



## 電子機器の実回路に適応可能な高周波近傍磁界測定手法の提案

# Proposal of High Frequency Near Magnetic Field Measurement Method Applicable to Actual Circuits in Electronic Devices

荻田健徳<sup>a,b)</sup>・石田竜太<sup>a,b)</sup>・後藤太一<sup>b)</sup>・石山和志<sup>b)†</sup>

<sup>a)</sup>東北大学大学院 工学研究科, 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 (〒980-8579)

<sup>b)</sup>東北大学 電気通信研究所, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

Takenori Karita<sup>a,b)</sup>, Ryuta Ishida<sup>a,b)</sup>, Taichi Goto<sup>b)</sup> and Kazushi Ishiyama<sup>b)†</sup>

<sup>a)</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

<sup>b)</sup>RIEC Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

In recent years, electromagnetic communication problems have been a concern, such as device malfunctions caused by the leakage of electromagnetic waves. To overcome this, technologies to accurately measure high-frequency magnetic fields are required. We use a magneto-optic crystal and pulsed laser to detect magnetic fields, that enable low invasiveness against magnetic fields. In addition, by using the stroboscopic method, we can measure AC magnetic fields with phase information. To do this, it is necessary to synchronize the pulsed laser oscillation and magnetic fields to be measured. In previous studies, we obtained high-frequency signals that generate electromagnetic fields using a metallic probe directly. However, when those signals are in the GHz band, signal acquisition is difficult, mainly due to impedance mismatch at the probe contacts. To apply our magnetic field measurement system to commercial electronic devices, this study proposes a new method for obtaining a synchronization signal from a crystal oscillator, which is the basic clock signal source for electronic devices. We verified the usefulness of this method by measuring the magnetic field distribution of a microstrip line. We then measured the magnetic field distribution of commercially available high-frequency electronic devices.

**Keywords:** magnetic optical effect, garnet, synchronization, magnetic field measurement

### 1. はじめに

近年、携帯電話や通信機器をはじめとした電子機器の普及・高性能化に伴い LSI の高密度化による素子や配線間隔の縮小、駆動周波数の高周波化、低電圧駆動により、回路内の漏洩電磁波による誤動作、通信障害など、電子機器内において従来にはない電磁干渉の問題が発生している<sup>1)</sup>。この問題の解決には、漏洩電磁波発生箇所シールドを施す手法などが効果的だが、そのためにもまず漏洩電磁波の発生箇所を特定し正確に計測する技術が必要である。微弱な高周波近傍磁界を計測する方法として、金属ループコイルを用いた方法がある<sup>2) 3)</sup>。しかし、測定感度とループ径(空間分解能)の間にはトレードオフの関係があり、さらに GHz 帯の高周波領域では電界との結合により測定感度が低下する問題がある<sup>4)</sup>。また、プローブが金属製であるため測定対象の磁界分布を乱し、測定精度の低下や、測定対象回路の動作への影響が問題となっている<sup>5)</sup>。

我々は、磁気光学効果<sup>6) 7)</sup>と短パルスレーザを用いた高周波近傍磁界計測システムを構築し、研究を行っている<sup>8)</sup>。絶縁性磁性体である磁性ガーネット膜をプローブとして用いることで、金属ループコイルに比べて低侵襲かつ空間分解能が高い近傍磁界計測が可能である。本磁界計測システムは、測定対象の高周波磁界とパルスレーザの発振

を同期し、被測定磁界の特定位相でのみレーザが発振するストロボ法を用いることで、位相情報を含んだ磁界計測を可能としている<sup>8) 9)</sup>。先行研究では、測定対象である漏洩磁界の要因となる高周波信号を同期信号として取り出す手法により、市販の電圧制御発信器(VCO: Voltage Controlled Oscillator)の磁界分布測定を行い、本システムが実回路の磁界分布測定に適用できる可能性を示した。しかし、同期信号として取り出す信号は GHz 帯の高周波信号であり、これらを直接金属プローブや同軸コネクタによって取り出すことはインピーダンス不整合やクロストークによる信号の劣化を招き、信号品質を維持したまま同期信号を取得することは容易ではなかった。また、高周波信号源が IC チップに内蔵されている場合には同期信号を取り出すことは不可能であり、磁界計測を行えなかった。

そこで本研究では、磁界計測システムを市販の電子機器へ適用するため、電子回路内の基本クロック信号源である水晶発振器から同期信号を取得する新たな方法を提案する。また、本手法を用いてマイクロストリップライン(MSL)及び市販の周波数シンセサイザの磁界分布計測を行うことで本手法の有用性について検討した。

Corresponding author: K. Ishiyama (e-mail: [ishiyama@riec.tohoku.ac.jp](mailto:ishiyama@riec.tohoku.ac.jp)).

## 2. 原理・測定方法

### 2.1 磁界検出手法

Fig. 1 に本研究で使用した磁界計測システムの概略を示す。プローブである磁性ガーネット膜を被測定磁界近傍に設置し、パルスレーザを垂直方向に照射した。レーザ光が通過する磁性ガーネット膜内部では被測定磁界により磁化状態が変化し、反射光の偏光状態の変化を磁界の変化として検出した<sup>10) - 13)</sup>。レーザ光は磁性ガーネット膜に対して垂直に入射したため、膜に対して垂直方向の磁界成分を検出した。磁性ガーネット膜は 1 cm 角にした Matesy 社の Matesy Type B であり、片面には反射膜(誘電体多層膜)を形成した。入射と反射により光路長は膜厚の 2 倍となるため、得られたファラデー回転角も 2 倍となった。レーザが入射する際には、磁性ガーネット膜表面と反射膜で 2 種類の反射光が発生し、前者は極カー効果、後者はファラデー効果による偏光状態の変化が起きている。よって磁界計測では、2 種類が混合した光による出力が得られる。しかし、レーザ光は磁性ガーネット膜に対して垂直に入射するため、磁性ガーネット膜表面の反射光に比べ、内部を通過し、反射膜で反射する光の方が支配的である。よって反射光全てをファラデー効果による偏光面の回転とした。

反射光は偏光ビームスプリッタ(Polarizing Beam Splitter; PBS)によって P 偏光と S 偏光に分離され、2 つのフォトディテクタによって光電変換を行った。2 つの電圧値の差から偏光角の回転による P 偏光と S 偏光の変化を差動検出し、磁界強度に応じたファラデー回転角を計測した。測定対象の高周波磁界によって生じるファラデー回転角の変化は微小であり、単一のレーザパルス光の強度も微弱である。高感度な磁界計測を実現するため、本システムでは被測定磁界とパルスレーザの発振を同期し、測定磁界の特定位相でレーザパルス光を複数回照射した。高感度なフォトディテクタを用い、レーザパルス光を積算することによって大きな信号強度を得た。さらに、被測定磁界と同期した位相の異なる 2 つのレーザトリガ信号(Trigger A, Trigger B)をバースト変調し、パルスレーザを発振させた。それによって得た 2 つのフォトディテクタの差動信号をロックインアンプで検出する手法<sup>9)</sup>により、高感度かつ再現性の高い磁界検出が可能である。

### 2.2 被測定磁界とレーザトリガ信号の同期

ストロボ法を用いるためには、被測定磁界とレーザのパルス発振の同期が必要である。本計測システムでは、電子機器等の測定対象内部流れる信号を同期の基準とし、磁界計測を行っている。先行研究<sup>9)</sup>では、測定対象の電子回路内の部品から、被測定磁界の要因となる高周波信号を金属プローブや、同軸コネクタを用いて直接取り出していた。しかし、金属プローブで GHz 帯の高周波信号を取り出すことは信号品質を維持することが容易ではなく、さらに、高周波信号源が IC チップ内に埋め込まれている場合には信号を取り出せず、本システムを適用できなかった。

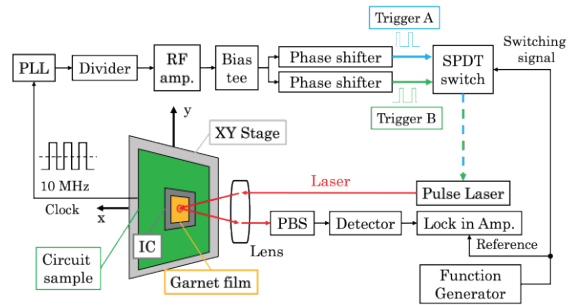


Fig. 1 Schematic of RF magnetic field measurement system.

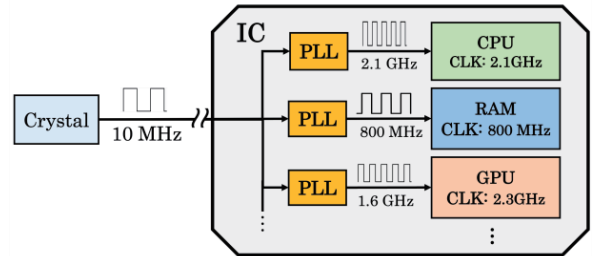


Fig. 2 Example of a typical modern electronic device configuration.

そこで本研究では、電子回路の構成に着目し、回路内の水晶発振器から同期信号を取り出す新たな方法をとった。Fig. 2 に一般的な電子回路の回路構成を示す。CPU, RAM 等の電子回路内の部品はそれぞれ異なるクロック周波数で動作するが、それらは水晶発振器によって生成される低周波の基本クロック信号と同期した高周波信号として PLL により生成される。高周波信号の配線をできる限り短くすることで信号品質を保つ構成が施されている。この構成を元に、水晶発振器の基本クロック信号と同期した高周波信号を計測の同期信号とする手法をとった。

測定対象の回路内の水晶発振器から取得した数十 MHz 程度の基本クロック信号を PLL によって倍速し、さらに分周器によってパルスレーザのトリガ信号として適切な周波数帯へ低周波化した。また、後段に DC バイアスティーと RF アンプを接続することにより、パルスレーザの発振閾値である 0.5 V 以上の矩形波を生成した。なお、パルスレーザの発振タイミングをコントロールし、2 つの位相群を作り出す Phase shifter の位相シフト範囲は 2500 ps であり、一周期分の位相情報を得られる被測定磁界の最低周波数は 400 MHz である。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 レーザ発振トリガ信号のジッタ計測

ストロボ法を用いる本磁界計測システムは、被測定磁界の特定の位相でパルスレーザを発振する。被測定磁界の正確な位相・振幅情報を得るためには、レーザパルス幅とレーザトリガ信号のタイミングジッタが被測定磁界の周期に対して十分小さいことが求められる。周期に対してレーザパルス幅が広い場合、検出するレーザ反射光は被測定磁界の特定位相周辺の位相情報を含んだ光となる。そのため

パルス幅が短いほど時間分解能が高く、より正確な振幅情報が得られる。タイミングジッタはレーザトリガ信号を生成する過程で通過する PLL, 分周器等によって発生する。これは、パルスレーザの発振タイミングのブレの原因となり、誤った位相の磁界検出につながる。そのため特定の位相で磁界測定を複数回行い、その平均を取ることで出力を得た。ここではタイミングジッタ+レーザパルス幅を時間分解能の指標とする。本研究で使用するレーザパルス光の半値幅は 60 ps, トリガ信号の周期ジッタが 4.2 ps であり、時間分解能は 64.2 ps となる。これをもとに計測磁界の振幅情報の取得精度  $\alpha$  (%) を式(1), 位相情報の取得精度  $\beta$  (%) を式(2)によって算出した結果を Table 1 に示す。

$$\alpha = \left(1 - \frac{\text{時間分解能 (ps)}}{\text{磁界周期 (ps)}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\beta = \left(1 - \frac{\text{タイミングジッタ (ps)}}{\text{磁界周期 (ps)}}\right) \times 100 \quad (2)$$

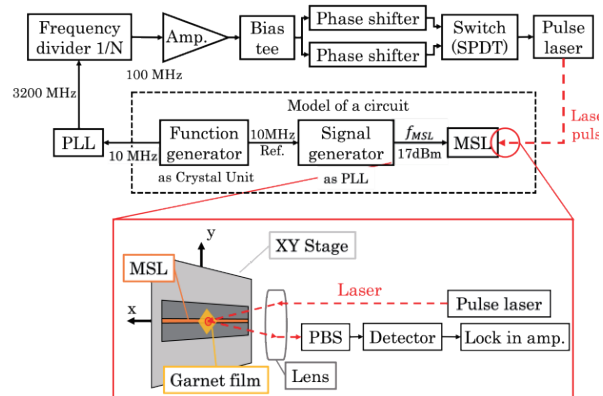
今回、測定対象の磁界周波数は  $\sim 3.2$  GHz である。測定値の  $\alpha$  は 79.5%,  $\beta$  は 98.7% であり、十分な精度で磁界計測が可能であると考えられる。

### 3.2 MSL 近傍磁界分布計測による検証実験

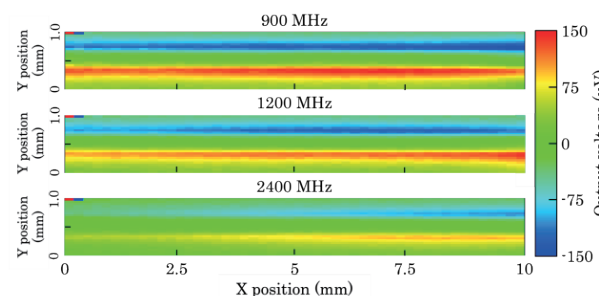
今回提案する新たな同期信号の取得方法により、被測定磁界と磁界計測システムが同期可能であり、ストロボ法による磁界計測が行えることを確認するため、検証実験として RF 信号を導通した MSL の磁界分布測定を行った。Fig. 3 に検証に用いた系を示す。点線部は Fig. 2 に示した電子回路の構成を模した回路である。水晶発振器をファンクションジェネレータ (Agilent Technologies, 81160A), PLL をシグナルジェネレータ (Rohde & Schwarz, SMA 100A), 磁界測定対象部品を MSL としている。ファンクションジェネレータから基本クロック信号として 10 MHz の参照信号をシグナルジェネレータの参照信号入力端子に接続し、同期をとった。シグナルジェネレータの RF 出力端子から他端を 50  $\Omega$  終端した MSL へ RF 信号を投入した。磁界計測システムでは、ファンクションジェネレータから 10 MHz の基本クロック信号を同期信号として受け取り、PLL によって 3200 MHz に通倍, 1/32 分周器, RF アンプ等によって生成した 100 MHz の矩形波をレーザトリガ信号として用いた。MSL への RF 信号の投入電力は 17 dBm とし、本システムが特定の磁界の周波数成分以外も検出可能であることを示すため、RF 信号の周波数は 900 MHz, 1200 MHz, 2400 MHz とした。また、磁界分布の取得に際し、MSL は 0.1  $\mu\text{m}$  の空間分解能をもつ XY ステージに取り付け、X: 10 mm  $\times$  Y: 1 mm の範囲を X 軸方向に 200  $\mu\text{m}$ , Y 軸方向に 40  $\mu\text{m}$  ずつ走査して各位置における磁界強度を計測した。MSL 内の RF 信号は X 軸方向に進行し、発生する正弦波磁界の最大値が測定範囲内のおおよそ中央になるように測定位相を Phase shifter

**Table 1** Acquisition accuracy of phase and amplitude information by frequency.

Frequency of magnetic field (GHz)	Cycle of magnetic field (ps)	Accuracy of amplitude information $\alpha$ (%)	Accuracy of phase information $\beta$ (%)
1.0	1000	93.6	99.6
2.0	500	87.2	99.2
3.0	333	80.7	98.7
3.2	313	79.5	98.7
5.0	200	67.9	97.9
7.0	143	55.1	97.1
10.0	100	35.8	95.8
15.6	64	0.0	93.4



**Fig. 3** Schematic of RF magnetic field measuring system used for verifying our proposed synchronization method.



**Fig. 4** Measured magnetic field distribution near the microstrip line at the frequency of 900, 1200 and 2400 MHz.

によって調整した。測定範囲内で観察可能な磁界波長は 900 MHz, 1200 MHz, 2400 MHz の磁界に対してそれぞれ,  $0.07\lambda$ ,  $0.08\lambda$ ,  $0.15\lambda$  となる。測定結果を Fig. 4 に示す。測定電圧の大きさはレーザ反射光の回転角の変動に比例し、磁気光学効果の大きさ、すなわち磁界強度を示す。3 種類の磁界周波数全てにおいて、最も磁界強度が強くなる MSL のエッジ付近に大きな出力が確認できた。なお、Table 1 に示した通り、磁界振幅の測定値は磁界周波数が高くなるにつれて低下することも確認できる。また、磁界の正負を検出できていることから、ストロボ法により測定位相の磁界分布が測定できていることがわかる。このことか

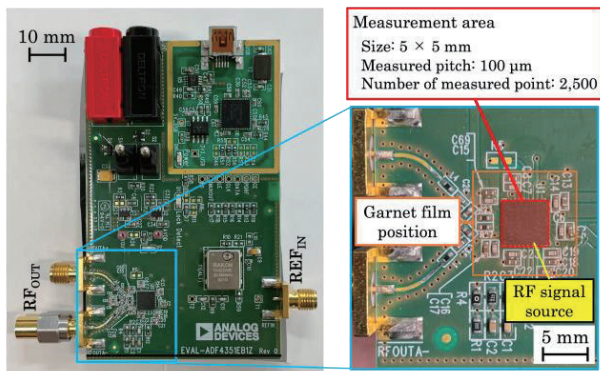


Fig. 5 Electronic circuit board (Analog devices, EVAL-ADF4351-EBZ1) used for measurement.

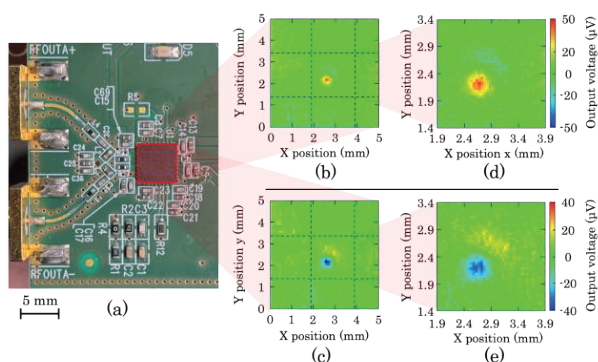


Fig. 6 Measured magnetic field distribution on the IC chip surface. (a) Overall photo of the circuit board. Magnetic field map with the phase of (b) 0 degrees and (c) 180 degrees. (d) (e) Their enlarged figure.

ら、本磁界計測システムがファンクションジェネレータから取得した基本クロック信号のみの情報によって、電子機器の実回路を模した構成によって動作する部品の漏洩磁界分布を測定可能であることが確認できた。

### 3.3 実回路の磁界分布測定

本手法が市販の電子機器の実回路に適用可能であることを示すため、実証実験として Fig. 5 に示す周波数シンセサイザ(Analog Devices, EVAL-ADF4351EBZ1)のICチップ近傍より発生する漏洩磁界分布の計測を行った。この回路は、水晶発振器または外部からの参照信号をもとに、参照信号と同期した高周波クロック信号を生成するものである。今回は、水晶発振器ではなくファンクションジェネレータ(Agilent Technologies, 81160A)から 10 MHz の矩形波を参照信号として周波数シンセサイザに投入し、生成する高周波クロック信号は 3.2 GHz、+5 dBm とした。磁界計測システムへ入力する同期信号は、周波数シンセサイザ上のテストピン(T2)からオシロスコープ用金属プローブ(Rohde & Schwarz, RT-ZP10)を用いて取得した。パルスレーザの発振周波数及びレーザトリガ信号の生成過程は検証実験と同様とした。磁性ガーネット膜は厚さ 80  $\mu\text{m}$

の両面テープによって IC チップの表面に平行になるように設置した。測定範囲は、高周波信号源である VCO を内蔵する大きさ 5 mm $\times$ 5 mm の IC チップ(Analog Devices, ADF4351BCPZ)表面とし、XY ステージを 100  $\mu\text{m}$  ずつ走査し磁界分布を測定した。測定結果を Fig. 6 に示す。(b)は(a)に示す測定範囲全体の磁界分布である。IC チップの中央付近に局所的な強い磁界分布が確認できた。(b)の測定位相を 0 deg とし、測定位相を 180 deg シフトすると(c)に示すように正負が反転した磁界分布が現れた。(d),(e)はそれぞれの拡大図である。この結果から、提案した同期手法により市販の高周波回路に対してストロボ法を用いた磁界分布測定が可能であることを示した。

## 4. まとめ

パルスレーザと磁気光学効果を利用した磁界計測システムにおいて、被測定磁界とシステムの新たな同期手法を提案し、その検討を行った。検証実験として MSL の磁界分布測定を行うことで、本手法によりストロボ法を利用した磁界計測が可能であることを示した。その上で、GHz 帯で動作する市販の周波数シンセサイザの IC チップ部分の近傍磁界分布測定を行い、動作周波数と同じ周波数の漏洩磁界を計測した。これらの結果から、本手法により漏洩磁界の原因となる高周波信号を直接同期信号として取得する従来の方法では不可能であった、市販の電子機器の実回路を含めた幅広い電子回路の磁界計測が可能であることを示した。しかし、技術の進歩に伴いさらに高周波かつ微弱な漏洩電磁波の計測技術が求められており、実用的な近傍磁界計測手法とするにはさらなる検出感度及び測定可能周波数の向上が必要である。これらについては、磁性ガーネット膜以外を含めた新たな材料の選定や、パルス幅が短く高出力なレーザを導入することにより達成可能であると考えられる。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり東北学院大学の柁修一郎教授からは数多くのご助言をいただきました。ここに感謝を表します。後藤が支援を受けた JSPS 科研費 No.20H02593, No.20K20535, NEDO No.20002157, TI-FRIS フェローシップ、電子回路基板技術振興財団研究助成金、田中貴金属記念財団に感謝を表します。

## References

- 1) M. Yamaguchi: *J. Magn. Soc. Japan*, **28**, 5, 686, (2004).
- 2) J. Dyson: *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-21**, 4, 446, (1973).
- 3) N. Tamaki, N. Masuda, T. Kuriyama, J. C. Bu, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *IEICE Trans. Electronics*, **J87-C**, 3, 335, (2004).
- 4) H. Funato, and T. Suga: *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, **14**, 3, 195, (2011).
- 5) J. Shi, K. Slattery, M. Yamaguchi, K. I. Arai, and R. DuBroff, *The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, TH-A-P1-11, Istanbul, Turkey(2003-5).
- 6) M. Inoue, M. Levy, and A. V. Baryshev, *Magnetophotonics*

- from theory to applications* (Springer, New York, 2014).
- 7) T. Goto, and M. Inoue, "Magneto-optics at Frequency of 500 THz," *J. Magn. Soc. Japan*, **17**, 109, (2022).
  - 8) H. Nasuno, S. Hashi, and K. Ishiyama, *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 4011, (2011).
  - 9) D. Tatsuoka, S. Hashi, and K. Ishiyama, *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 37, (2020).
  - 10) Anjan Barman, T. Kimura, Y. Otani, Y. Fukuma, K. Akahane, and S. Meguro, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 123905, (2008).
  - 11) T. Ishibashi, T. Kawata, T. H. Johansen, J. He, N. Harada, and K. Sato, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 150, (2008).
  - 12) R. Hashimoto, T. Yonezawa, H. Takagi, T. Goto, H. Endo, A. Nishimizu, and M. Inoue, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 213, (2015).
  - 13) Y. Yoshihara, T. Sugita, P. B. Lim, Y. Tamba, H. Inoue, K. Ishiyama, M. Inoue, C. A. Ross, and T. Goto, *Opt. Mater.*, **133**, 112967, (2022).

**2022年11月6日受理, 2023年3月19日採録**