単磁極記録ヘッド・微分型波形変換による二層膜垂直磁気記録の デジタル特性評価

Evaluation of Perpendicular Magnetic Recording for Double Layer Media with Single Pole Writing Head and Differentiator

村岡裕明・三浦健司・杉田愷・中村慶久（東北大学電気通信研究所）

H. Muraoka, K. Miura, Y. Sugita and Y. Nakamura (RIEC, Tohoku University)

Digital signal evaluation for a thin-film single-pole head and double layer perpendicular disk was carried out with an error rate tester. An AMR head was used as a reading head. The channel of the tester was the PR4ML with the 8/9 endec. Waveform for the MR head was transformed with a differentiator consisted of passive LCR circuitry and high speed linear amplifier. A D50 of 185 kFRPI, a PW50 of 130 nm, and an NLTS at 300 kFRPI were measured. A byte error rate of 10^{-6} was obtained at 310 kFRPI for a read trackwidth of 1.4 μm .

はじめに

熱緩和による記録磁化減磁の懸念を端緒として、再び垂直磁気記録方式による超高密度記録の可能性についての議論が盛んになってきた。このためにはさまざまな角度から評価を行い取り組むべき課題を明確にしておく必要がある。垂直磁気記録のヘッドディスク系の基礎特性についてはこれまでさまざまな方式について多くの検討がなされてきているが、エラーレート特性に代表されるデジタル特性の評価までは必ずしも十分ではなかった。最近になって、一定の完成度を持つ垂直磁気記録用ディスクが試作され、MRヘッドの入手が比較的容易になったこともあって、二層膜垂直媒体にリングヘッド記録を行ういくつかの測定例が報告されるようになってきた[1],[2]。

一方、筆者らはこれまで二層膜媒体にコンタクト型単磁極ヘッドを用いる実験[3]を行ってきた。元来、単磁極ヘッドは二層膜媒体を用いると優勢な垂直記録磁界やシャープなトラック端分解

能などが実現でき、高密度垂直磁気記録用ヘッドとして適している[4]。この利点をより実用的な実験から示すために、低インダクタンスで高周波に適し安定した記録再生が可能な浮上型薄膜励磁単磁極ヘッドを試作した[5]。本報告では、この単磁極ヘッドを用いてエラーレート特性の測定を行い、垂直磁気記録の記録方式としての性能を検証する実験を行った結果を述べる。

垂直磁気記録用ヘッド・ディスク

新たに試作した薄膜導体励磁型の浮上ヘッドを記録専用ヘッドとして用いた。筆者等はこれまで、リターンパスに軟磁性薄膜を用いたもの

Fig. 1 Cross-sectional view of the developed thin-film single-pole head.

Table 1 Specifications of the single pole head

Pole material	Co-Zr-Nb amorphous
Bs of poles (T)	1.2
Track width (μm)	2
Coil height (μm)	5
Coil turns	1.5
Main pole thickness (nm)	400
Flying height (nm)	≈ 50

Table 2 Specifications of the double layer perpendicular disk.

Recording layer (CoCrTa)	Thickness	50 nm
	Ms	290 emu/cc
	Hc	2700 Oe
Underlayer (CoZrNb amo.)	Thickness	600 nm
	Bs	1.2 T

とフェライト基板に成膜しバルクフェライトスライダをリターンパスとして兼用するものの、二種類の薄膜導体励磁型の単磁極ヘッドを試作している。ここでは前者の薄膜リターン型の単磁極ヘッドを用いた。ヘッドの断面構造を図1に、本ヘッドのパラメータを表1に示す。再生ヘッドはトラック幅 $1.4\mu\text{m}$ のAMRヘッドであり、シールド間隔の公称値は $0.21\mu\text{m}$ で、浮上量は $40\text{--}50\text{nm}$ 程度である。使用した垂直ディスクは、二層膜型の垂直ディスクの課題のひとつであった軟磁性層の磁区制御を行うピンニング層を持つ三層膜構造の垂直磁気記録ディスクである[6]。主な仕様を表2に示す。

基礎アナログ特性

本記録ヘッドはターン数が著しく少ないので、起磁力換算で高記録感度でも大きな記録電流を要する懸念があった。具体的には実用回路

Fig. 2 Saturation characteristics in comparison with an example of longitudinal recording. ($v=7.62\text{m/s}$)

として 100mA_{p-p} 程度の最大記録電流で飽和記録できなくてはならない。測定結果として、図2には飽和特性を、図3にはオーバーライト特性を示す。約 70mA_{p-p} という現実的な記録電流で、 -40dB 程度以下のオーバーライトが実現でき飽和記録が可能であることが分かる。特に、図2には12ターンの励磁コイルのリングヘッドを用いた長手記録の一例を示すが、わずか1.5ターンの励磁コイルでありながら、ほぼ長手記録と同等の記録電流で再生出力が飽和している。従って、記録起

Fig. 3 Overwrite characteristics. The numerator and the denominator represent overwriting and overwritten signal. ($v=7.62\text{m/s}$)

磁力での比較であれば、ほぼ一桁の記録感度の改善が実現されている。これは、主磁極を先端の近傍で励磁する本ヘッドの構造によると考えている。

図4に孤立再生波形を示す。良く知られているように垂直磁気記録の孤立再生パルスは低域成分を含む矩形波である。本検討では後述するように長手記録で一般的に用いられているチャンネルを使った評価を行う。この理由から本矩形波パルスを単峰性の長手記録の再生波形と類似のパルスに変換する必要がある。ここではもっとも簡便に実現できる微分器を用いて実験した。微分器は、LCR素子による高域ロールオフ型の受動

Fig. 4 Readback waveform with an MR head for perpendicular disk. Recording density was 10 kFRPI. ($v = 7.62 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Waveform change against various cut-off frequencies of the differentiator

微分回路と利得減衰を補償する高速リニアアンプにより構成した。微分器による再生波形の変化の様子を図5に示す。微分器のカットオフ周波数(高周波のロールオフ周波数)が30MHz程度と低いとパルス後端にアンダーシュートが生じるが、60MHzでアンダーシュートは認められなくなる。このヘッドの再生波形の10-90%立ち上り時間は24nsであり、この2倍を基本波周期と考えると3次高調波まで微分すれば孤立波形を歪なく単峰化できることになる。この等化による単峰化で、再生シールド間隔の約60%に相当する130nmの PW_{50} を実現できた。図6は、単層膜と二層膜垂直磁気記録並びに長手記録に対して、解析的にMRヘッドに対する理想孤立転移応答を計算し[7]、その微分パルスの PW_{50} を求めたものである。同図中に、ここで得られたものを含めて実験値を◇でプロットするといずれもほぼ計算と一致し、実測の PW_{50} はMRヘッドの再生分解能で決まっていることが分かる。

図7には記録密度特性を示す。ヘッド出力での D_{50} は185kFRPIであり、微分後の D_{50} は260kFRPIである。後者の微分後の D_{50} は上述の理想磁化転移を仮定して計算から求めた値に一致し[7]、この再生条件下では PW_{50} 、 D_{50} とも記録磁化転移幅の影響は無視しうることを示唆する。

Fig. 6 Calculated PW_{50} in a function of shield separation of an MR head for differentiated perpendicular magnetic recording and longitudinal recording.

なお、ここでリファレンスとして用いた長手ディスクは垂直磁気記録に比べて出力が小さい。長手記録においては高記録密度を得るためにMrtを小さくせざるを得ないので、記録媒体からの再生磁束は低下する。これを補うために高感度再生ヘッドの開発が必要になっている訳であるが、垂直磁気記録では高い D_{50} が得られる条件下でも大きな再生磁束が得られることが同図から明らかである。

また、図8は、理想磁化転移を仮定した垂直磁気記録における孤立微分パルスの PW_{50} を計算し、この孤立パルスを重畳することで計算した

Fig. 7 Roll-off characteristics. Shield-to-shield separation and flying height of the MR head were 210nm and around 50nm, respectively.

Fig. 8 Calculated and measured relation between PW_{50} and D_{50} for longitudinal disks, perpendicular single layer disks and perpendicular double layer disks.

D_{50} の関係をプロットしたものである。同図中には長手記録、単層型垂直媒体、二層型垂直媒体のそれぞれについての計算結果をプロットしており、同時に実線でChampionとBertramによって示された長手記録のMRヘッド再生での計算結果[8]も示す。これらはほぼ同様の傾向を示しており、垂直磁気記録の PW_{50} と D_{50} の関係は長手記録の場合と定量的に等しい。さらに、上記の測定から得られた PW_{50} と D_{50} を◇で同図中にプロットすると、これらの計算結果ともほぼ一致することが分かった。したがって、ここでの実験結果は重畳によって記録密度特性を説明でき線形性が成立していること、長手記録系の孤立パルス幅と D_{50} の関係は垂直磁気記録でも利用できること、を意味している。後者は、微分器を通した垂直磁気記録波形は(分解能の観点からは)長手記録における単峰性波形と同等であり、これまで経験的な装置設計に用いられてきた孤立パルス幅と D_{50} の定量的な関係に一致するといえる。ただし得られるパルス幅の絶対値は、再生ヘッドのシールド間隔が同一の場合には長手記録より小さい。すなわち、垂直磁気記録を用いることでシールド間隔と浮上量が大きくとも等価的に高分解能再生ヘッドであるかのような特性が得られ、再生ヘッドに対する制約を緩和することが可能なことを示している。

Fig. 9 Media SNR for perpendicular double layer disk in comparison with some longitudinal disks.

通常、ノイズを低減するための記録層の微細磁気構造制御には非磁性下地層の挿入が有用であるが、軟磁性膜を下地層とする必要のある垂直二層膜媒体では下地材料が限定されるために、この手法を適用して低ノイズ化を図ることが困難なこともあり、現状の二層膜媒体はややノイズが大きい。図9は、各記録密度で測定された総合ノイズスペクトラムからヘッドアンロード時のシステムノイズを差し引いて直流から50MHz (333kFRPI) まで積分した結果を実効値メディアノイズとし、各記録密

Fig. 10 NLTS vs. recording density. Used polynomial was x^7+x^3+1 .

Fig. 11 Logarithmic byte error rate performance in a function of transitions density. ($v=7.62\text{m/s}$)

度の再生信号の尖頭値をメディアSN比として示している。200kFRPIを越える高密度では十分な優位性があるが、低記録密度時のSN比は改善の余地がある。

デジタル評価

エラーレートの測定には日本テクノビュート製のエラーレートテスターDHA9401型を用いた。ただし、本実験では記録ヘッドと再生ヘッドが分離されているので、この録再分離型のヘッド構成でも測定可能なように改造を施してある。本テスターのリードチャンネルには市販の信号処理LSIチップ (SS132P4915A) を用いており、8/9変換とPR4MLから成るものである。

まず、図10に、非線形転移点シフト(NLTS)の記録密度依存性を示す。本測定は127ビットの擬似ランダム系列記録によるダイパルス抽出法[9]によった。300kFRPIの高密度まで6%程度の低い値でほぼ一定である。この結果は、本ヘッドディスク系における線形性が良好なことを示しており、上述した記録密度特性での重畳性が成立する結果とよく対応するものである。また、筆者らによる過去のバルク型コンタクト単磁極ヘッドでの測定結果と良く一致する[10]。なお、上記の測定でのエコーの位置からはオーバーライトシフト、1ビット及び2ビット前の干渉による歪は認められるものの、ディスク再生磁束が大きいことによるMRヘッド伝達関数の非直線性の影響は検出されなかった。

図11はエラーレートの測定結果である。同図は横軸をディスク上での磁化反転密度、縦軸をバイトエラーレートの対数値とし、長手ディスクを同一の再生ヘッドで試験した結果も併せて示している。記録補償については、長手ディスクでは各測定点で最適補償に調整したが、垂直ディスクでは無補償である。測定の結果、本ヘッドディスクは 10^{-6} のバイトエラーレートが310kFRPI程度で得られており、ここでの長手ディスクに対しては優位性のある結果を得られた。再生ヘッドのトラック幅は $1.4\mu\text{m}$ なので、トラックピッチを $1.8\mu\text{m}$ として勘定す

ると、約4Gbpsに相当する面密度になる。しかし、130nmのパルス幅に対して、上記の310kFRPIでのビット長は82nmであり、その比が1.6と現状の長手システムに比べて低い。この理由を見出してさらに高密度化することが課題である。

まとめ

単磁極ヘッドと二層膜型のディスクを用いる垂直磁気記録のエラーレート特性を、微分器による波形変換方式により測定した。130nmの狭いパルス幅と300kFRPIで6%という低いNLTSなど、垂直磁気記録の高密度記録方式としての特性を確認できた。また、エラーレートも 10^{-6} のバイトエラーレートが310kFRPIに達した。ここで用いた再生ヘッドは、シールド間隔が210nmで浮上量が50nm程度の比較的一般的な市販AMRヘッドであり、チャンネルもまた一般的なPR4で上記の記録密度が可能であることを考慮すれば、薄膜単磁極記録ヘッドと垂直媒体のデジタル特性には、特に大きな問題は見当たらないと考えている。しかし、孤立パルス幅に対する規格化記録密度はまだ1.6であるので、等化条件やSN比の影響などにより詳細な検討を加え、まずは線密度に重点を置いてさらに高密度化する方策を探る。

謝辞

ここで用いた垂直磁気ディスクは日本ビクター(株)中央研究所西原、安藤両氏にご提供いただいた。単磁極浮上ヘッドのスライダ加工にはシチズン時計(株)福島氏、小山氏、並びにソニー(株)片倉氏、矢沢氏のご協力を得ている。謝意を表する。また、本研究には、文部省科研費、ASET、SRCの援助を得ている。

文献

1. 石川清彦、沼澤潤二、大島英男、”二層垂直ディスク・MRヘッド再生における再生波形の微分等化とC/N、BERの関係”、第5回垂直磁気記録シンポジウム会議資料集、124-128、1996

2. K. Ho, M. Matthew, H. Kane, B.M. Learson, G.I. Noyes, J.C. Harig, Y.K. Kim, “Data storage and retrieval using perpendicular media and megnetoresistive read transducer,” IEEE Trans. Magn., 33, 2538-2542, 1997
3. Y. Nakamura, H. Muraoka, “New concept for perpendicular magnetic recording hard disk system,” IEEE Trans. Magn., 27, 4555-4560, 1991
4. 中村慶久、田川育也、清水幸也、”磁気記録の超高密度化—3次元シミュレーションによる予測—”、信学論C-I, J79-C-I, 152-164、1996
5. H. Muraoka, K. Sato, Y. Nakamura, T. Katakura and K. Yazawa, “Extremely low inductance thin-film single-pole head on flying slider,” IEEE Trans. Magn., 34, 1474-1476, 1998
6. T. Ando and T. Nishihara, “Triple layer perpendicular recording media for high SN ratio and signal stability,” IEEE Trans., Magn., 33, 2983-2985, 1997
7. H. Muraoka and Y. Nakmaura, “Quantification of perpendicular magnetic recording with double layer media,” J. Magn. Soc. Jpn., 21 suppl S2, 157-162, 1997
8. E. Chanpion, H.N. Bertram, “The effect of MR head geometry on playback pulse shape and spectra,” IEEE Trans. Magn., 31, 2461-2470, 1995
9. D. Palmer, P. Ziporovich, R. Wood, “Identification of nonlinear write effects using pseudorandom sequences,” IEEE Trans. Magn., MAG-23, 2377-2379, 1987
10. H. Muraoka, R. Wood, Y. Nakamura, “Nonlinear transition shift measurement in perpendicular magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., 32, 3926-3928, 1996