磁気光学プローブによる磁気ヘッドの高周波電流の非破壊・非侵襲計測

In-Situ Magneto-optical Probing for High-Frequency Current in Magnetic Heads

池亀 弘・中本一広・西山延昌*・津吉敏明*・青井 基*

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

*日立製作所ストレージ事業部, 小田原市国府津 2880 (〒256-8510)

H. Ikekame, K. Nakamoto, N. Nishiyama*, T. Tsuyoshi*, and H. Aoi*

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185-8601

*Data Storage Systems Division, Hitachi, Ltd., 2880 Kouzu, Odawara, 256-8510

We developed a magneto-optical probe system for measurement of high-frequency current in magnetic heads. The key technique of the system is magneto-optical probing using a Bi-YIG field sensor. This technique enables nondestructive and noninvasive measurement of the device under test. The system bandwidth is more than 6 GHz. The insertion impedance is negligibly small for magnetic heads. The minimum detectable current is less than 0.3 mA peak-to-peak. Therefore we can perform precise measurements of current waveforms which correspond to real currents in hard disk drives.

Key words: magnetic head, high-frequency current, write current waveform, rise time, bandwidth, current probe, magneto-optical probe, Faraday effect, Bi-YIG

1. はじめに

磁気ディスク装置 (HDD) のデータレートは、線記録密度およびディスク回転数の増加に伴って、急速に高速化している。高いデータレートを実現するためには、記録アンプ・伝送線路・記録ヘッドからなる記録回路の高速性能、および記録ヘッドの電磁変換の高速性能が重要である。Fig. 1 は、日立のハイエンド HDD のデータレートと、このデータレートを実現するために必要となる記録電流立ち上り時間の年次推移を示したものである。近い将来、データレートは 1 Gbit/s に到達し、このときの記録電流立ち上り時間は 300 ps 程度になると予想される。このような高周波電流に対し、記録ヘッドの磁界応答¹⁾までも考慮した高周波記録技術を開発するためには、波形インテグリティを損なうことのない非破壊かつ電氣的に非侵襲な広帯域の計測技術が必須となる。

磁気ヘッドの記録電流波形計測には、従来からトランス型の電流プローブを使用しているが、高周波電流波形の計測には様々な問題が生じる。例えば、300 ps の立ち上りを 5 % の精度で計測するには計測器に 3.5 GHz の周波数帯域幅が必要となる²⁾が、現行の電流プローブは周波数帯域幅が 1.5 GHz 程度と狭いため、波形

一般に、計測した信号の立ち上り時間 (tr_{meas}) は、計測器自身の立ち上り時間 (tr_{inst}) の影響を受け、本来の信号の立ち上り時間 (tr_{sig}) より遅くなる。この関係は次式で表される。

$$tr_{meas}^2 = tr_{sig}^2 + tr_{inst}^2 \quad (1)$$

例えば、 $tr_{inst} = tr_{sig} / 3$ が成り立つ計測器を用いれば、5 % の精度 ($tr_{meas} / tr_{sig} = 1.05$) で計測できる。

また、一般に、立ち上り時間 (tr) と周波数帯域幅 (Bw) との関係は次式で表される。

$$tr \times Bw = 0.35 \quad (2)$$

が歪み、計測精度低下の要因となる。

また、電流プローブの実装の問題もあげられる。被計測回路 (DUT: Device Under Test) を加工し、リード線 (20 mm 程度) を付けて電流プローブを挿入するため、計測位置が制限されること、破壊計測であること、記録ヘッドに比し大きなインダクタンス (20 nH 程度) を付加する形となるため DUT を電氣的に侵襲すること等により波形のインテグリティを保つことができない。

このような問題を軽減する計測装置として、電気光学効果を応用した光プローブ (EO プローブ)²⁾が報告されている。EO プローブは、元来、モノリシック・マイクロ波集積回路 (MMIC) 等の内部の電圧波形を計測するための装置³⁾として知られている。文献 2 の計測装置は 3.5 GHz の周波数帯域幅を有すが、2 Ω 2 nH のインピーダンスを磁気ヘッドの伝送線路中に挿入する破壊計測である。

そこで、我々は、非破壊・非侵襲の広帯域計測を目的として、磁気光学効果を応用することとした。磁気光学結晶を磁界センサとして用いた光プローブは、マイクロ波回路の診断技術等に用いられている⁴⁾。また、磁気ヘッドの記録電流を磁気光学効果によって観察した報告もある⁵⁾。我々は、これらの研究例を踏まえ、HDD における立ち上り時間 200 ps 以下の記録電流波形の計測を対象とした磁気光学プローブを試作し、非破壊、非接触、非電気侵襲、高時間分解能 (周波数帯域幅 6 GHz 以上)、高感度 (最小検出電流 0.3 mA_{pp} 以下) の性能を達成した。

Fig. 1 Data rate and write current rise time trends.

2. 磁気光学プローブの構築

2.1 電流検出部

磁気光学プローブの電流検出部の構成を Fig. 2 に示す。磁気ヘッドの差動伝送線路 (TL) の上に磁気光学素子 (MOC) を近接し、被計測電流 (i) から発生した磁界 (H) を磁気光学素子面に対して垂直方向に印加させ、適当な偏光を入射して電流検出部を構成した。磁気光学素子には複屈折率の変化が生じるため、反射光の偏光状態が変化する⁶⁾。これを光強度変化として計測することで、被計測電流 (i) に比例した量を検出することができる。この配置における磁化と光の波動ベクトルとは平行であるから、極 Kerr 効果もしくは Faraday 効果を応用できる。

磁気光学素子には、研究用として一般に市販されている Bi-YIG バルク単結晶を用いた。Bi-YIG は使用した光の波長に対して透明であるため、誘電体全反射ミラー (DM) をその結晶底面にコーティングした。Bi-YIG を広帯域の磁界センサとして使用するために、Fig. 2 に示すように、永久磁石 (PM) を用いて Bi-YIG 結晶面に対して平行方向に 0.3 T 程度のバイアス磁界 (H_{bias}) を印加した。これは、バイアス磁界の方向に Bi-YIG の磁化を飽和させて単一磁区を形成し、光スポット内の磁壁移動を抑止するため、および Bi-YIG の強磁性共鳴周波数を高める⁵⁾ ためである。バイアス磁界強度は、磁気光学プローブの周波数帯域幅に大きく関係するので注意を要する。

2.2 光学素子

Fig. 3 に磁気光学プローブの光学素子の構成を模式的に示す。光源には、中心波長 1548 nm、半値幅 22.6 ps、ピーク出力 900 mW のパルス・レーザ・ダイオード (PLD) を用いた。PLD から出射した直線偏光は、光ファイバ (OF) を通過後、コリメートレンズ (Col. L) により平行光となる。この後、 $\lambda/4$ 板 (QWP1) および $\lambda/2$ 板 (HWP1) を調整することによって、ここまでの光路で歪んだ偏光を元の直線偏光に整形するとともに、その主軸を偏光ビームスプリッタ (PBS1) に合わせる。直線偏光は、PBS1 を通過後、Faraday 回転子 (FR) により主軸が 45 deg 回転するが、

Fig. 2 Schematic illustration of Bi-YIG field sensor, permanent magnet, polarized light, and DUT.

HWP2 によって再び元の主軸に戻され、PBS2 の主軸と一致して通過する。QWP2 の主軸は、この直線偏光から 22.5 deg 回転しているため、QWP2 の出射光は偏光角 22.5 deg の楕円偏光となる。その後、この偏光は対物レンズ (OL) を通して磁気光学素子 (MOC) に入射される。結晶底面の誘電体ミラー (Die. M) によって反射されて戻ってきた偏光は、結晶の往復光路で受けた Faraday 効果によって偏光角が θ_F だけ変化している。その後、QWP2 透過でさらに 22.5 deg 回転した $45 + \theta_F$ (deg) の直線偏光となる。この後、PBS2 と PBS1 によって、この偏光をそれぞれ p 波と s 波に分離した後、集光レンズ (Con. L2) および (Con. L1) を経て、フォトダイオード (PD2) および (PD1) にて電気信号に変換し、差動増幅している。

PBS1, FR, HWP2, および PBS2 の 4 つのエレメントはアイソレータを形成しており、PBS2 を通過してきた戻り光は HWP2 と FR によって主軸が 90 deg 回転する。QWP2 は、p 波と s 波のパワーを同じにするため、つまり差動増幅の信号が最大かつ同相成分 (ノイズ) が最小になるように調整するものである。

2.3 タイムベース

タイムベースにはシーケンシャル・サンプリング方式を用い、高い時間分解能を実現した。磁気光学プローブのシーケンシャル・サンプリングに関するブロック・ダイアグラムを Fig. 4 に示す。3 つの発信機を用意し、それぞれオシロスコープのスウィープトリガ (周波数 Δf)、サンプリング光を発生させるパルス・レーザ・ドライバのトリガ (周波数 f_D)、DUT ドライバのトリガ (周波数 f_I) に使用している。発信機は相互に PLL (Phase-Locked Loop) で位相同期し、各々の周波数を次式が成り立つように設定する。

$$f_I = n \times f_D + \Delta f \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

これにより、時間分解能に相当する微小時間 $\Delta t (= 1/f_D - 1/f_I)$ の整数倍ずつ位相を遅延していき、入力波形からデータをサンプリングし、何周期分かのサンプリング・データを収集して計測データを表示する。この方式はナイキスト周波数に関係のない高周波信号までサンプリングすることができ、広帯域 (高時間分解能) を実現できる。試作した磁気光学プローブの時間分解能は 10 ps である。

Fig. 3 Schematic construction of optical elements in magneto-optical probe.

Fig. 4 Block diagram of sequential sampling technique of magneto-optical probe.

3. 装置性能

3.1 周波数帯域幅

磁気光学プローブの時間分解能（周波数帯域幅）は、主にレーザーの光パルス幅、電気回路のジッタ、磁気光学素子の磁化応答により決定される。このうち、光パルス幅と電気回路ジッタで決まる帯域制限は 10.0 GHz であった。

磁気光学プローブ全体の周波数帯域幅は、発信機で発生した正弦波信号をストリップ・ラインに入力し、線路に流れる電流を磁気光学プローブで計測することによって評価した。この結果を Fig. 5 に示す。光スポット・永久磁石間の距離 d を小さくして、磁気光学素子のバイアス磁界強度を大きくすることで周波数帯域幅を広くとることができる。試作した磁気光学プローブの周波数帯域幅は、 $d = 2.5 \text{ mm}$ ($H_{\text{bias}} = 0.3 \text{ T}$) のときに 6.0 GHz の周波数帯域幅を得ている。これにより、例えば、175 ps の電流立ち上りを 5% の精度で計測することが可能となった。

Bi-YIG の応答時間については、強磁場さえ印加することができれば強磁性共鳴周波数を 82.3 GHz まで高めることができると報告されている⁷⁾。

3.2 磁気光学素子の電気侵襲性

磁気光学素子の DUT への電気侵襲性について、電流プローブを用いた波形計測により評価した。試料には HDD 実機の記録/再生 (R/W) アンプ・伝送線路・磁気ヘッドを用いた。伝送線路導体のカバー（ポリイミド樹脂）上へ磁気光学素子を接触または非接触させたところ、記録電流波形の変化は全く認められなかった。磁気光学素子の近接による DUT の電気特性の変化は極めて小さく、非侵襲計測が実現できている。

3.3 最小検出電流

磁気光学プローブのノイズは主に光検出器のショット・ノイズ（白色の周波数スペクトル）であるため、計測データの加算平均処理を行うことによって、容易に微小電流を検出することが可能となる。

磁気光学プローブで計測した電流波形の拡大部分を Fig. 6 に示す。ノイズの振幅から考慮して、磁気光学プローブが検出可能な最小の電流値は 0.3 mApp 程度であることが判る。また、局所的

Fig. 5 Frequency response of magneto-optical probe. The 'd' denotes the distance between the beam spot and the permanent magnet.

Fig. 6 Enlargement of current waveform measured by magneto-optical probe. The minimum detectable current is less than 0.3 mA peak-to-peak.

には、さらに小さなノイズ振幅を示しており、0.1 mApp 程度の微小電流をも検出できる可能性を示している。

HDD においては、記録系伝送線路を流れる高速反転電流が再生系伝送線路を介して再生素子にダメージを与える現象（ライト・リード線路間カップリング）⁸⁾ が立ち上がり時間の高速化にともない顕著となっているため、このような磁気光学プローブによる非破壊・非侵襲の微小電流計測は非常に有効な計測手段となり得る。

3.4 電流プローブの電気侵襲性

電流プローブの DUT への電気侵襲性について、磁気光学プローブを用いた波形計測により評価した。試料には HDD 実機の R/W アンプ・伝送線路・磁気ヘッドを用い、磁気ヘッド近傍の伝送線路に電流プローブを挿入加工したときと、無加工のときの記録電流波形を磁気光学プローブにて計測比較した。結果を Fig. 7 に示す。電流プローブの挿入により、電流立ち上がり時間は 100 ps 程度、ピーク到達時間は 150 ps 程度、オーバーシュート整定時間に至っては 300 ps 程度増加することが判った。この結果より、磁気ヘッドの記録電流計測には、磁気光学プローブの非破壊かつ電氣的に非侵襲な計測技術が不可欠であることが示された。

Fig. 7 Write current waveforms measured by magneto-optical (MO) probe. The load is the magnetic head with/without current probe.

4. まとめ

磁気ヘッドの高周波電流を精度高く計測することを目的として、電流検出部に Bi-YIG の磁気光学効果を応用した磁気光学プローブを試作した。この磁気光学プローブは、非破壊、非接触、非電気侵襲、周波数帯域幅 6.0 GHz 以上 (175 ps の立ち上りを 5% の

精度で計測可能)、最小検出電流 0.3 mApp 以下の性能を実現した。磁気光学プローブの高精度な電流波形計測により、HDD 実機相当の電流波形を得ることが可能となった。磁気光学プローブは、記録ヘッドの電磁変換応答までも考慮した総合的な高周波記録技術の開発に強力なツールとなり得る。

文 献

- 1) K. Nakamura, H. Suzuki, H. Takano: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 1193 (2000).
- 2) H. Sekiguchi, S. Hama, S. Wakana: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 1142 (2000).
- 3) H. Takahashi, S. Aoshima, and Y. Tsuchiya: Proc. IEEE IMTC/94, hamamatsu, 1994, p. 1484 (1994).
- 4) S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, E. Yamazaki, M. Kishi, and M. Tsuchiya: Technical Digest of IEEE MTT-S IMS2000, Boston, 2000, p. 1615 (2000).
- 5) M. R. Freeman and J. F. Smyth: *J. Appl. Phys.*, **79**, 5898 (1996).
- 6) 佐藤勝昭: 光と磁気, p.33 (朝倉書店, 東京, 1988).
- 7) A. Y. Elezzabi and M. R. Freeman: *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 3546 (1996).
- 8) K. B. Klaassen and J. C. van Peppen: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 619 (2001).

2002 年 10 月 7 日受理, 2002 年 11 月 20 日採録