パルスレーザを用いた高周波近傍磁界計測における新しい同期手法の提案

Proposal of new synchronization method in high frequency near magnetic field measurement using pulsed laser

立岡大青[†], 枦修一郎, 石山和志

東北東大学電気通信研究所,仙台市青葉区片平 3-1-1 (〒980-8577)

D. Tatsuoka[†], S. Hashi, and K. Ishiyama

Research Institute of Electrical Communication, Tohokuto Univ., Katahira 3-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

In recent years, EMC problems have been worried such as device malfunctions by leakage electromagnetic waves. To overcome this problem, we need the ability to accurately measure the high-frequency magnetic field. Generally, a loop coil is used to measure a high-frequency magnetic field, but the magnetic field distribution is disturbed because it's made of metal. Therefore, we use magneto-optic crystal and pulsed laser to detect magnetic field, which is low invasiveness against the magnetic field. In addition, by using the stroboscopic method, we can measure AC magnetic field with phase information. However, to use the stroboscopic method, it is necessary to synchronize the pulsed laser oscillation and the magnetic field to be measured. In previous studies, a reference synchronization signal was used to synchronize the magnetic field to be measured and laser oscillation. In this study, we made a laser trigger signal from the output signal from the VCO (Voltage Controlled Oscillator). While magnetic fields to be measured are GHz band, using frequency divider allows to make it as the laser trigger frequency with the specified fraction of the integer. In addition, using the proposed technique, we confirmed that the leakage magnetic field inside the VCO circuit could be measured.

Key words: magnetic optical effect, garnet, synchronization, magnetic field measurement

1. はじめに

近年、電子機器の高性能化に伴い 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や低消費電力を目的とし た低電圧駆動による電磁耐性の低下が原因となり、電子機器が EMIの影響を受けやすくなってしまい¹⁾、発生する漏洩電磁波に より誤作動が誘発されるという問題が懸念されている。この問題 の解決には、漏洩電磁波発生箇所に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 手法としてシールデッドループコイルのような磁界検出部に金属 プローブを用いた磁界検出手法があるが²⁾³⁾⁴⁾、金属性ゆえに本 来の磁界を乱してしまう5)。そこで、我々は磁気光学結晶と短パ ルスレーザを用いた低侵襲で高分解能な磁界検出システム 6)を構 築し研究を行っている。また、被測定磁界とパルスレーザの発振を 同期し、パルスレーザを発生磁界の特定位相でのみ発振させるス トロボ法を用いることで、位相情報も含んだ磁界検出を可能とし ている 6)。先行研究では基準となる同期信号発生器を用いて被測 定磁界とレーザ発振を同期させていた 6), 7)。また、被測定磁界は シグナルジェネレーターによる高周波信号により発生させ、これ までマイクロストリップラインなどの近傍磁界計測を行ってきた 7)。しかし、これまでの計測システム7)では電子機器などの実際の 集積回路などから発生する磁界を計測する際、被測定磁界とレー ザ発振の同期が困難であり計測を行うに至っていなかった。

そこで本研究では、被測定磁界を発生させる高周波信号をレー ザの発振トリガ信号として用いることで両者の同期をとる手法を 提案する。想定する被測定対象の高周波信号はGHz帯かつ微弱な 信号であるため、分周器を用いてレーザの発振可能な周波数帯へ 低周波化するとともに増幅してレーザ発振のためのトリガ信号と する。また本手法を用いてマイクロストリップラインおよびVCO (Voltage controlled oscillator)内部回路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。

2. 原理·測定方法

2.1 磁界検出システム

Fig.1に本研究における磁界測定装置の概略を示す。磁界検出に は発生磁界近傍に設置した磁性ガーネット薄膜に対してパルスレ ーザを垂直に照射し、ガーネットの磁化状態の変化を磁気光学効 果によって光の偏光状態の変化として検出する。また、レーザ光が ガーネット薄膜に対して垂直に入射されているため、膜に対し垂 直方向の磁界成分を検出する。なお、ガーネット薄膜表面で反射す る光量より透過する光量の方が非常に大きく支配的である。よっ て、本計測ではファラデー効果による偏光面の回転を主に検出し ている。磁性ガーネット薄膜は 1cm 角の市販品の Mategy 社・ Mategy type B を使用しており、また反射膜(誘電体多層膜)のコ ーティングにより入射と反射にて2倍のファラデー効果による偏 光の回転角が得られる。また、ガーネット内部の磁化は面内に あり、高周波励起磁界によるガーネットの面直方向磁化変 化の振幅に対応した出力が検出される。反射光は偏光ビーム スプリッタにより P 偏光と S 偏光に分離後、2 つのフォトディテ クタにより偏光角の回転による P 偏光と S 偏光の強度差を差動検 出し磁界強度に対応したファラデー回転角を計測する。しかし、単 一のパルス光の光強度は非常に微弱かつ、発生磁界による光のフ アラデー回転角変化も微小である。また、検出する光強度による出 力信号はガーネット膜の表面形状や機器のドリフトの影響を受け てしまうことから、これらを踏まえた測定系の高感度化が必要と なる。

本計測システムでは高感度化のため、被測定磁界とパルスレー

ザ発振トリガ信号を同期の上、位相が異なる2つのレーザ発振ト リガ信号を SPDT 半導体スイッチによって周期的に切り替えレー ザを発振させている。Fig.2に示すようにレーザに入力される発振 トリガ信号は半導体スイッチの周期により群単位で位相がずれて いるため、パルスレーザは発生磁界に対して周期的に2 つの特定 の位相で発振する。またパルスレーザの発振周波数に対して、周波 数応答性が低いが、高感度のフォトディテクタを用いることで複 数のパルス光による出力を積算させる。Fig.2より、レーザトリガ 信号の一つ目の位相で発振したパルス光による出力の積算値を Signal A、二つ目の位相で発振したパルス光による出力の積算値 を Signal B とすると、ガーネットの表面形状の影響による出力は 常に一定のため、直流成分となる。また、機器のドリフトによる影 響は SPDT のスイッチング周波数がサブミリ秒程度に抑えられる ので、Signal A 及び Signal B は2 位相間の磁界強度差のみに依 存して変化する交流信号となる。そしてこの信号をロックインア ンプで検出することにより高感度な計測が可能となる。

2.2 被測定磁界とレーザトリガ信号の同期

ストロボ法を使う上ではレーザのパルス発振と被測定磁界の同 期が必要である。先行研究では、レーザのトリガ信号を作り出すフ アンクションジェネレーターを同期の基準とし、被測定対象へ高 周波信号を印加するシグナルジェネレーターに対して10 MHzの リファレンス信号を入力し同期をとっていた。しかし、動作の基準 信号が被測定対象側でなく外部の信号発生器にあることは、実際 に駆動する高周波回路の磁界計測に対して現実的でない。そのた め被測定磁界とパルスレーザ発振の同期を行うには逆に回路側か ら、レーザのトリガ信号を作り出すファンクションジェネレータ ーに対してリファレンスを入力し同期をとる必要がある。だが、一 般的にファンクションジェネレーターなどの信号発生器はリファ レンスに特定の周波数・電圧レベルの規格を持つため、計測対象か らこの規格に応じた信号を生成し、基準となる同期信号発生器へ 入力するのは困難である。そこで今回被測定磁界を発生させる DUT の入力信号を直接レーザ発信トリガ信号として用い同期を とる手法をとった。被測定磁界周波数はGHz帯であるため、分周 器を用いて被測定磁界の整数分の一かつレーザ発振が可能な周波 数帯に低周波化する。また、本計測システムで用いる分周器は、入 力が-10dBm 程度からの微小信号に対応している一方、出力部に5k Ωの高抵抗が接続されているため出力信号は 50Ω系の後段の回路 では微弱なものとなってしまう。そのため、本計測システムにおい てアンプ及びDCバイアス回路は分周器の後段に接続し、レーザの 発振トリガの閾値である 0.5 V 以上の矩形波を生成する。

なお、レーザ発振タイミングをコントロールする phase shifter の 位相シフトレンジは 2500ps であり、低周波側の位相情報の測定限 界については周期が同じ 2500ps となる 0.4GHz であると考えられ 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

ストロボ法を用いた磁界検出は、パルスレーザのパルス幅が測 定磁界の位相情報取得精度を決定する要因の一つである⁶⁰。本研 究で使用するレーザパルスの半値幅は約 60 ps であるが、レーザ



Fig. 1 Schematic of magnetic field measuring system.



Fig. 2 Detection method for high sensitivity.

のトリガ信号のタイミングジッタも位相情報取得の分解能 に寄与するため、パルス幅+タイミングジッタを時間分解 能の指標とする。そこでレーザの発振トリガとする高周波 通電信号の分周器、アンプ、Phase shifter 通過後の矩形波 の立ち上がり時のタイミングジッタの増加についてオシロ スコープで計測した。シグナルジェネレーターより 5.12 GHz、0 dBm の信号を 1/64 分周器に入力し 80 MHz に分 周、また 1.0 Vpp、Offset 0.5 V となるよう増幅しレーザト リガ信号を生成した。この作成した矩形波の立ち上がり時 のタイミングジッタについてオシロスコープで計測した結 果 50 ps~60 ps 程度であった。しかし、もともとのシグナ ルジェネレーターの信号のタイミングジッタが 50 ps 程度 であるため発振トリガ信号によるジッタの増加は10 ps 以 下であると考えられる。よってレーザのパルス幅+レーザ 発振トリガ信号のタイミングジッタ増加の合計 70 ps を本 手法での交流磁界計測の基本的な時間分解能と定めると、

計測する磁界の位相情報取得精度α(%)については、式(1) より被測定磁界周期に対する時間分解能70psの占める割合か ら算出するとTable 1のような結果となる。

α (%)=100 - (時間分解能(ps))/(磁界周期(ps))×100 (1)

3.2 マイクロストリップライン近傍磁界分布計測による検証 実験

提案する手法を検証するため磁界分布の算出が容易な線幅 430µm のマイクロストリップラインの近傍磁界分布を本手法 で計測した。ガーネット薄膜は、マイクロストリップライン に対して、厚さ10µmのサランラップを介して直接取り付 けることで近接させ、623 MHz、8 dBm の信号を印加し、 通電信号を 1/8 分周器で 77.875 MHz に分周及び増幅する ことでレーザトリガ信号として用いた。また、磁界分布取 得に際しマイクロストリップラインを、0.1 µm の分解能を 有する XY ステージに取り付け、マイクロストリップライ ン上 1.00 mm×1.00 mm の範囲を各軸方向に 20 µm ずつ 走査して各位置における磁界強度を計測した。結果を Fig. 3に示す。Fig. 3における電圧出力の大きさは磁性ガーネ ットでの磁気光学効果の大きさ、つまり磁界の強度を表す。 また、Fig.4にFig.3における x=0.5 の時の Y 方向磁界分 布の断面出力を示す。これらの結果より、幅 430 µm のマ イクロストリップラインの両端部に最も大きな出力が確認 でき、設置したガーネットに対して面直方向の発生磁界に 対応して磁界強度分布が取得できていることが分かる。な お、今回 1.00 mm×1.00 mm の計測範囲に対し X-Y ステ ージを 20 µm ずつ走査することで分布を取得したが、X-Y ステージの走査をさらに微小にすることで、より精度よく 高空間分解能な計測が可能である。

3.3 VCO 内部の磁界分布計測

本手法を用いた実証実験として VCO 内部の回路より発 生する漏洩磁界計測を行った。Fig. 5 に VCO 内部の回路 を示す。VCO は 12 Vcc で駆動し、さらに制御 DC 電圧を かけることで制御電圧の大きさに応じた周波数の正弦波信 号を出力する。今回は制御 DC 電圧値を 1.5 V とし、623 MHz、8 dBm の出力信号をレーザのトリガとして用いるべ く、1/8 分周し 77.875 MHz でレーザを発信させた。また Fig. 5 より、磁界計測箇所は破線で示された 623 MHz、8 dBm の信号が出力される端子の近傍の集積回路部とし、 5.50mm×5.50mm の範囲の漏洩磁界強度を X-Y ステージ によって、120μmずつ走査し磁界分布を取得した。なお、 磁界計測箇所は集積素子によって凹凸があるため、集積素 子の厚みを超える、厚さ1.08mmの両面テープによってガ ーネット薄膜を VCO 基板に対して平行になるよう設置し、 計測を行った。結果を Fig. 6 に示す。加えて、取得した磁 界強度分布について 623 MHz の磁界に対応した出力であ るか検討を行うため、VCO 内部基板において、金属性磁界 プローブを近接させ、その漏洩磁界の周波数帯をスペクト ルアナライザにて確認した。その結果、磁界計測範囲にお

 Table 1 Acquisition accuracy of phase information by frequency.

Frequency of mag	Period of mag	Accuracy of phase
1	1000	02
1	1000	93
2	500	86
3	333	79
5	200	65
7	143	51
10	100	30
14.28	70	0



X position

Fig. 3 Measured magnetic field distribution near micro strip line.



Fig. 4 Y direction magnetic field strength at x = 0.5.

いて 623MHz の単一の周波数の漏洩磁界が発生している ことを確認した。これらの結果より、Fig. 6 の磁界強度分 布は 623MHz の漏洩磁界に対応した結果であり、本手法に よる VCO 内部基板の近傍磁界計測結果は妥当であると判 断できる。また、取得した磁界強度分布より、Fig. 6 に黒 破線矢印で表されるラインに電流が流れていることが想定 できる。なお、Fig. 3 の 8dBm、623MHz の同条件におけ



Fig. 5 Internal circuit of VCO.





Fig. 6 Measured magnetic field distribution near circuit of VCO.

るマイクロストリップラインの近傍磁界強度の測定値に対 して出力の絶対値の低下が見られるが、これは磁界発生源 とガーネット薄膜の、それぞれの設置方法による空間的距 離の違いが要因となっている。そのため、Fig.6のストリッ プ線路近傍では、ガーネットからの空間的距離が大きいた め出力が検出されず、対して白破線部の素子近傍はガーネ ットからの空間的距離が小さいため比較的大きな出力が検 出されている。

4 まとめ

パルスレーザと磁気光学効果を用いた磁界計測システム において、レーザと被測定磁界の新たな同期手法を提案し その検討を行った。レーザのパルス幅 60 ps と本手法を用 いた時のレーザ発振トリガ信号のタイミングジッタの増加 10 ps の合計が 70 ps から、計測する被測定磁界の位相情 報における取得精度を評価した。また、磁界分布の算出が 容易なマイクロストリップラインの近傍磁界計測を行うこ とで本手法を使った磁界計測システムの有効性について示 し、その上で電子機器の集積回路から発生する漏洩磁界計測の 実証実験として VCO 内部回路の漏洩磁界の計測を行った。 これらの結果より本手法を用いることで、これまでストロ ボ法を適応する上で問題となっていたレーザ発振と被測定 磁界の同期問題を解決し、実際の電子機器などの集積回路から 発生する磁界の計測が可能あることを示した。

しかし、実際の EMI ではさらに高周波かつ微小な漏洩磁界 の計測技術が求められているため、システムの検出感度の 向上が必要である。これについては、高周波域でより磁気 モーメントの追随する磁性ガーネットの選定や、パルス幅 が狭く高出力のレーザを使用することで、より高周波の微 小な磁界が計測可能なシステムの構築が可能になると考え られる。

References

- H. Asai: Shinkairo Level no EMC Sekkei Noise Taisaku wo Jissen (in Japanese), p. 3, (Kagakujouhou Syuppan, Ibaraki, 2017)
- 2) R. Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility 2nd edition, p. 10, (John Wiley, New York, 2006).
- J. D. Dyson: *IEEE Trans. Antennas Propag.*, AP-21, 446 (1973).
- 4) N. Tamaki, N. Masuda, T. Kuriyama, J. C. Bu, M. Yamaguchi, K. I. Arai: *IEICE Trans. Electron.*, **J87-C**, 335 (2004).
- 5) M. Takahashi, K. Kawasaki, H. Ohba, T. Ikenaga, H. Ota, T. Orikasa, N. Adachi, K. Ishiyama, K. I Arai: *J. Appl. Phys.* 107, 09E711 (2010).
- H. Nasuno, S. Hashi, K. Ishiyama: *IEEE Trans. Magn.*, 47, 4011 (2011).
- 7) J. Takahashi, S. Hashi, and K. Ishiyama: J. Magn. Soc. Jpn., 37, 24 (2013).

2019年10月31日受理, 2020年3月3日再受理, 2020年4月2日採録