Measurement of Magnetic-field Distribution Using Pulsed Laser with Magneto-optical Effect

J. Takahashi, S. Hashi, and K. Ishiyama

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

Electromagnetic interference (EMI) is a serious problem in integrated circuits. The ability to accurately measure low-intensity electromagnetic fields is necessary to overcome this problem. We developed in a previous study a system to make magneto-optical measurements that use short laser pulses and a stroboscopic method to measure magnetic-field waveforms. In this study, we considered the spatial resolution of the system and measured the magnetic field distribution around magnetic heads. The overall results suggest that the system of measurement is capable of measuring EMI if we use a thinner garnet and a higher power laser.

Key words: magneto-optical effect, electromagnetic compatibility, magnetic field measurement

パルスレーザを利用した磁気光学効果による磁界分布計測

高橋純也・栢修一郎・石山和志

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

1. はじめに

近年, 集積回路の高密度化によって伝送線路や電子部品間の間隔が狭くなっており, さらに低消費電力化を目指した低電圧駆動により, 漏洩電磁波等の EMI (Electromagnetic interference) による影響を受けやすくなるため, 通信の阻害や誤作動を引き起こす問題が懸念されている. この問題を解決するために, 集積回路から発生する漏洩電磁波を低減・防止する必要がある, そのために微弱な近傍磁界を正確に測定する技術が求められている.

一般的な近傍磁界測定方法としては, シールドコイルのような金属プローブを用いた方法¹⁾²⁾が挙げられる. しかし, 金属製のプローブは本来の磁界分布を乱してしまう³⁾. そこで, 電磁波の状態を乱さずに測定する方法として磁気光学効果を用いた低侵襲な測定方法⁴⁾が提案されているが, 交流磁界の位相情報を含んだ測定はできなかった. この問題を解決するため, 筆者らはこれまでに磁気光学効果とパルスレーザを用いたストロボ法により, 1 MHz – 1 GHz の位相を含んだ磁界波形の測定を行い⁵⁾, マイクロストリップ線路から発生する微弱な磁界が測定できることを示した⁶⁾. しかしながら, 測定磁界の空間分解能については議論していなかったため, 本報告では本システムの空間分解能について検討した. そして, 本システムの空間分解能を評価するため, 微小な磁界発生源であるハードディスクの磁気ヘッド周辺の磁界分布を測定した.

2. 計測方法

2.1 測定システム

Fig. 1 に本研究における磁界測定装置の構成を示す. 磁界検出には, GGG 基板上に面方位 (110) で $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ を液層エピタキシー (LPE) 法により成

膜した厚さ 1.07 μm の面内方向に異方性を持つ磁性ガーネットを使用した. 光の減衰量を低減し, 効果的に磁気光学効果を得るため, 磁性ガーネット上には厚さ約 500 nm の Au の反射膜をコーティングした. 測定対象近傍に磁性ガーネットを配置してレーザを照射すると, レーザがガーネットを透過した際に磁気光学効果により偏光状態が変化する. この変化はガーネットに印加されている磁界強度に依存するため, 偏光状態を観察することで磁界強度の測定が可能である. レーザは対物レンズを通して集光しており, ガーネットに対して垂直に入射しているため, ガーネットに対して垂直方向の磁界成分を測定できる. 本報告では, 周波数帯域が DC ~ 100 kHz の差動ディテクタを用い, 差動検出法により偏光面の回転を検出した. また, 使用したレーザは, 外部トリガにより発振するパルス半導体レーザであり, 波長は 670 nm, 1 MHz 発振時の平均時間出力は 10.5 μW , パルス幅は 32 ps である.

本システムでは Fig. 2 に示すようにストロボ法を用いて磁界測定を行うため, レーザと発生磁界を同期する必要がある.

Fig. 1 Schematic structure of measurement system.

ある．そのため，シグナルジェネレータからはパルスレーザへのトリガ信号，磁界を発生させるための測定対象への印加信号，ロックインアンプへの参照信号の計 3 つの同期した信号を出力し，測定系全体を同期させている．これにより，磁界の周波数がレーザの発振周波数の整数倍の場合には，交流磁界の特定位相でのみレーザが発光するため，任意の位相の磁界強度を測定することができる．また，Fig. 2 (b)のようにレーザと磁界の位相をずらすことで異なる位相の磁界強度を測定することができる．これを連続的に繰り返すことで磁界の強度，周波数，位相情報の測定が可能となる．

集積回路から発生する磁界は非常に微弱なため，EMI 測定技術には高い感度が要求される．しかし，磁気光学効果を利用した磁界測定法の場合，光電変換を行うために感度が他の測定法と比べて劣ってしまう．フォトディテクタの周波数応答性と光電変換効率はトレードオフの関係にあるため，本システムでは周波数応答性は低いものの，高感度なフォトディテクタを用い，さらにロックインアンプで検出することでシステムの高感度化を図っている．周波数応答性の低いフォトディテクタの場合，ストロボ法における光電変換後の出力電圧は Fig. 2 に示すように直流電圧となる．そのため，発生磁界もしくはレーザをバースト変調させることで出力電圧が交流電圧となり，ロックインアンプによる高感度な測定が可能となる．本システムでは使用したフォトディテクタの周波数応答性に合わせて，発生磁界を 25 kHz でバースト変調した．それにより，光電変換後の出力電圧が 25 kHz で変化する交流信号となる．これらストロボ法とバースト変調により，高感度で位相情報を含んだ磁界測定を可能としている．

2.2 空間分解能と測定感度について

一般的な光学顕微鏡やレーザ顕微鏡の場合，短波長の光源や高倍率のレンズを用いてスポット径を小さくすることで空間分解能を高めている．しかしながら，本報告では磁界検出に磁性ガーネットを使用しているため，本システムの空間分解能はレーザのスポット径に加え，ガーネットの厚さや異方性にも依存することになる．Fig. 3 はガーネットに対物レンズにより集光したレーザが入射している様子を断面から見た模式図である．ガーネットに磁界が加わっている場合，ガーネット内部をレーザが透過したときにファラデー効果によりレーザの偏光面が回転する．そのため，Fig. 3 の白い点線で囲んだ範囲のガーネットの磁化状態の平均値を磁界として検出する．波長 670 nm のレーザを使用したときのガーネットの厚みとガーネット表面におけるレーザ直径の関係を Fig. 4 に示す．Fig. 4 より，ガーネットの厚みによりガーネット表面に照射するレーザ直径が大きく変化することがわかる．また，高倍率のレンズの方がスポット径は小さくなるものの，ガーネットの厚みが厚くなってしまうと表面に照射するレーザ直径が低倍率のレンズよりも大きくなってしまふ．ガーネットが厚い場合，全体的な透過範囲を考えると低倍率のレンズのほうが高い空

Fig. 2 Stroboscopic method (left) and photodiode output (right).

Fig. 3 Schematic of laser beam and garnet.

Fig. 4 Relationship between thickness of garnet and laser beam diameter.

間分解能が得られると考えられるため，厚さに適した倍率のレンズを選定する必要がある．それに対して，ガーネットが薄い場合，スポット径同等の空間分解能が得られると考えられるため，高い空間分解能を得るためには薄いガーネットを使用すればよい．また，ガーネットの異方性に関

しては、垂直方向の磁界を検出する際に垂直磁気異方性を有したガーネットを使用した場合、磁壁移動による磁化反転となるため、磁壁の大きさ（約 5 μm ）により空間分解能が制限されてしまう。そのため、高空間分解能化のためには面内異方性を有するガーネットを使用することが望ましい。

以上、本システムの空間分解能について述べた。次に測定感度について述べる。本システムの測定感度は主にフォトディテクタの感度とレーザパワー、磁気光学効果の大きさにより決定される。①フォトディテクタが高感度になることで弱いレーザでも大きな出力を得ることができ、②レーザパワーが大きくなることで、強いレーザをフォトディテクタに入射することができるため、それぞれ光電変換後の出力を上げることができる。また、③磁気光学効果が大きくなることで、より光の偏光面が回転して差動検出による出力が大きくなるため、これら三つの要素を考慮することでシステム全体の感度を向上させることができる。本報告では、高感度なフォトディテクタを使用し、バースト変調によるロックインアンプでの測定を行っているため、さらなる感度向上のためにはレーザパワーと磁気光学効果を大きくする必要がある。レーザパワーに関しては、繰り返し周波数の高いパルスレーザや高出力のパルスレーザを用いればよい。例えば、100 MHz で発振するパルスレーザを使用した場合、平均時間出力は約 500 μW となり、本報告で使用しているレーザパワーの約 50 倍に相当するため、感度も同等程度向上すると考えられる。また、磁気光学効果に関しては、磁気光学材料の組成や厚みにより磁気光学効果の大きさが変化する。Bi 置換ガーネットの場合、Bi の置換量を多くすることで磁気光学効果が増大し、厚みを厚くすることでファラデー効果による磁気光学効果を大きくすることができる。ただし、厚いほど光の透過率が悪くなり、フォトディテクタに入射するレーザ光が弱くなってしまうため、ガーネットを厚くすればするほど感度が向上するとは限らない。

以上述べてきた空間分解能と測定感度の関係を Table 1 に示す。Table 1 より、空間分解能と測定感度は互いに相反する特性があり、両立させることは難しい。例えば、ガーネットの厚さに関しては高感度化のためには厚く、高空間分解能化のためには薄くすることが望ましい。そこで本報告ではこれらの関係を考慮し、比較的厚みの薄い 1.07 μm 厚の面内異方性を有したガーネットと 50 倍の対物レン

Table 1 Relationship between spatial resolution and sensitivity.

High spatial resolution	High sensitivity
In-plane magnetic anisotropy	High sensitivity photodetector
Short wavelength laser	
High power objective lens	
Thin garnet	Thick garnet
Trade-off	

ズ（Mitutoyo M Plan Apo 50X）を使用した。この構成の場合、Fig. 4 からわかるようにレーザのスポット径は 0.78 μm 、ガーネット表面におけるレーザ径は 1.4 μm となるため、空間分解能は 1 μm 程度になると予想される。そして、空間分解能を評価するための微小な磁界発生源として、面内磁気記録方式である Western Digital の WD800BB の磁気ヘッドを測定対象とし、磁気ヘッドから発生する磁界分布を測定した。このハードディスクのトラック幅は 0.466 μm 、磁気ヘッドの書き込み磁極幅は SEM で観察したところ、0.5 μm 程度であった。

3. 計測結果・考察

3.1 磁性ガーネットの直流磁場特性

ストロボ法では、測定した磁界の強さを電圧として出力するため、出力電圧から磁界強度を算出する必要がある。使用したガーネットは 2 GHz 付近で強磁性共鳴が確認できたため、それより低い周波数ならば透磁率はほぼ一定と考えられる。したがって、磁性ガーネットに直流磁場を印加して磁界強度に対する出力電圧特性を測定することで、2GHz 以下の周波数において磁界強度の算出を行うことができる。外部トリガ信号として、1 MHz の矩形波を 25 kHz でバースト変調した信号をパルスレーザへ入力し、ガーネットに直流磁場を印加して出力特性を測定した。Fig. 5 に直流磁場に対するガーネットの出力特性を示す。この傾きを求めると、1 Oe 当たりの出力電圧は 6.03 $\mu\text{V/Oe}$ となった。以降、この測定結果から得られた値を元に出力電圧から磁界強度を算出した。

3.2 磁気ヘッドの磁界波形計測

磁気ヘッドにガーネットを近接させ、磁気ヘッドから発生する磁界を測定した。このとき、磁気ヘッドとガーネット間には Au の反射膜が 500 nm あるため、磁気ヘッドから 500 nm 程度離れた位置の発生磁界を測定したことになる。パルスレーザを 1 MHz で発振し、磁気ヘッドに 100 MHz の正弦波信号を 25 kHz でバースト変調し、5.7 mA_{p-p} の電流を流した。本来の磁気ヘッドに流す電流値よりも小さいが、ガーネットが 600 Oe 程度で飽和してしまうため、ここでは比較的小さい電流を流した。Fig. 6 に磁気ヘッドの書き込み磁極部分の磁界波形測定結果を示す。レーザと磁界の位相を 0.2 deg. ずつずらしながら、各位相における磁界強度の 1000 回分のデータを平均化してプロットした。360°で一周期分の正弦波が確認でき、発生磁界と対応した磁界波形が得られていることがわかる。

3.3 磁気ヘッドの周辺磁界分布計測

磁界波形計測では、レーザを入射している一点の磁界を位相をずらしながら測定したが、磁界分布計測では特定位相のままレーザの入射点を走査することで磁界分布測定を行う。レーザの走査には、測定対象側に XY 自動ステージ（駿河精機 PMG-650）を用い、20×20 μm の範囲を XY 軸各方向に 0.2 μm ずつ走査して各位相における磁界強度を測定した。1 点の測定に対して、ステージの移動時間及

び待機時間を合わせて 0.3 ms に設定し、1 つの磁界分布測定に約 15 分かけて測定を行った。

Fig. 7 に位相が -90 deg. , 0 deg. , 90 deg. における磁気ヘッドから発生する磁界分布計測結果を示す。+と-および白から黒のコントラストはガーネットの面直方向の磁界、つまり磁気ヘッドから発生する垂直方向の磁界の強さを表している。 -90 deg. と 90 deg. の位相において、記録媒体へ書き込む際の強力な磁界が発生しており、ギャップを介して書き込み磁界とは反対方向の微弱な磁界が平面的に発生している様子がわかる。 0 deg. の位相においては、磁界波形測定結果と同様に磁気ヘッドから発生する磁界はほとんど検出されなかった。磁界の計測結果が 90 Oe と磁気ヘッドから発生する磁界にしては小さいが、これは電流値が小さいことに加え、磁性ガーネットと磁気ヘッド間の距離が 500 nm 程度離れているためだと考えられる。

3.4 空間分解能の評価

測定対象であるハードディスクのトラック幅が $0.466\text{ }\mu\text{m}$ 、磁気ヘッドの書き込み磁極幅が約 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ であり、レーザのスポット径よりも小さいため、ここでは磁極部分の磁界分布の半値幅を空間分解能として定義した。空間分解能が十分に高ければ、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 幅の急峻な磁界が測定される

Fig. 5 Measured output voltage when DC magnetic field was applied.

Fig. 6 Measured magnetic field waveform.

(a) -90 deg.

(b) 0 deg.

(c) 90 deg.

Fig. 7 Measured magnetic field distribution around magnetic head.

Fig. 8 Field strength on dotted line in Fig. 7(c).

はずである。Fig. 8 に書き込み磁極部分である Fig. 7(c) の点線部分における磁界強度を示す。Fig. 8 より、半値幅から空間分解能を求めると $1.8\ \mu\text{m}$ であり、予想したよりも低い空間分解能となった。本報告では、ガーネットと磁気ヘッド間の距離が $500\ \text{nm}$ 程度離れているため、磁気ヘッドが記録媒体へ書き込む際の磁界よりも空間的に広がった磁界を測定したためだと考えられる。薄いガーネットに加え、反射膜を薄くすることで、試料とガーネット間の距離を近接させることができるため、さらに空間分解能が向上すると考えられる。

4. まとめ

磁気光学効果とストロボ法を用いた本システムの空間分解能について評価・検討を行った。高い空間分解能を得るために、面内異方性を持ったガーネットを用い、ガーネットの厚さとスポット径、焦点位置を考慮した。そして、空間分解能を評価するために磁気ヘッド周辺の磁界分布を測定した。磁気ヘッド書き込み磁極部分の磁界分布結果から本システムの空間分解能を見積もったところ、 $1.8\ \mu\text{m}$ であった。

本報告では、磁気ヘッドという強力な磁界発生源からの磁界を測定したが、本来は EMI 測定を目的とした測定法である。そのため、EMI 測定に適用するためにもさらに空間分解能と感度を高める必要がある。現時点で有効的に空間分解能と感度を高めるには、高出力のレーザとさらに薄いガーネットや反射膜を用いればよい。本報告で使用したレーザは平均時間出力 $10.5\ \mu\text{W}$ という低出力のレーザを用いているため、高出力のレーザを用いることで感度は大幅に改善すると考えられる。そして、薄いガーネットを用いる

ことで感度は低下するものの、高出力レーザによる感度の増加分を考えると、本報告よりも空間分解能と感度が向上し、EMI 測定への適用も可能ではないかと考えられる。

謝辞 磁性ガーネット薄膜を御提供頂きました名古屋工業大学先進セラミックス研究センター安達信泰准教授に感謝致します。

References

- 1) J.D. Dyson: "Measurement of near fields of antennas and scatterers", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-21, pp. 446-460 (1973).
- 2) N. Tamaki et al: "A Miniature Thin-Film Shielded-Loop Probe with a Flip-Chip Bonding for Magnetic Near field Measurements", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. J87-C, No. 3, pp. 335-342 (2004).
- 3) M. Takahashi, H. Ota, K. I. Arai and R. Sato: "Magnetic Near-Field Distribution Measurements above a Patch Antenna by Using an Optical Waveguide Probe", *IEICE Trans. Commun.*, E88-B, pp. 3140-3145 (2005).
- 4) M. Takahashi, K. Kawasaki, H. Ohba, T. Ikenaga, H. Ota, T. Orikasa, N. Adachi, K. Ishiyama, and K. I. Arai: "Electromagnetic near field measurements by using magnet garnet crystal", *J. Appl. Phys.*, vol. 107, 09E711 (2010).
- 5) H. Nasuno, S. Hashi, K. Ishiyama: "Stroboscopic technique for measuring magnetic-field waveforms utilizing magneto-optical effect", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, pp. 4011-4013 (2011).
- 6) J. Takahashi, H. Nasuno, S. Hashi, K. Ishiyama: "Magnetic field waveform measurement of microstrip line using pulsed laser", *DIGESTS OF THE 35TH ANNUAL CONFERENCE ON MAGNETICS IN JAPAN*, p58 (2011).
- 7) T. Kosaka, M. Naganuma, M. Aoyagi, T. Kobayashi, S. Niratisairak, T. Nomura, T. Ishibashi: "Preparation and Characterization of $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ Films for Magneto-optical Indicator Films By Metal Organic Decomposition", *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol. 35, pp. 194-198 (2011).

2012年10月19日受理, 2012年12月18日再受理, 2013年1月15日採録