高周波における磁気ヘッドの評価解析技術

Analysis of a Magnetic Recording Head in the High-Frequency Region

大森広之, 寺田尚司, 菅原伸浩, 山元哲也

ソニー(株)中央研究所, 横浜市保土ヶ谷区新桜ヶ丘 2-1-1 (〒240-0036)

H. Ohmori, S. Terada, N. Sugawara, and T. Yamamoto

Sony Corporation Research Center, 2-1-1, Shinsakuragaoka, Hodogaya-ku, Yokohama 240-0036

(1998年10月13日受理, 1999年1月21日採録)

Observation of the recording gap field in the high-frequency region is important for developing high-frequency operable recording head. We used Kerr microscopy and MFM for high-frequency observation of recording head. The apparatuses are easy to operate but the data are not quantitative. However, complementary use of these methods provides important information for developing recording heads.

Key words: recording head, high-frequency, Kerr microscope, magnetic force microscope

1. はじめに

近年, ハードディスクの高転送速度化に伴って, 記録ヘッドには高周波での動作が求められている。記録ヘッドを高周波で動作させるには, 磁気ヘッドの低インダクタンス化や低損失化が必要であり, 記録ヘッドのコアサイズの小型化や高比抵抗のコア材料を用いてこれらを実現する研究がされている¹⁾²⁾。記録過程で高周波の影響が顕著になるのは, 非線形遷移シフトやオーバーライト特性においてであるが, これらは記録媒体の磁気特性やスペーシングなどの影響を受けやすく, 高周波の影響のみを分離するのは難しい。記録ヘッドの高周波動作を測定するには, 実際に記録ギャップから発生する磁場を観測するのが適当であり, 電子線トモグラフィー等の方法も研究されている³⁾。しかし電子線を用いた測定は定量的なデータが得られる反面装置が大がかりになり誰でも簡単に利用できるものではない。そこで, 定性的ではあるが, 測定が容易で直観的な観測ができるカー効果顕微鏡⁴⁾と磁気力顕微鏡(MFM)⁵⁾を用いて記録ヘッドの高周波動作の測定ができるか試みた。

2. 実験方法

2.1 高周波カー効果顕微鏡装置

測定に用いたカー効果顕微鏡の全体構成と光学系の構成を Fig.1 に示す。光源は波長 635nm, 出力 10mW の半導体レーザーを用い, ポーラライザ, 対物レンズを通して被測定試料表面に合焦させ, 反射光を 1/2 波長板, ピンホール, 偏光ビームスプリッタを経由して二つの4分割フォトディテクタで検出する。検出された信号に演算を行い, X, Y, Z 各成分の磁化変化を

求める。画像化はXYステージを走査して行う。走査の最小単位は $0.1\mu\text{m}$ である。フォトディテクタには APD を用い, 電気回路の帯域は 200MHz であるが, 100MHz 以上は記録ヘッドの駆動電流による信号の干渉で, コントラストの低下が起こるため, 明瞭な像が得られるのは 100MHz までである。観測像の分解能は $\text{NA}=0.8$ の対物レンズを用いた場合に約 $0.5\mu\text{m}$ で, 磁気ヘッドのコアを観測するには十分であるが, 最新のハードディスク用記録ヘッドはトラック幅が $1\mu\text{m}$ 前後と非常に狭く, ABS 面からの測定には解像度が十分ではない。そこで, ABS 面からの観察には SIL(Solid Immersion Lens)⁶⁾を用いた測定を試みた。本研究で用いた SIL は直径 1.5mm, 屈折率 1.52 である。これにより, 約 2.3 倍の解像度の向上が見込める。さらに解像度を

(a) Sketch of the Kerr microscope

(b) Block diagram of the optical system

Fig. 1 Schematic view of the Kerr microscope.

上げるには屈折率の大きなものを用いばよいが、本研究では SIL の固定及びヘッドとのスペーシングの影響を低減するために、両者の間に屈折率約 1.5 の Immersion Oil を薄く塗布している。同程度の屈折率の SIL を用いた、SIL がある場合とない場合の像の違いを Fig.2 に示す。測定に使用したヘッドはトラック幅 $5\mu\text{m}$ のヘッドであるが、SIL を用いると分解能が上がり、像も拡大されるため記録ポールが明瞭に観察されるようになる。

2. 2 磁気力顕微鏡による観察

磁気ヘッドに dc 電流を流し、MFM で観察する方法は一般的に用いられている⁷⁾が、高周波電流を流して測定する方法はあまり知られていない。これは、交流磁場では探針の磁化やそれに働く力などがより複雑になるためと思われる。そこで、ヘッドを高周波電流で駆動したときの MFM 探針が受ける力を単純化したモデルで考察してみる。実際の探針は大きさがあり、探針の場所によって受ける磁場の強さも異なり、探針の磁気特性も等方的とは限らないが⁸⁾、ここでは探針の大きさがなく等方的な磁化を持つものとして考えてみる。はじめに、軟磁性の探針を用いた場合を考える。探針の印加磁場に対する磁化の応答を Fig.3(a)のように仮定する。ヘッドから発生する磁場の時間変化は Fig.3(b)のようになるので、探針の磁化状態は Fig.3(c)のようになる。探針にかかる力は磁場と磁化の積に比例するので、Fig.3(d)のような力が発生することになる。この測定では探針の振動数に対して磁場変化の周波数ははるかに高いので、時間平均された力が観測される。軟磁性探針の場合、磁場の弱いところで2次曲線になり、磁場が強くなるとほぼ直線になる。次に、硬質磁性の探針を用いた場合を考える。探針の磁気特性を Fig.4(a)のように仮定すると、ヘッドから発生する磁場 (Fig.4(b)) に対して Fig.4(c)のように磁化し、探針に生じる力は Fig.4(d)になる。硬質磁性探針の場合、ヒステリシスによる応答の遅れがあり、引力と斥力が交互に働き、観測される力は小さくなる。硬質磁性探針にかかる力は、磁場が小さい領域ではヒステリシスによる応答の遅れが小さいので、磁場増加に対して増加するが、磁場強度が保磁力近傍になると位相のずれが大きくなり、磁気力が減少し、さらに磁場を強くすると再び増加する。この振る舞いを模式的に示すと Fig.5 のようになる。軟磁性探針の場合ある程度の磁場以上で磁場に対して直線的になるので、飽和により磁気ヘッドの磁場分布が変わらない範囲では、相対的な磁

Fig. 2 Image of a write pole observed without SIL (a) and with SIL (b).

Fig. 3 Schematic illustration of the magnetic force when a soft magnetic probe is used.

Fig. 4 Schematic illustration of the magnetic force when a hard magnetic probe is used.

Fig. 5 Schematic illustration of the external field dependence of the magnetic force.

Fig. 6 MFM images of the write gap observed by using a soft (a) and hard (b) magnetic probes at a frequency of 1 MHz.

場強度の測定に使用でき、硬質磁性探針の場合は、特定の磁場強度で特異な振る舞いをするので、等磁場曲線を描くことが出来る。軟磁性探針と硬質磁性探針を用いて記録ヘッドの観察を行った結果を Fig.6 に示す。測定は位相モードでリフト高さ 50nm、周波数は 1MHz で、駆動電流を変えて測定を行っている。探針はいずれも市販のものを用いている。軟磁性探針では記録電流が増加するとコントラストが徐々に強くなっていくが、硬質磁性探針では線状にコントラストの強い領域が見られる。測定に用いた探針の磁気特性が未知なので、定量評価は出来ないが、相対比較に用いることは可能である。

3. 実験結果と考察

次に、構造及び材料の異なるヘッドを測定した結果を示す。測定に用いたヘッドは、ギャップ上下に $0.5\mu\text{m}$ の Ni45Fe55 高飽和磁束密度膜を配置し、それ以外は $3.5\mu\text{m}$ の Ni80Fe20 パーマロイを用いた構造で、巻き数 10 の単層コイルでコイル空間の先端から後端間距離が約 $60\mu\text{m}$ の Head-A、コイルを二層にして磁路長を約半分にした Head-B、この Head-B の上コアをすべて Ni45Fe55 材料で構成した Head-C である。これらのヘッドのトラック幅は $1.2\mu\text{m}$ 、ギャップ長 $0.25\mu\text{m}$ である。短磁路化すると高周波での記録特性、たとえば NLTS(Non Linear Transition Shift)が改善される事が知られている¹⁾。Head-A は他の Head-B, Head-C とスライダ形状が異なり浮上特性が違いため、記録特性での比較ができないので、Head-B と Head-C で比較を行ってみた。Ni45Fe55 材料は飽和磁束密度、比抵抗ともに通常の Ni80Fe20 パーマロイよりも高いので²⁾、オーバーライトや NLTS の改善が期待できる。Head-B, Head-C でオーバーライト特性と NLTS をハードディスクテスターで測定した結果を Fig.7 に示す。測定は保磁力 2400Oe のディスクを用いて相対速度 12m/s で行った。オーバーライトは 8.33MHz の信号に 50MHz の信号を上書きして行った。NLTS の測定はクロック 6.66ns 、最短波長で 75MHz 相当の疑似ランダムパターンを書き、得られた周波数スペクトルからダイパルス応答を計算し、現れるエコーを観察する方法で行った³⁾。オーバーライトは Ni45Fe55 コアを用いた Head-C が良いが、電流に対する応答は Head-B よりも悪く、効率が低下していると思われる。NLTS は両者ともほとんど差がなく、 1ns の補正を行うと消失するので、NLTS 量は 15%である。NLTS はより高周波で差が現れる可能性があるが、装置の限界でこれ以上の周波数での測定はできなかった。次に、軟磁性探針を用いてこれらのヘッドを MFM の位相モードで測定した。MFM の測定ではヘッドに電流を流さなくてもコアの磁性材料との間に弱い引力が働くので、これを差し引くためギャップ位置での探針の振動位相とギャップから離れ磁場強度が十分弱まった部分の位相との差を指標に用いた。この位相差を駆動電流に対してプロットした結果を Fig.8 に示す。駆動電流は電流プローブを用いてモニターしているので、ハードディスクテスターで測定する場合に比べ、ヘッドインダク

Fig. 7 Overwrite property (a) and NLTS condition observed from the extracted dipulse response with and without pre-compensation (b) in Head-B and Head-C.

Fig. 8 Phase shift value at a recording gap position measured by MFM at 1 MHz, 10 MHz and 100 MHz.

Fig. 9 Surface contrast (a), polar Kerr amplitude image (b) and phase image (c) of a yoke in Head-C at a frequency of 20 MHz.

Fig. 10 Polar Kerr amplitude image of the gap regions in Head-B and Head-C at 10 MHz and 50 MHz.

ダンスによる影響は小さくなる。測定周波数は 1MHz, 10MHz, 100MHz で行った。磁路が長い Head-A では 100MHz での記録電流に対する応答が悪く、高周波動作に問題があることが解る。Head-B と Head-C を比較すると、Head-C の駆動電流に対する立ち上がりが悪く、オーバーライトの傾向と一致している。また、Head-C は Head-B に比べ高周波での強度低下が大きく、オーバーライト特性にコア材料を高比抵抗化した効果が見られない。これは Ni45Fe55 コア材料の高周波透磁率が渦電流以外の影響で低下しているためで、磁区構造が関係している可能性が大きい。そこで、この Head-C のコアを Al_2O_3 越しにカー顕微鏡で観察してみた。測定は極カーモードで周波数 20MHz, 駆動電流 40mA_{p-p} で行った。測定したコントラスト像(a), 振幅像(b), 位相像(c)を Fig.9 に示すが、特に位相像においてコアの傾斜部と平坦部の境で位相の反転部分が見られる。これはカ

ー顕微鏡で観測できない傾斜部分の磁区の乱れが平坦部分に影響していると思われる。また、Head-B と Head-C を ABS 面から観察した結果を Fig.10 に示す。測定は極カーモードで周波数 10MHz と 50MHz, 駆動電流 40mA_{p-p} で行った。Head-C では Head-B には見られないトラック幅方向でのコントラストの分布が見られ、トラック端部で強度が大きくなっている。Head-A,B 共にギャップ付近の材料は同じであるので、このトラック幅方向の強度分布は傾斜部で乱れた磁区の影響がギャップ近傍にまで及んでいるために起こっていると思われる。また、Head-C では 10MHz から 50MHz になったときのコントラスト低下大きく、MFM の測定結果と同様の傾向が見られた。

4. 結論と今後の課題

高周波で駆動した磁気ヘッドを MFM で測定すると、記録再生特性の評価では難しい高周波での記録ヘッドの挙動を比較的簡単に測定できる。MFM の測定と高周波カー顕微鏡の測定を相補的に用いることで、磁区構造なども含め磁気ヘッドの高周波動作の理解に役立つことが確認できた。しかし、MFM は探針の磁化状態が変化しないような測定でも定量化が難しく、高周波測定ではさらに複雑になるため、今回は定性的議論に限ったが、より多くの情報を得るには定量化が必要である。定量化には最低限探針の磁気特性の把握が必要であるが、磁気ヘッドと探針の相互作用などの複雑な要因もあり、完全な定量化にはシミュレーションによる解析が不可欠と考えられる。また、現実の記録媒体に近い磁気特性を持つ探針を用いれば、実際の記録動作に近い状態で測定できるため、高周波での記録現象の理解に役立つと考えられる。

文 献

- 1) M. Takagishi, K. Komaki, and F. Hikami: *IEEE Trans. Magn.*, 33, pp. 2821 (1997).
- 2) Neil Robertson, H. L. Hu, and Ching Tsang: *IEEE Trans. Magn.*, 33, pp. 2818 (1997).
- 3) S. Nomizu, J. Yin, Y. Nakano, K. Ogawa, and J. Matsuda: *IEEE Trans. Magn.*, 32, pp. 4926 (1996).
- 3) C. D. Write, W. W. Clegg, N. A. E. Heyes, and A. Boudjemlin, *J. Magn. Soc. Jpn.*: 19, Supplement No. S1, pp.117 (1995).
- 4) D. Ruger, H. J. Mamin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Sten, and I. McFadyen: *J. Appl. Phys.*, 68, 1169 (1990).
- 5) B. D. Terris *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, 65, 388 (1994).
- 6) S. H. Lios, S. S. Malhotra, J. Moreland, and P. F. Hopkins: *Appl. Phys. Lett.* 70, pp.135 (1997).
- 7) 石井 生, 金井 靖, 末岡和久, 武笠幸一, 日本応用磁気学会誌 21, 409 (1997).
- 9) D. Palmer, P. Ziperovich, R. Wood, and T. Howell: *IEEE Trans. Magn.*, 23, pp. 2377 (1987).