

磁気光学結晶を利用した高周波磁界計測

石山 和志[†]

[†] 東北大学電気通信研究所 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

E-mail: [†] ishiyama@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 近傍磁界を低い侵襲性で計測することが環境電磁対策問題からも望まれている。我々は磁気光学結晶を利用した金属を用いない低侵襲な計測手法に着目し、その測定感度を向上させるために短パルスレーザを用いてストロボ法を使った手法を提案している。本報告ではこの手法を紹介するとともに、特に空間分解能に着目して磁気ヘッド周辺磁界計測を行った結果を紹介する。

キーワード 磁気光学効果, 電磁両立性, 磁界測定

High frequency magnetic field measurement using magneto-optical crystal

Kazushi ISHIYAMA[†]

[†] Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: [†] ishiyama@riec.tohoku.ac.jp

Abstract Electromagnetic interference (EMI) is a serious problem in integrated circuits. To overcome this problem, it requires the low-invasive measuring system for the near-field estimation. We proposed a magneto-optical measurement system that uses short laser pulses and a stroboscopic method and measurement of magnetic-field waveforms. In this report, we discuss about the spatial resolution of this system by measuring the magnetic field distribution around magnetic head.

Keyword magneto-optical effect, electromagnetic compatibility, magnetic field measurement

1. はじめに

近年、集積回路の高密度化に伴って各部品の間隔が狭くなるとともに、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、通信の障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も、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、その対策のためにも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、シールドドローブ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ことが知られている⁽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、磁界の強度と周波数のみ測定可能であり、位相を含んだ測定はできていなかった。そのため、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ってきた⁽⁵⁾。さらに、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⁾。本報告ではハードディスクの磁気ヘッド周辺から

発生する磁界分布を測定することでこの測定装置が有する空間分解能の評価と検討を行った。

2. 測定方法

〈2.1〉 測定システム

図 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 (BiLu)₃(FeGa)₅O₁₂ 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。効果的に磁気光学効果を

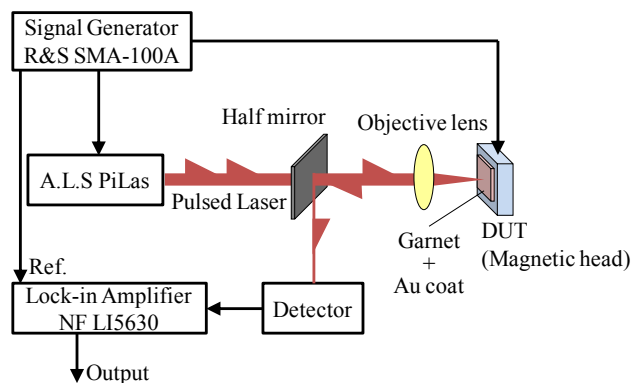


図 1 測定システムの構成

Fig. 1 Schematic structure of measurement system.

得るため、ガーネット薄膜上には厚さ約 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及び反射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、磁性ガーネットの磁化状態、すなわち印加されている磁界強度に依存するため、偏光状態を差動検出することで磁界測定をしている。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照射しているため、垂直方向の磁界成分を測定する。本報告で使用したレーザは、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 μ W, パルス幅は 32 ps である。

本システムでは図 2 に示す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。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。そして、図 2 (b) のようにレーザと磁界の位相をずらすことで他の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。そのため、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、ロックインアンプで検出することで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図 2 に示すように直流電圧となる。そのため、発生磁界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り、ロックインアンプを用いることでより高感度な測定を行った。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

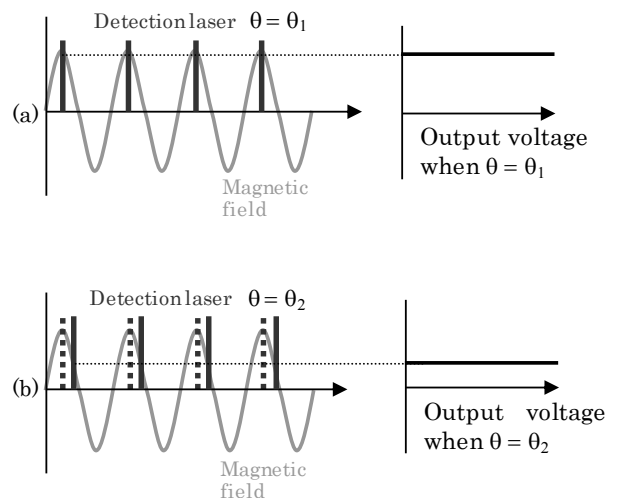


図 2 ストロボ法 (左) とフォトディテクタの出力値 (右)
Fig. 2 Stroboscopic method (left) and schematic view of photodiode output (right).

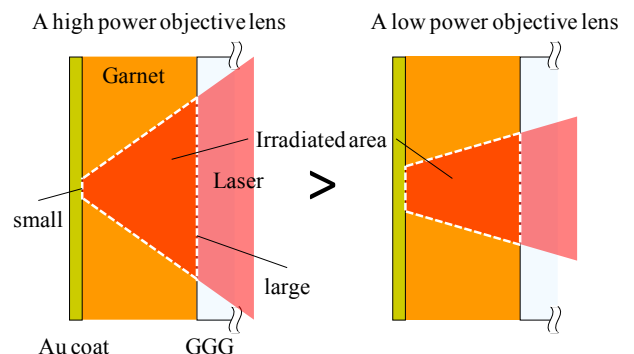


図 3 対物レンズの倍率による照射範囲の比較
Fig. 3 Comparison between the low power and high power objective lens of irradiated area.

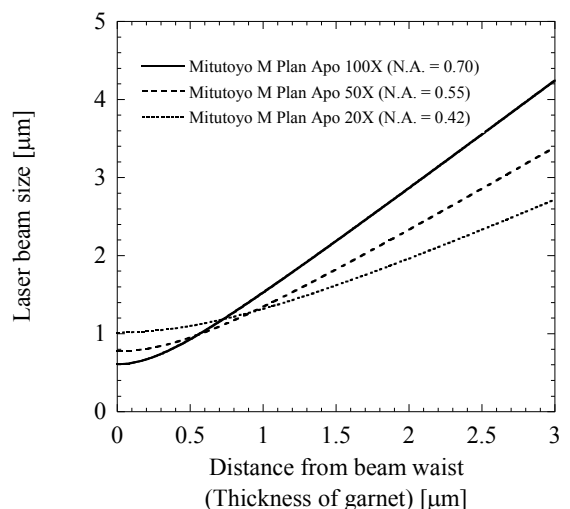


図 4 ガーネットの厚みとレーザ径の関係
Fig. 4 Relationship between thickness of garnet and laser beam size.

のレーザと高倍率の対物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、本システムはレーザをガーネットに入射し、ガーネット内部をレーザが透過した範囲の磁化状態の平均値を測定することで磁界の測定を行う。そのため、本システムの空間分解能はレーザのスポット径だけでなく、ガーネットの厚さとガーネットの異方性にも依存する。図3はガーネットにレーザが入射されている様子を断面から見た模式図である。ここでは、照射範囲が最小となるように焦点位置を反射膜の位置に合わせた様子を示した。この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径の関係を図4に示す。図4より、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ガーネット表面に照射するレーザ径が低倍率のレンズよりも大きくなってしまふ。そのため、厚いガーネットを用いた場合、図3に示すように全体的なレーザの照射範囲を考えると低倍率のレンズのほうが高い空間分解能が得られると考えられる。それに対し、薄いガーネットを用いた場合、スポット径同等以上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、垂直磁気異方性を持ったガーネットの場合、磁壁移動による磁化反転のため、磁壁の大きさ（約 $5 \mu\text{m}$ ）により空間分解能が制限されてしまふ。そのため、高分解能化のためには面内方向に異方性を持つ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を決定付ける要因について述べた。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。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、レーザパワーが大きくなることで、強いレーザを伝え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、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良くすることができる。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、さらに感度を良くする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 $500 \mu\text{W}$ となり、本報告で使用しているレーザパワーの約 50 倍に

表 1 空間分解能と測定感度の関係
Table 1. Relationship between spatial resolution and sensitivity.

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

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、磁気光学材料そのものの問題もあるが、厚みを厚くすることでレーザ透過時の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、フォトディテクタへ伝えることができるレーザ光が弱くなってしまふため、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表1に示す。表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、厚さ $1.07 \mu\text{m}$ の面内異方性のガーネットと 50 倍の対物レンズ（Mitutoyo M Plan Apo 50X）を使用した。この構成の場合、レーザのスポット径は $0.775 \mu\text{m}$ 、焦点を反射膜の位置に合わせると、ガーネット表面のレーザ径は $1.4 \mu\text{m}$ となる。そのため、空間分解能は $1.4 \mu\text{m}$ 以下になることが予想される。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、磁気ヘッド周辺から発生する磁界分布を測定した。この磁気ヘッドの書き込み磁極幅は SEM で観察したところ、 $0.5 \mu\text{m}$ 程度だった。

3. 計測結果と考察

(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。使用した磁性ガーネットは 2 GHz 付近で強磁性共鳴が確認でき、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。そのため、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、磁性ガーネットに直流磁場を印

加して出力特性を測定した。図 5 に直流磁場に対する磁性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

磁気ヘッドに磁性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、磁気ヘッドと磁性ガーネット間には 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 mAp-p の電流を磁気ヘッドに流した。本来の磁気ヘッドに流す電流値よりも小さいが、磁性ガーネットが 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。図 6 に磁気ヘッドの記録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のに対し、磁界分布計測では、位相はずらさずに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、 $20 \times 20 \mu\text{m}$ の範囲を XY 軸各方向に $0.2 \mu\text{m}$ ずつ走査して各位置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。

図 7 に -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 - 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見える。 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

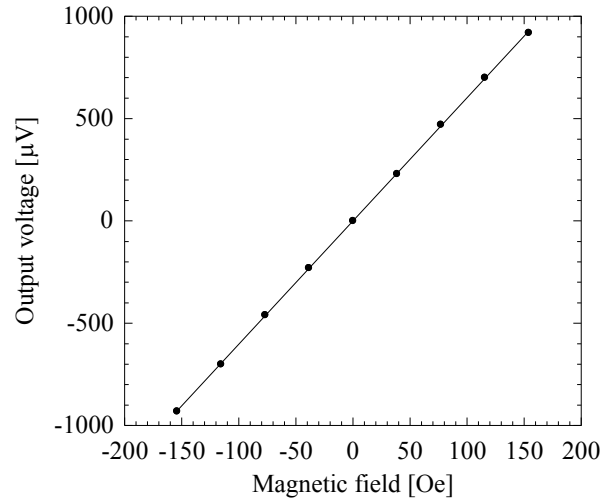


図 5 直流磁場に対する出力電圧
Fig. 5 Measured output voltage when DC magnetic field applied.

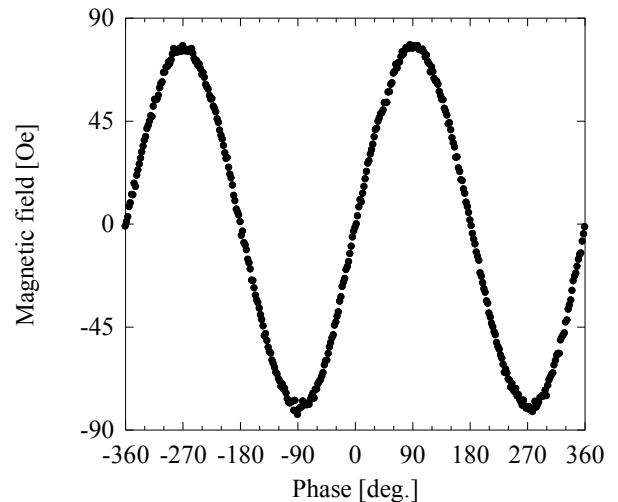
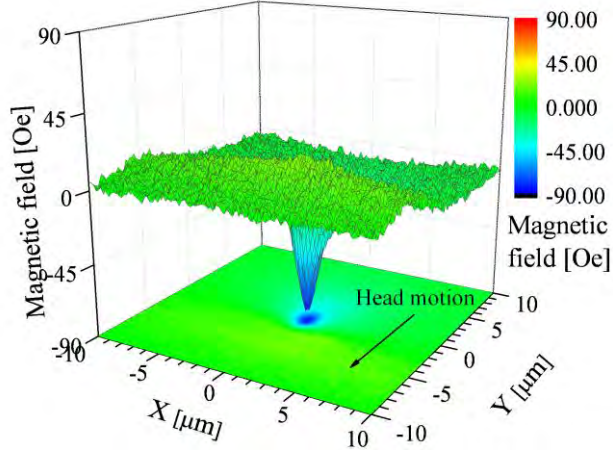


図 6 磁界波形計測結果
Fig. 6 Measured magnetic field waveform.

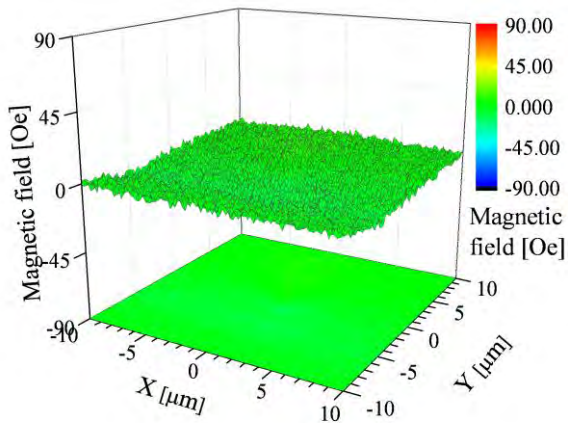
考えられる。

〈3・4〉空間分解能の評価

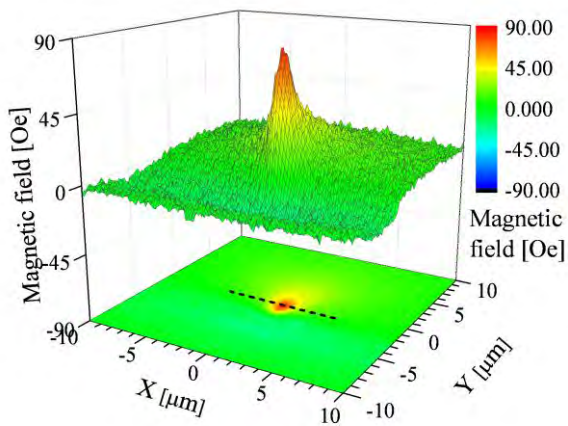
測定した磁気ヘッドの磁極幅が $0.5 \mu\text{m}$ であり、レーザのスポット径よりも小さいため、ここでは磁極部分の磁界分布の半値幅 (FWHM) を空間分解能として定義した。空間分解能が十分に高ければ、 $0.5 \mu\text{m}$ 幅の急峻な磁界が測定されるはずである。図 8 に図 7(c) の点線部分における磁界強度を示す。これより半値幅を求めると $1.8 \mu\text{m}$ となり、なだらかな磁界分布となった。また、予想した空間分解能である $1.4 \mu\text{m}$ よりも大きくなった。これは、現在手動ステージを用いてレーザの焦点を合わせており、理想とする焦点位



(a) -90 deg.



(b) 0 deg.



(c) 90 deg.

図7 磁気ヘッド周辺の磁界分布計測結果
Fig. 7 Measured magnetic field distribution around magnetic head.

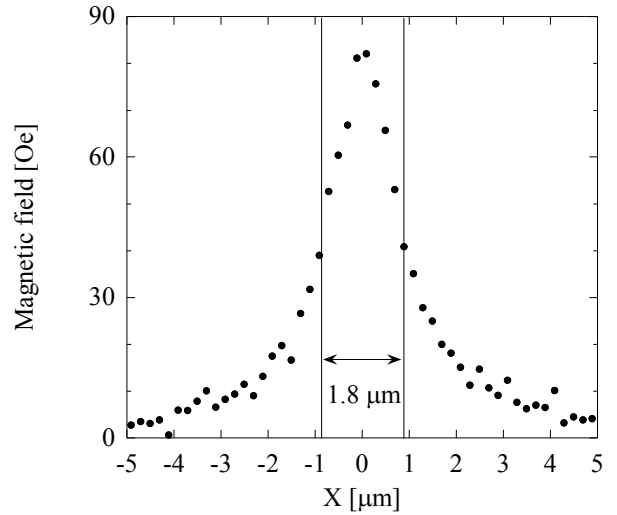


図8 ヘッド近傍の磁界強度
Fig. 8 Field distribution of the head

置からずれてしまっていることが原因と考えられる。

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、磁気ヘッドという大き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を用いればよい。現在使用している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、現時点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あると考えられる。

謝辞：実験に協力いただいた研究室修士学生諸君に感謝する。異方性を制御したガーネット結晶をご提供いただいた名古屋工業大学安達信泰教授に感謝する。本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発—不要電波の広帯域化に対応した電波環境改善技術の研究開発」によるものであり、記して感謝する。

文 献

- [1] J.D. Dyson: "Measurement of near fields of antennas and scatters", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-21, pp446-460, 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, p3140-3145, 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, pp. 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.