能となる。

3. ヘッドが媒体と接触して記録再生を行なう

スペーシングロスが小さい測定を行なうことにより、より分解能の高い磁化状態の解析ができる。ただ、摩擦によるパーティクルの発生が懸念される。

3. 実験方法

スタティックテスタにおける媒体の線速度は 0.254 mm/s とし

Fig. 1 Schematic of structure of static tester.

Fig. 2 Half pulse width, T_{50} , of reproduced waveform.

た. 100k FCI の記録密度で 500 Hz の記録周波数となる. 接触した状態での記録再生ヘッド・スライダの摺動安定化のためにスライダ上に 3 点パッドを構成した. パッドはリーディング端側媒体対向面に 2 点, トレーリング端側媒体対向面に 1 点構成しトレーリング端側のパッドに記録再生素子が含まれるように加工されている. 記録ヘッドは通常の浮上ヘッドに搭載された単磁極ヘッド (T_{ww} : 125 nm) を用い, 再生ヘッドも通常の浮上ヘッドに搭載された TMR 再生ヘッド (T_{wr} : 115 nm, G_s : 40 nm) である. 記録電流は 50 mA_{Op} とし, 消去には 50 mA_{Op} で 2000k FCI の信号を書き込むことによる擬似的な交流消磁とした. また, BPM には 440 μm の長さの直線状トラックを形成した. 市販媒体については記録と再生を行なったが, BPM については測定前に直流着磁を行い再生のみ行なった.

4. 市販連続媒体の測定

4.1 再生波形パルス幅の測定

Fig. 2 には平均的な再生波形の負方向から正方向への転移部を示す. 同図中の○印はサンプリング間隔での出力値である. 平均半値幅 T_{50} は, ゼロレベルに対し正方向, 負方向それぞれの最高出力の 1/2 の出力での幅であることから市販媒体から得た複数の再生波形の平均半値幅 T_{50} は 15.2 nm となった. これは現行のスピンスタンドでの 30 nm 前後の測定値に対し半分程度の値である.

4.2 相反定理を用いた磁化転移幅の推定

この T_{50} の測定値に対応する磁化転移幅を推定した. 媒体の磁化分布の形状を $\tanh$ 関数と仮定し, 再生ヘッドの感度関数⁹⁾を求めて相反定理により磁化転移パラメータ a に対する T_{50} を計算した. Fig. 3 にはこの計算の結果を示す. ここで, 接触状態における磁気スペーシング h_m を媒体の保護膜・潤滑剤およびヘッドの保護膜等

Fig. 3 Half pulse width, T_{50} vs. transition parameter, a calculated with reciprocity theorem.

の厚さを考慮して 6 nm と仮定すると磁化転移パラメータ a は 3 nm と見積もられる. これは磁化転移幅は πa として 10 nm 程度である. ヘッドとディスクが接触するコンタクト記録で記録再生分解能が向上し急峻な磁化転移を記録再生できた.

5. 試作ビットパターン媒体の測定

5.1 試作ビットパターン媒体

試作した BPM サンプルには Fig. 4 の光学顕微鏡像に示されるような直線状パターントラック群を形成した. パターントラック群にはドットサイズ (ドット長 $DL(\text{nm})$ /ピッチ長 $DP(\text{nm})$ /ドット幅 (nm)) がそれぞれ Table 1 に示す 3 パターンのドットが直線状に形成されている. ドットの作成には高分解能電子線描画と反応性イオンエッチングを用いた. なお, 記録再生ヘッド・スライダの摺動安定化を図るためにカーボン保護膜の成膜, 潤滑剤の塗布およびテープ・クリーニングによる突起除去処理を行った. BPM 用ドット加工プロセス検討を目的に試作したサンプル A は, hcp 構造を有する CoPt/Co 合金から成る記録層をガラス基板上に形成した⁶⁾. また記録再生特性の検討を目的に試作したサンプル B の記録層は, Hard/Soft-Stack 構造を採用した. 膜構造は Table 1 に示す通り, ハード層には高 K_u が得られる Co/Pt 多層膜を, ソフト層には Co 膜を用い, SUL 層とともにガラス基板上に形成した⁷⁾. ピエゾステージのストローク (500 μm) に対し, この直線状パターン群の長さは 440 μm である. 相対的なヘッド進行方向を一致させるため位置信号検出部とトラックセンター検出部を両端に設け Yaw 角調整部をトラック群の前後両端に設けている. 位置信号検出部はそれぞれビット長の違う信号を出力する A 相と B 相とが交互に並んでおり, それぞれの総数は 20 個である. まず, ヘッ

Table 1 BPM sample parameters.

BPM	Dot size parameter (nm) (Dot length/Dot pitch/Dot width)	Saturation magnetization (emu/cm ³)	Recording layer	Recording layer thickness (nm)	SUL
Sample A	100/200/100, 80/160/100, 60/120/100	1200-1300	hcp-CoPt/Co	17	NONE
Sample B	60/140/60, 40/100/40, 30/80/30	640	[Co/Pt] _n /Co	5.6	PRESENT.

Fig. 4 Experimental BPM produced for static tester.

ドを位置信号検出部に走らせ、すべてのA相とB相からの出力が等しい時にYaw角（ヘッドとトラックの成す角度）がゼロと判断する。トラック幅100 nmで長さ440 μmのトラック上からヘッドが逸脱しない許容角度は 0.002° 以下である。ヘッドにより検出されるディスク上の位置信号を頼りにトラックセンター検出部における出力が1/2の出力となる様に位置、角度をX-Yおよび回転ステージを用いて調整した。その後、レーザ測長計で位置を計測しつつダウントラック方向にヘッドを走査させて再生実験を行った⁴⁾。

5.2 様々なドット長サンプルの再生波形取得

サンプルAに直流着磁を行い、ドットサイズ（ドット長(nm)/ピッチ長(nm)/ドット幅(nm)）がそれぞれa)100/200/100, b)80/160/100, c)60/120/100の波形を測定した。サンプルAはBPM用ドット加工プロセス検討を目的に試作した媒体であるが、ここではまだヘッドによる記録再生は行っていないので、SULのないサンプルAも測定対象とした。ヘッドからの信号は直流アンプにより増幅しており、直線状BPMトラックの両端に設けた非磁性部の出力をゼロレベルとしてキャリブレーションした。サンプルAの異なる大きさのドットの波形をFig. 5にそれぞれ示している。ドット1個からの信号が正方向のピークとして明瞭に観測された。ただいずれの波形も着磁方向とは逆向きにわずかな負の振幅のアンダーシュートがあり、詳細に

SEM image of resist patterns.

Fig. 6 Magnetization distribution calculated from SEM image of resist patterns.

は波形自体も左右非対称である。これらがドット形状に依存しているのかについてはAFMの観測などを通して今後検討を行う予定である。

a)100/200/100, b)80/160/100 ドットは、再生ヘッドのシールドギャップ (G_s : 40 nm) に対して十分広いドット間隔であるため、ギャップすなわち磁性膜がない部分が波形において平坦部分として明瞭に観測できる。また、図中にはそれぞれ400個程度のドット再生波形より測定したドットピッチを示している。それぞれのドットピッチは設計ピッチに対し97%程度であり、ドットが概ね設計値どおり加工されたことが確認された。（詳細なドット加工精度については加工プロセスの改良されたサンプルBにて行った。5.5で後述。）

5.3 相反定理を用いた算出波形と実測波形との比較

再生波形がドットの形状と再生感度関数から説明できるか、相反定理を用いてパターン媒体の再生波形の計算を行

Fig. 5 Reproduced waveforms from BPM sample A. Measured value : a) Dot pitch=196 nm, b) Dot pitch=157 nm, c) Dot pitch=116 nm

Fig. 7 Sensitivity function of read head.

なった。ドットの磁化分布の算出には、ドット形状が明瞭に観察できたレジストパターンの SEM 像からの形状を求めてクロストラック方向に積分することによりドット全体が一様な飽和磁化を有すると仮定した場合の磁化分布を計算した。その結果を Fig. 6 に示す。先端部が丸く下部がゼロとなる分布形である。計算した磁化分布に対し、磁気スペーシング h_m を 6~15 nm とした時の Fig. 7 に示すヘッド再生感度関数 H と相反定理演算を行なった。ドット長 (nm)/ピッチ長 (nm)/ドット幅 (nm) が 60/120/100 の場合におけるパターン媒体再生波形を計算した結果を Fig. 8 に実線で示している。この計算した再生波形にもアンダーシュートが生じている。これは Fig. 7 に示す感度関数に生じているアンダーシュートの影響である。

Fig. 8 にはドットサイズ (ドット長 (nm)/ピッチ長 (nm)/ドット幅 (nm)) が c) 60/120/100 パターンでの再生波形実測値も示す。ここで、計算結果 (実線) と実測値 (○プロット) のそれぞれの振幅はプラスのピークに対し規格化している。負のアンダーシュートを有することや正側のピークが負側に比べて鋭いことなど、定性的には計算と実測が一

Fig. 8 Comparison of calculated and measured values waveforms from BPM sample A, DL60 nm, DP120 nm dots.

致している。しかし、パルスのピッチが若干異なり波形の細部の不一致を含めて今後の検討を要する。

5.4 SUL 付きサンプルの再生波形取得

よりドット径が小さく、また記録再生特性の検討を目的に SUL のある BPM サンプル B を試作しサンプル A と同様の波形観測を行なった。サンプル A の評価と同様に直流着磁を行い、ドットサイズ (ドット長 DL (nm)/ピッチ長 DP (nm)/ドット幅 (nm)) がそれぞれ a) 60/140/60, b) 40/100/40, c) 30/80/30 の波形を観測した。Fig. 9 にはサンプル B の異なる大きさのドットの波形を示している。同図より、ドット長 40 nm 以上のドットでの出力に比べドット長 30 nm のドットでの出力が小さいことがわかる。また、Fig. 5 に対し出力が大きく異なるが、Mrt (飽和磁化と記録層膜厚との積) とドット幅により規格化を行なうと概ね妥当な出力が得られている。

5.5 再生波形より得られたドット加工精度評価

正確なドットピッチで加工されたかを再生波形から測定した。ドットピッチの計算にあたっては、327~1829 個の

Fig. 9 Reproduced waveforms from BPM sample B. Measured value : a) Dot pitch=136 nm, $\sigma = 9$ nm, b) Dot pitch=97 nm, $\sigma = 5$ nm, c) Dot pitch=78 nm, $\sigma = 8$ nm

Table 2 Dot pitch analysis of BPM sample B.

Designed value	Dot length : DL (nm)	a) 60	b) 40	c) 30
	Dot pitch : DP (nm)	140	100	80
Measured value	n	1309	1829	327
	Measured value of DP : L (nm)	136	97	78
	L / DP	0.97	0.97	0.97
	σ (nm)	9	5	8
	σ / L	0.07	0.05	0.10

ドット再生波形からの微分によるピーク検出を行い、ピーク間距離を測定して平均値と標準偏差を求めた。その結果を Table 2 に掲げる。いずれのサイズにおけるドットピッチもその設計値に対する誤差 (L / DP) は 3% 以内であった。試作した BPM サンプルがそのドットサイズによらずほぼ設計値どおりに形成されたことが確認された。また、ドットピッチの標準偏差 σ はドット長 60 nm, 40 nm においては約 6% 程度であった。一方、c) 30 nm ドットにおいて σ は 10% と他のドットサイズに比べ大きい。30 nm ドットの分散が大きいのは加工ダメージであると想像され、これは Fig. 9 における出力が 60 nm のドット a) に比べ約 1/4 と大幅に小さいこととも対応する。加工における 30 nm と 40 nm 以上との差について検討と改善が課題である。

6. まとめ

将来の BPM の記録再生特性 (SN 比, ATE, 記録マージン) の解析のためにスタティックテストを用いて測定を行った。現行のグラニューラ媒体を測定し再生波形半値幅 T_{50} , 磁化転移パラメータ a が小さいことを明らかにした。コンタクトにより記録再生分解能が向上し急峻な磁化転移を再生できていると考えられる。

さらに、試作した BPM サンプルの再生波形を測定して、計算結果と実測値が定性的に一致することを確認した。また、再生波形からドットピッチを求め、ドットピッチはドットサイズによらずほぼ設計値どおりであり、その標準偏差はドット長 40 nm 以上においてドットピッチの 6% 程度であることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省による次世代 IT 基盤構築のための研究開発「高機能・低消費電力スピンドバイス・ストレージ基盤技術の開発」の援助を得て行われた。高分解能電子線リソグラフィは、東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設で行われた。ここに深謝する。

References

- 1) R. M. H. New, R. F. W. Pease, and R. L. White: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **12**, 3196-3201 (1994).
- 2) M. Albrecht, C. T. Retner, A. Moser, M. E. Best, and B. D.

Terris: *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2875 (2002).

- 3) J. Moritz, L. Buda, B. Dieny, J. P. Nozieres, R. J. M. van de Veerdonk, T.M. Crawford, and D. Weller: *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1519 (2004).
- 4) 竜野, 三浦, 青井, 村岡: *信学技報*, **109**, No. 80, MR2009-8, pp.39-44, (2009)
- 5) Y. Suzuki, and Y. Nishida: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1337 (2001).
- 6) K. Mitsuzuka, N. Kikuchi, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Aoi, H. Muraoka and J. C. Lodder: *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2160-2162 (2007).
- 7) K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, N. Kikuchi, O. Kitakami, H. Muraoka, and H. Aoi: *J. Appl. Phys.*, **105**, 07C103 (2009).

2009 年 10 月 20 日受理, 2009 年 12 月 21 日再受理, 2010 年 1 月 14 日採録