Compensation for readback resolution of dual-layer magnetic recording

斎藤仁 村岡裕明

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

Jin Saito Hiroaki Muraoka

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

Recently dual-layer MAMR recording is proposed to independently write data in each layer. Readback method by ferromagnetic resonance has been discussed to be available. In this study, a more convenient reading means with a regular shielded MR head was investigated for dual-layer recording based on calculations by reciprocity theorem. We propose the additional bottommost third layer, or assist layer, to equalize the response. Some calculations show that the three-layer recording is effective to apply the half-bit shift parallel recording method, which we reported in the past.

Key words: dual-layer recording, shielded MR head reading, reciprocity

1. はじめに

二層積層記録は積層化により記録面密度を倍増できる魅力的な方 法であるが、記録ヘッドの磁界分布や記録媒体の保磁力分散など のためそれぞれの記録層に正確に分離して情報を書き込むこと自 体が困難であった.近年 MAMR の応用により二層積層記録層に独 立に情報を書き込む可能性が明らかにされ[1]、精力的な検討が行 われている.再生についても強磁性共鳴を用いた手法が提案され ている[1].ここではより簡便に通常の再生ヘッドを用いて積層記 録磁化を分離復号する可能性を検討したが、二層からの磁界が重 畳された再生応答からそれぞれの情報を判別することが課題とな る.本論文では、上下の積層記録層のスペーシングの差異によるロ ールオフ特性の補正について相反定理を用いて検討した.その結 果、記録層を3層化することで上下層のロールオフ特性を改善し、 すでに提案している半ビットずらした並列記録方式を適用できる 可能性を見出した.

2. 計算方法と二層分離再生

トラック幅は十分に広いと仮定して2次元の再生感度関数[2]を 用いて相反定理により再生応答を求めた. 孤立磁化転移は



Fig. 1 Sensitivity functions of shielded MR heads for various magnetic spacing.

Transition width, b	5 nm
Magnetic spacing, d	1-15 nm
MR sensor thickness	2 nm
Shield to shield gap, g	20 nm
Top layer thickness, δ1	3 nm
Bottom layer thickness, δ_2	8 nm
Assist layer thickness, δ_3	5 nm
One-sided shield to sensor gap, t	9 nm
Distance between head surface and soft magnetic underlayer	L





で作成した. nb が転移中央に引いた接線が正負の飽和値をよぎる 磁化転移幅である. Fig. 1 にこの再生感度関数を示す. 磁気スペー シングを1 nm から15 nm まで5 nm 間隔で変化させた. スペーシ ングが大きいほど半値幅が広がり再生感度が低下していることが わかる. 2 層再生を行うときにスペーシングロスの差により1 層目 と 2 層目の出力特性に差がある可能性が示唆される. このような 場合,後述の復号方法では各層の振幅を分離して検出できないた め,両者のロールオフ特性を等しくすることが必要である. このた

Table 1. Typical values for the calculation parameters.



Fig. 3 Low density readback waveform for the top and bottom layer shifted by a half bit length.



Fig. 4 Isolated readback waveform for bit "1" for various spacing. Bit length is 25 nm.

めにはヘッドに近い1層目の膜厚を薄くすることで相対的に2層 目の出力を大きくして孤立振幅を補正できるが、今度はスペーシ ングロスの差のため両層の再生分解能が異なりロールオフ特性に 差異が生じる.一方、Fig.2は今回提案するモデルであり2層目の 下に1層目と同じ記録がされている層を補助層として設けて出力 とロールオフを調節する.1層目と補助層の出力を合わせることに より1層目を薄くしても出力を大きくできる.これは1層目と補 助層の平均的なスペーシングロスを2層目に合わせると理解して もよい.

ここで2層同時読み取りを行う際、一般には1層目の記録磁化 が上向きで二層目が下向きの場合と1層目が下向きで2層目が上 向きの場合のいずれも出力が打ち消す方向なので判別不能となる。 Fig. 3の上部に示すように記録転移を半ビットずらして記録し、 1ビット中に2回サンプリングすれば、1層目の最初のビットをあ らかじめ決めておくことで、その後のビットも帰納法的に判別す ることができる。しかしこの方式を用いるためには上層と下層の



Fig. 5 Roll-off characteristics of thick upper and lower layer (5 nm) in dual-layer recording. Shield gap and magnetic spacing are 20 nm and 5 nm, respectively.



Fig. 6 Roll-off characteristics of thin (1 nm) dual-layer recording. Shield gap and magnetic spacing are 20 nm and 5nm, respectively.



Fig. 7 Roll-off characteristics in the case of using an assist layer.

出力が等しいことが前提となっており、とくに高記録密度時においてスペーシングロスによる出力差が生じると復号できなくなる.

3. 結果

3.1 孤立転移波形



layer recording (100kBPI).



Fig. 9 High-density readback waveform of the dual-layer recording (1500 kBPI).

Fig. 4 は再生感度関数から相反定理を用いて得られるビット長 25 nm の磁化"1"に対する孤立再生波形である.わずか5 nm のス ペーシングロスでも再生波形のピーク振幅は大きく低下する.ま た高い記録密度でも振幅の最大値が低下する. 各記録密度におけ る振幅の最大値を示したロールオフでは記録密度の増加につれ再 生振幅の最大値が小さくなるのを見ることができる.

3.2 ロールオフ

2 層記録層のロールオフ特性の計算を行った. Fig. 5 は上層 5 nm, 下層5nm時のロールオフである. 上層5nm分だけ下層は 再生ヘッドからの距離が離れるのでスペーシングロスが生じてし まい、下層の振幅が 500 kBPI 付近から低下していることがわか る. Fig.6は上層1nm, 下層1nm 時のロールオフである. 上層 と下層の距離の差が少ないため高記録密度時にも振幅の差がほと んどみられない. しかしこの場合記録層が薄すぎるため十分な再 生出力を得ることができない. これらに対して Fig. 2 で示した補 助層モデルでの計算を行った. 3層それぞれの厚さによってロー ルオフ特性が変化するので、3層の厚さについて様々なパターンを 検討した結果、上層記録層の薄膜化とロールオフバランスがとれ る組み合わせの一例は上層3nm,下層8nm,補助層5nmであ った. Fig.7 はその際のロールオフ特性である. 上層と補助層の合



Fig. 10 Sampled-amplitude histogram of the dual-layer recording in low density (upper) and high density (lower). (Each layer thickness and SNR are 5 nm and 25 dB.)



Fig. 11 Sampled-amplitude histogram of the dual-layer recording. (layer thickness=1nm, SNR=25 dB)

成ロールオフと下層の再生出力を近づけることができた. このこ とにより高記録密度においても振幅の差が抑えられかつ、十分な 再生出力も得ることができるため誤りの少ない復号が期待できる.

3.3 連続記録

Fig.8は上層と下層がそれぞれ 5nm で 100kBPI の時の連続波 形である. 十分低い線密度ではビット検出点で見た場合磁化が上 下に同じ向きと互いに打ち消し合う場合の3値をとることがわか る. 一方 Fig.9 は層の厚さは同様で1500 kBPI の時の連続波形で ある. 高記録密度になると各層のロールオフが大きく異なるため 符号間干渉の影響で検出点のレベルが複雑な分布になり大きなば らつきが生じており、この影響により両者の加算信号からの復号 が困難となることが考えられる.本来,符号間干渉の影響を少なく するために PRML 方式等での復号の検討が必要であるが、 簡便の ためビットの中心点のばらつきを見るヒストグラムの計算を行っ た.

3.4 検出点振幅ヒストグラム



Fig. 12 Sampled-amplitude histogram of the layered medium with an assist layer. SNR is 25 dB. Linear densities are 100 kBPI (upper) and 1500 kBPI (lower).



Fig. 13 Equalized isolated waveform of the top layer output in dual-layer recording. Each layer thickness is 5 nm.



Fig. 14 Equalized isolated waveform of the bottom layer output with the tap-gains obtained for top layer equalization.

Fig. 10 は上層と下層それぞれ 5 nm 厚の合計出力波形の検出点 振幅でのサンプリング値のヒストグラムである. 100 kBPI の時は 振幅の差がほぼないため 3 値をとり復号可能であるが 1500 kBPI の時は上述のようにロールオフ特性の違いによる複雑な符号間干 渉による振幅差の影響でヒストグラムに大きなバラつきがみられ 復号が困難となっている.



Fig. 15 Equalized isolated waveform of the readback output from the bottom layer and the assist layer.



Fig. 16 Equalized waveform for high density (1500 kBPI) using an assist layer.



Fig. 17 Histogram of sampled readback amplitude of the bottom layer and the assist layer. (1500 kBPI, SNR=25 dB)

また, Fig. 11 は両層厚とも 1 nm のときのヒストグラムを示した ものである. 100 kBPI の時は 5 nm の時と同様に振幅の差がほと んどないため 3 値となり復号が可能である. しかし再生出力が小 さいためノイズの影響を大きく受けヒストグラムの幅が大きくな っている. 一方 1500 kBPI の時にはロールオフの差が小さいため ばらつきが抑えられることが分かる.

Fig. 12 は補助層を用いた際の検出点振幅値のヒストグラムであ る. 100 kBPI の時は2 層だけのときと同様に3 値であり、ノイ ズの影響も小さい. 1500 kBPI では両層の出力がほぼ等しくなっ ているため2 層のヒストグラムと比較しても Fig. 10 に比べてバ ラつきが小さくなっていることがわかる. このことより補助層を 用いることでヒストグラムの改善が見込めることがわかった.

3.5 波形等化

PRML 方式を用いた復号にむけてトランスバーサルフィルタで の等化シミュレーションを行った.上層厚と下層厚が各々5nmの 場合で上層の再生波形を元にタップ係数を設定して等化した場合 Fig. 13 のように概ね等化できている一方, Fig. 14 のように下層は スペーシングロスによる波形の違いにより等化誤差が大きい.そ れに対して補助層を用いた場合上層+補助層の再生波形をもとに タップ係数を設定し等化した場合, Fig. 15 のように下層の等化誤 差も小さくできた.実際にランダム入力符号で生成したビット列 に対する 1500kBPIの連続再生波形を等化したものを Fig. 16 に, この等化波形の検出点サンプリング値をヒストグラムに表したも のを Fig. 17 に示す.ヒストグラムが大きく3 値に分離しているこ とから復号可能であると考えられる.以上より補助層を用いて波 形等価を行うことにより通常の MR 再生ヘッドによる二層積層記 録の復号の可能性を示すことができた.

4. 結論

積層二層記録において、通常のMR ヘッド再生によって上下層 を分離して復号することを試みた.二層の記録ビットを半ビット 長ずつずらして再生することで,二層で別々の信号検出を可能に したが、スペーシングロスにより上層と下層の応答特性が異なる ことが問題となった.そこで補助層を下層の下に設けて三層構造 として、薄膜化した上層と補助層の合計再生出力とし、下層を厚 くしてもう一つの再生出力とすることでロールオフ特性を等しく できた.また同じ等化器によって上下層の等化が可能となり、復 号可能性の見通しを得ることができた.

References

1)H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, T. Kanao, K. Mizushima, and R. Sato, *Phys. Rev.* **2016**.

2)H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura, *IEEE Trans. Magn.*, **35, 5, 2235, 1999.**

Received Oct. 16, 2017; Accepted Jan. 18, 2018