40 Gb/in²を超える面内磁気記録再生特性に関する検討

Ultra-high-density Longitudinal Recording Characteristics at more than 40 Gb/in²

財津英樹, 富山大士, 中本一広, 川辺隆*, 鈴木博之*, 神邊哲也*,
細江譲, 高野公史, 城石芳博*

(株)日立製作所中央研究所, 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280 (〒185-8601)

* (株)日立製作所ストレージシステム事業部, 神奈川県小田原市国府津 2880 (〒256-8510)

H. Zaitzu, F. Tomiyama, K. Nakamoto, T. Kawabe*, H. Suzuki*,
T. Kanbe*, Y. Hosoe, H. Takano, and Y. Shiroishi*

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280 Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601

* Data Storage & Retrieval Systems Div., Hitachi, Ltd., 2880 Kozu, Odawara-shi, Kanagawa 256-8510

(2000年 10月 6日受理, 2000年 12月 6日採録)

We studied the read/write characteristics of a high-density longitudinal recording system at more than 40 Gb/in². For accurate design of a recording system with high track density, we introduced noise/signal ratio by unit read track width as a parameter. This method was employed in the design of a 40 Gb/in² recording system.

Based on the design parameters, we fabricated CoCrPtX media with a layer structure optimized for low noise and thermal stability. A narrow shield Spin-Valve (SV) GMR head was also fabricated to achieve high linear recording density. System tests registered a density of 39.8 Gb/in².

After, we improved the media and the head, 53 Gb/in² was demonstrated.

Key words: longitudinal magnetic recording, CoCrPtX media, narrow shield GMR head, >40 Gb/in²

1. はじめに

磁気記録において 40 Gb/in²を超えるデモンストレーションが発表されるまでになった[1-3]. この領域になると熱減磁が大きな問題となる. この対策として面内磁気記録方式では, 多層膜構造[1]や, 高保磁力媒体が検討されている. また垂直磁気記録方式による高面記録密度化の研究も進められている[2].

本研究では, 媒体の磁性層組成を最適化して耐熱減磁特性と低雑音化の両立を図った CoCr 系 4 元媒体と狭シールド SV(Spin-Valve) GMR ヘッド[4]を組み合わせ, 40 Gb/in²を超える面内磁気記録再生特性に関する検討を行った.

本検討では, まず高 TPI(Tracks per inch)対応の設計手法を開発して設計精度の向上を図った. 通常, 再生信号振幅と再生トラック幅の関係, および雑音パワーと再生トラック幅の関係は比例関係として取り扱い, これを前提として再生トラック幅が変化したときの記録再生特性を計算することが多い. しかし再生トラック幅を狭小化するとこの前提が成り立たず, これが SNR(Signal to Noise Ratio)の実測と計算結果のずれを生じる原因となることが実験によりわかった. そこで狭トラック記録再生系に対応した再生トラック幅と信号振幅および雑音パワーの関係をとり入れた記録再生系設計手法を開発した.

次に, この手法を適用して 40 Gb/in²の設計仕様を算出し, これに基づき媒体・ヘッドを試作して 40 Gb/in²条件の記録再生特性を評価した. さらにヘッド・媒体の改良により 50 Gb/in²を超える超高密度記録の可能性を検討した.

2. 設計手法

設計では, ヘッド位置決め精度をトラックピッチの 15 %と仮定し, ビットエラーレートスライス 10⁻⁵でのオフトラック余裕度をトラックピッチの 15 %以上(左右対称な再生感度分布を仮定した場合±7.5 %以上)確保すること, ならびに 10⁻⁴以下のオントラックビットエラーレートを確保することを目標とした.

記録再生系設計手順の概略を Fig. 1 に示す. まず目標面記録密度に対して任意の BPI(Bits per inch)/TPI 比を設定し, トラック幅設計を行い, 設定された TPI におけるヘッドの記録再生トラック幅を決定する. 次にシールド間隔 G_s 等のヘッドパラメータ, H_c, M_t, S*, S'等の媒体パラメータ, および磁気的浮上量 h_a からオントラックでの SNRを予測する. 本研究ではこの部分を狭トラック記録再生系に適合するよう改良を行った. 以上を BPI/TPI 比を逐次的に変えながら繰り返すことにより目標面記録密度を達成するための最適な BPI/TPI 比を計算し, 最終的な設計中心点を決定する.

Fig. 1 Design procedure.

まずトラック幅設計手法について説明する. トラック幅設計では設計指標としてクロストーク量 CT(x)を(1)式で定義した. CT(x)は再生したい自己トラック中心から x だけ再生ヘッドがずれた位置での自己トラックの信号に対するそれ以外の干渉信号(隣接トラック信号, 下地トラック信号)の比を示すパラメータである. ここで S_{self}(x),

$S_{adj}(x)$, $S_{self}(x)$ はそれぞれ自己トラック, 隣接トラック, およびデータのオーバーライト時に消え残った古いデータである下地トラックの信号振幅である.

$$CT(x) = (S_{adj}(x) + S_{self}(x)) / S_{self}(x) \leq CT_{goal}. \quad (1)$$

トラックピッチ(Tp)の 7.5 % だけ再生ヘッドがオフトラックした位置での $CT(0.075 Tp)$ を CT^* と定義すると, オフトラック余裕度に関する設計目標を達成するためには, CT^* がビットエラーレート 10^{-5} を確保するのに必要な値 CT_{goal} 以下であればよく, 設計を行うためには, この CT_{goal} を調べる必要がある. 信号レベルで見れば, 再生ヘッドがオフトラックした際, エラーレートを大きく左右するのは干渉信号振幅と自己トラック信号振幅の比であり, この比が同じであれば, 干渉信号が下地トラックからのものであれ隣接トラックからのものであれエラーレートは同じになる. そこで実験ではまずトラックピッチを変えながら, 自己トラック, 隣接トラックの順で記録を行い, ビットエラーレートが 10^{-5} となる再生ヘッドオフセット量を調べ, この位置での干渉信号振幅と自己トラック信号振幅の比を測定した. この時, オントラックエラーレートを目標としている 10^{-5} とした. Fig. 2 に CT_{goal} の評価結果を示す. 実験では記録トラック幅 $0.6 \mu m$, 再生トラック幅 $0.3 \mu m$ のヘッドを用いている. ビットエラーレートが 10^{-5} となる再生ヘッドのオフセット量が減少している領域 ($Tp < 0.6 \mu m$) では, 干渉信号がエラーレートを劣化させる主要因となっているため, 干渉信号振幅 ($S_{adj}(x')$) と自己トラック信号 ($S_{self}(x')$) の比はほぼ一定であり, その値は -24 dB であった. ここで x' はビットエラーレート 10^{-5} となる再生ヘッドオフセット量を表す. 以上の検討から CT_{goal} は -24 dB と決定でき, (2) 式を満足するように記録トラック幅および再生トラック幅を設計することにした.

$$CT^* \leq CT_{goal} = -24 \text{ dB}. \quad (2)$$

Fig. 2 Estimate of CT_{goal} .

次にオントラック SNR 予測手法について説明する. トラック幅が広い場合, ヘッド出力と媒体雑音パワーはほぼ再生トラック幅に比例し, 単位トラック幅当りの N/S は再生トラック幅によらず, ほぼ一定であった.

しかし狭トラック化が進むにつれ, Fig. 3 に示すようにこの関係が成り立たなくなっている. Fig. 3 は, 再生トラック幅と 600 kFCI 記録時の単位トラック幅当りの N/S との関係性を測定した結果である. 単位トラック幅当りの N/S は (3) 式で定義され, N は雑音の実効振幅, S は信号振幅, Tw_r はマイクロトラックプロファイルの半値幅で定義

した再生トラック幅である.

$$(\text{単位トラック幅当りの } N/S) = N/S \times Tw_r^{1/2}. \quad (3)$$

Fig. 3 の結果から, 再生トラック幅が小さくなるにつれて急激に単位トラック幅当りの N/S が増大している事がわかる. さらに Fig. 4 に示すように, 再生ヘッドには図中の幅 D で示す不感帯が存在し, これが狭トラックになるにつれて単位トラック幅当りの N/S を大きくする原因であることがわかった. この不感帯は, ヘッド構造により変化するパラメータであり, バイアス磁界による再生ヘッド端部での感度の低下が原因で生じると考えられる.

Fig. 3 N/S by unit read track width.

Fig. 4 Relation between read track width and output signal.

ここで実効再生幅 Tw_{eff} を (4) 式で定義し, ヘッド出力および雑音パワーは実効再生幅に比例するとして, この不感帯の影響をオントラック SNR 予測に取り入れた.

$$Tw_{eff} = Tw_r - D. \quad (4)$$

SNR の再生トラック幅依存性に関し, 実測と予測を比較した結果を Fig. 5 に示す. 不感帯 D の影響を考慮しない場合, 再生トラック幅 $0.15 \mu m$ 付近では実測結果と予測結

Fig. 5 Comparison between calculated SNR and measured SNR.

果は約1 dBほど乖離していることがわかる。これに対し、不感帯Dの影響を考慮することで、実測結果をほぼ予測できていることが確認された。

3. 40 Gb/in²の記録再生系設計

開発した設計手法を40 Gb/in²の記録再生系設計に適用した。

最近の40 Gb/in²級のデモンストレーション[5]から設定した設計初期値である70 kTPIでのクロストークマップを例としてFig. 6に示す。記録トラック幅が非常に狭い領域では、下地トラックの信号が増大するため、同一のCT*を確保するためには再生トラック幅をより狭くする必要がある。逆に記録トラック幅が広すぎると、隣接トラックの信号が増大するため、やはり再生トラック幅を狭くする必要がある。またオントラックでのSNRを確保するためには、できるだけ再生トラック幅、および記録トラック幅を広くする必要がある。以上の理由から70 kTPIでの再生トラック幅設計中心点は0.24 μm 、記録トラック幅設計点は0.31 μm となる。

Fig. 6 Crosstalk map at 70 kTPI.

それぞれのTPIにおけるトラック幅設計を行い、最適BPI/TPI比を導出した結果をFig. 7に示す。この結果から40 Gb/in²を達成するために最適なBPI/TPI比は7.1となり、最適BPIは533 kBPI、最適TPIは75 kTPIとなる事がわかる。

Fig. 7 Optimization of BPI/TPI for 40 Gb/in².

以上の検討結果から導出した40 Gb/in²の設計仕様はTable 1に示す通りである。ここでTw_wは記録トラック幅、G_sはシールド間隔、h_mは磁気的浮上量である。また仕様算出において、Fig. 4の測定結果から不感帯幅Dを50 nmと

して計算しており、予測される再生孤立波形半値幅(PW₅₀)は120 nm、孤立波振幅の50%の振幅となる線記録密度(D₅₀)は314 kFCIであった。

Table 1 Design parameters for 40 Gb/in².

Media		Head		RW Conditions	
H _c	3.5 kOe	Tw _w	0.29 μm	h _m	24 nm
M _r t	0.36 $\frac{\text{memu}}{\text{cm}^2}$	Tw _r	0.23 μm	BPI	533 kBPI
S*	0.6	G _s	80 nm	TPI	75 kTPI

4. 40 Gb/in²条件実験結果

Table 1の設計仕様に基づき媒体・ヘッドを試作し、記録再生実験を行った。試作した媒体・ヘッドの諸元ならびに実験条件はTable 2に示す通りである。媒体はCoCr系4元媒体であり、磁性層の組成を最適化することにより低雑音化と耐熱減磁性の両立を図っている。一方SV GMRヘッドではシールド間隔を80 nmまで狭小化することで高分解能化を図っている。また信号処理方式はMR²PRML方式を用いた。

Table 2 Experimental conditions

Media		Head		RW Condition	
H _c	3.5 kOe	Tw _w	0.33 μm	h _m	24 nm
M _r t	0.36 $\frac{\text{memu}}{\text{cm}^2}$	Tw _r	0.27 μm		
S*	0.55	G _s	80 nm		

測定の結果、PW₅₀は115 nm、D₅₀は330 kFCIであり、設計時の予測に対し、それぞれ-4.2%、+4.8%であった。またオーバーライトは-43 dBであった。

Fig. 8にオントラックビットエラーレートが10⁻⁶となる560 kBPIでの747カーブを示す。トラックピッチの15%を示す破線と747カーブはトラックピッチ0.357 μm で交わり、これは71 kTPIに相当する。このとき面記録密度は39.8 Gb/in²となり、目標面記録密度40 Gb/in²をほぼ達成できた。ここでのBPI/TPI比は7.9であり、設計仕様のBPI/TPI比である7.1に比べてトラック密度を小さくした形となったが、これは実験に用いたヘッドの記録トラック幅

Fig. 8 747 Curve (560 kBPI).

および再生トラック幅が設計仕様よりも広いものを用いたためである。

また測定で用いたヘッドの不感帯幅 D は 50 nm であったが、不感帯がないとした場合に比べ SNR は 0.3 dB 程度低下していると考えられる。

次に測定精度およびランダムデータ記録時の平均記録密度の観点から線記録密度 560 kBPI の半分に相当する 280 kBPI で記録した信号の熱減時特性を、室温において測定した結果、記録後 1000 秒後の信号減衰は 0.12 dB、信号減衰の傾斜は -0.04 dB/decade であり、実用上問題のないレベルである事を確認した。

5. 媒体・ヘッドの改良による高面記録密度化

40 Gb/in²の実験で用いた媒体・ヘッドを改良し、さらなる面記録密度の向上を目指した実験を行った。

Table 3 に媒体・ヘッドの改良点を示す。媒体は 4.0 kOe と高保磁力化し、分解能および耐熱減磁の向上を図った。また下地層の変更により面内配向を向上させ、高分解能化を指向する方向で媒体試作を行った。

ヘッドは狭シールド化、狭トラック化を行い、磁氣的浮上量を 22 nm まで低減して分解能を向上させた。

Table 3 Media/Head improvement.

Media		Head		RW Condition	
H_c	4.0 kOe	Tw_w	0.26 μm	h_m	22 nm
$M_r t$	0.41 $\frac{\text{memu}}{\text{cm}^2}$	Tw_r	0.22 μm		
S^*	0.68	G_s	70 nm		

測定の結果、 PW_{50} は 110 nm、 D_{50} は 360 kFCI と線記録密度特性の改善が確認できた。オーバーライトは -39 dB であった。

オントラックビットエラーレートが 10^{-6} となる線記録密度は 620 kBPI まで増大し、ビットエラーレート 10^{-5} での 747 カーブは Fig. 9 に示す通りとなった。トラックピッチの 15 % を示す直線と 747 カーブはトラックピッチ 0.297 μm で交わり、これは 85.5 kTPI のトラック密度に相当する。このとき面記録密度は 53 Gb/in² となり、媒体・ヘッドの改良により 33 % の面記録密度の向上を実現することができた。

Fig. 9 747 Curve (620 kBPI).

310 kBPI で記録した信号の熱減時特性を室温で評価した結果は Fig. 10 に示す通りである。記録後 1000 秒後の信号減衰は 0.16 dB、信号減衰の傾斜は -0.05 dB/decade であり、実用上問題のないレベルである事を確認した。

Fig. 10 Signal decay (310 kBPI).

6. まとめ

本研究では狭トラック化により顕著となってきた再生ヘッド端部での不感帯の影響を取り入れて狭トラック対応の記録再生系設計手法を開発し、40 Gb/in²の媒体・ヘッド設計を行った。この結果に基づき試作した CoCr 系 4 元媒体、および狭シールド SV GMR ヘッドを用い、40 Gb/in²の面記録密度が実現可能である事を確認した。

さらに媒体の高保磁力化、下地層の改良、ヘッドの狭シールド化、狭トラック化、低浮上化により 53 Gb/in²まで面記録密度向上が可能である事を確認した。

なお熱減磁特性はいずれの場合とも実用上問題のないレベルであることを確認している。

7. 謝辞

本研究の一部は、通産省プロジェクト「超先端電子技術促進事業」の一環として ASET が NEDO より委託された研究として実施されました。

文献

- [1] E. N. Abarra, M. Suzuki, and I. Okamoto: Digest of InterMag 2000, Toronto, 2000, AA-01.
- [2] H. Takano, Y. Nishida, A. Ishikawa, H. Sawaguchi, T. Kawabe, M. Futamoto, H. Aoi, H. Muraoka, Y. Nakamura, N. Honda, and K. Ouchi, "Realization of 52.5Gb/in² Perpendicular Recording," 信学技報, MR2000-11 pp21-23, 2000.
- [3] F. H. Liu, K. Stoev, X. Shi, H. C. Tong, H. Chen, C. Qian, Z. W. Dong, X. Yan, M. Gibbons, S. Funada, Y. Liu, P. Prabhu, R. Barr, S. Dey, M. Schultz, S. Malhotra, B. Lal, J. Kimmal, M. Russak, P. Kern, D. Wachenschwanz and L. Mei: Digest of InterMag 2000, Toronto, 2000, HT-02.
- [4] B. Dieny, V. S. Sperious, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, "Giant Magnetoresistance in Soft Ferromagnetic Multilayers," phys. Rev. B, 43, pp1297-1300, 1991.
- [5] M. Madison, T. Arnoldussen, M. Pinarbasi, M. Parker, M. Doerner, X. Bian, C. K. Tang, M. Mirzamaani, S. Yuan, J. Li, L. Lauchlan, L. Ingall, J. Raniseski, P. Fang, D. Margulies, E. Marinero, K. Rubin, K. Takano, E. Fullerton, D. Weller, A. Moser and M. E. Best: Digest of InterMag 2000, Toronto, 2000, HT-01.