

令和元年6月3日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18863

研究課題名（和文）低侵襲高周波磁界計測のための新たな計測方式

研究課題名（英文）New measuring system for low-invasive high frequency magnetic field

研究代表者

石山 和志（ISHIYAMA, Kazushi）

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：20203036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：測定対象物近傍から金属を排した新しい計測方法として、磁気光学効果を用いた方法について研究を行った。ここではその感度を高めるために、パルスレーザーの新しい変調方式を提案し、高い感度を得た。この方式により、パワーアンプチップ近傍の漏洩磁界の可視化に成功するとともに、可搬型のプロトタイプを試作し、展示会でのデモンストレーションを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

携帯電話や無線LANをはじめとする高周波電磁界を利用した機器が広く使われるとともに、それらの電波の干渉による通信障害も生じている。しかしながらこれらの機器が使用するGHzの近傍磁界の計測手法はまだまだ確立していない。なぜなら、磁界センサは信号伝送ケーブルを含めて金属材料で構成されており、そこで発生する渦電流により磁界分布を乱してしまい、正確な測定が不可能になるためである。そこで研究代表者は、測定対象物近傍から一切の金属を排して測定可能な磁気光学効果を利用した方法での高周波次回計測について検討してきている。今回はその高感度化と小型化に着目し、新たな変調方式の利用によりそれを実現した。

研究成果の概要（英文）：I worked on the method using the magneto-optical effect as a new measurement method of removing metals from the vicinity of the measurement object. Here, in order to improve the sensitivity, I proposed a new modulation scheme of pulse laser and obtained high sensitivity. Using this method, we succeeded in visualizing the leakage magnetic field in the vicinity of the power amplifier chip. In addition, I made a portable prototype, and demonstrated it at the exhibition.

研究分野：磁気工学

キーワード：高周波磁界計測 磁気光学効果 EMC

1. 研究開始当初の背景

移動体通信や無線 LAN において、意図せず放出された電磁界は妨害電波となり、通信速度の低下や誤作動を引き起こすことが知られている。特に、放出された電磁界により素子自身が影響を受けるいわゆる「自己中毒」が深刻な問題である。

一般に不要電波の放出を防ぐ、あるいは不要電波から素子を守るためには、シールド技術が用いられ、研究開発は進んでいる。しかしながら、それら技術は不要電波分布の可視化技術と組み合わせて初めてその効果を発揮する。すなわち、シールドを設置すべき場所の確定が必要である。

しかしながら現在、GHz 領域の近傍磁界を正確に測定する手段は存在しない。なぜなら、磁界センサは信号伝送ケーブルを含めて金属材料で構成されており、そこで発生する渦電流により磁界分布を乱してしまい、正確な測定が不可能になるためである。不要電波の発生源から十分に遠い、いわゆる遠方電磁界であれば、校正されたアンテナで電界を計測し空間のインピーダンスから磁界に換算することも可能であるが、素子近傍のいわゆる近傍磁界を素子サイズレベルの空間分解能で知る手段は今のところ皆無である。

2. 研究の目的

従来手法では測定できなかった GHz 帯域の高周波近傍磁界分布を正確に測定するための新たな計測方法を提案するとともに、実証実験により提案の正当性を示すことが本研究の目的である。

提案者らはこれまで、磁気光学素子を用いた磁界計測に関する検討を行ってきた。これは、磁性体のファラデー効果を利用するもので、測定対象物近傍に設置した磁気光学素子にレーザー光を入射し、その偏光面が磁界によって変化することを利用するものである。これにより、測定対象物近くから一切の金属を廃した全く新しい測定システムを構築できる。

本研究では、ファイバプローブタイプの高周波磁界計測システムを構築する。それによりプローブを任意の場所に近づけることでその位置での高周波磁界を計測でき、きわめて汎用性の高い測定手法が開発される。そのためには多くの技術的課題が存在するが、これまでに応募者が挙げた成果を活用し、後述の詳細な研究計画に沿って研究を遂行することにより、課題を解決し目的を達成する。

3. 研究の方法

(1) テーブルトップタイプ(既存)を用いた基礎実験

前述のように、光ファイバー内部を通過する光の偏光面は、ファイバーの曲げ曲率の変化や温度変化により変化する。そのため応募者が提案している計測手法に必要な 1 度以内の偏光面変化測定が困難となる。そこで新たな手法として、180 度位相の異なる 2 点の測定を行い、その差分を信号として利用する新たな方式を提案する。

図 1 は新たに提案する方式の模式図である。ファイバーを曲げる、あるいは温度が変化することで信号が変化するが、GHz 帯域の磁界計測を行う際にはそれはきわめて低い周波数での変化、すなわちドリフトとして検知される。そのため、用いるパルスレーザーの

発光タイミングを制御し、180 度位相のずれた 2 点を測定しその差分をとることにより、ドリフト、すなわちファイバーの曲げなどの影響を廃した測定ができると考えられる。さらに、発光位相を変化させることにより、被測定磁界の波形を測定することも可能になる。

この全く新しいアイデアに基づき、テーブルトップタイプの実験装置を利用した検証実験を行う。そのためには、位相を正確に制御できる外部機器として、高精度ファンクションジェネレータ、シグナルジェネレータ、ロックインアンプ、などを活用した実験装置を構築して実施する。

(2) 磁気光学結晶材料の探索

GHz 帯域の磁界を高感度に計測するためには、高品質な磁気光学結晶の利用が必須である。

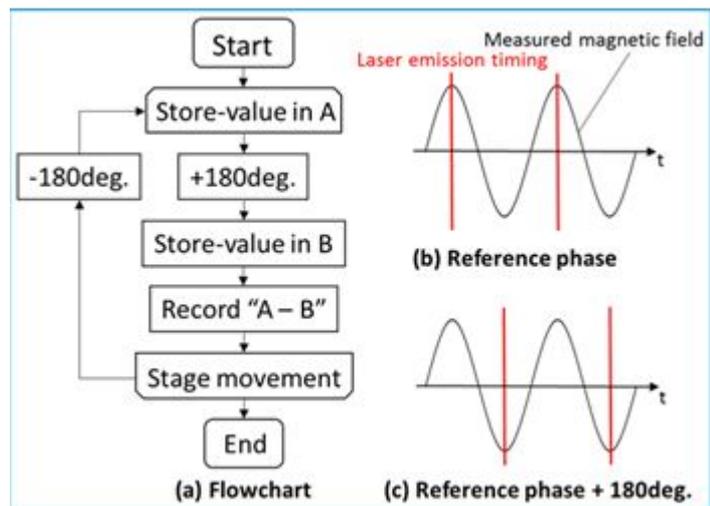


図 1 計測原理の模式図

ここで言う高品質とは、光透過率が高く、ファラデー回転角が大きく、面内に磁気異方性を有し、できるだけ厚いことである。これらの条件は互いに相反するものであるが、入手可能なものから最適なものを選ぶとともに、必要に応じて新たな材料を開発する。

(3) プロープの試作

平成29年度に得られる知見を踏まえて計測用プロープを試作する。最適な特性を有する磁気光学素子を先端に設置し、その特性を評価する。実際の使用環境を踏まえ、先端部分を1mm以下とすることで、1mmの空間分解能を実現する。プロープ試作に当たっては、偏波保持光ファイバーなどの特殊ファイバーについても調査し、最適なファイバーを選択する。またファイバー先端部の加工については、きわめて精密な調整が必要であることから、基本特性を明確化した後、必要に応じて外注で試作する。

(4) 磁気光学素子が具備すべき特性の明確化

磁気光学素子の磁気異方性と測定帯域に関する検討を行い、次世代移動体通信に用いられる10GHzまでの帯域の計測を目指して、磁気光学素子が具備すべき特性を明確化する。応募者はすでに磁気異方性と高周波磁気特性の関係について多くの知見を有しており、それを踏まえて検討を行う。

最適な特性を有する磁気光学結晶を選択し、3. で試作するプロープと組み合わせて計測用プロープを実現する。

(5) 計測装置プロトタイプを試作

ここまで得られた知見を組み合わせることにより、プロープタイプの高周波磁界計測装置のプロトタイプを製作し、特性を評価する。

試作したプロトタイプは、東北大学イノベーションフェア、JASIS、など、応募者がすでに出展経験のある展示会に出展し、広く周知を図るとともに、東北大学産学連携機構、および他の研究開発で連携している東北経済連合会ビジネスセンターを通じて、本研究で得られる全く新しい計測技術を企業に対して積極的にアピールする。

4. 研究成果

上記(1) - (5)の実験方法に沿って研究を実施した。ここでは紙面の都合上、その一部について記載する。そのため項目番号は前項と一致していない。

(1) 変調方式の検討

実験方法の項で示した検出方式は、実際に計測可能であったものの1点のデータを得るために2回の計測が必要であることから、トータルの測定時間が長くなることが実用上の問題点となった。そこで新たな変調方式を検討した。

パルスレーザ側の変調手法として、レーザ入力トリガ信号 BPSK 変調方式を提案した。この変調方式を順を追って説明する。図2のように相対的に位相関係がずれた2信号を半導体スイッチ (Keysight

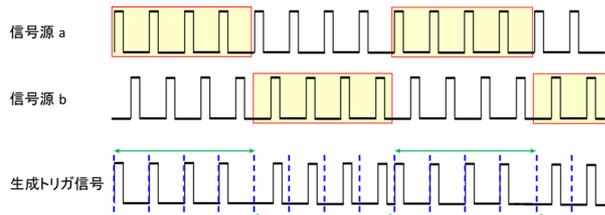


図2 2信号源のスイッチングと生成トリガ信号



図3 レーザ発振と被測定磁界の位相関係

Technologies, U9397A 半導体スイッチ, 300kHz~8GHz, SPDT) で周期的に切り替えることで、群単位で周期的に位相が偏移した信号が生成される。この信号をパルスレーザ発振の外部トリガ信号として入力することで、パルスレーザ発振タイミングを図3のように、1つ目の群だと被測定磁界の正のピーク位相、2つ目の群だと負のピーク位相に合わせて発振させることが可能である。これによってガーネット膜の表面形状等の影響は直流成分となり、機器のドリフトの影響はSPDTのスイッチング周波数であるサブミリ秒程度に抑えられるので、発生磁界の正のピーク磁界と負のピーク磁界によるファラデー回転の差のみが交流成分となり、ロックインアンプで検出することができる。さらに、SPDTに入力する2信号は位相関係を任意に制御できるので、パルスレーザ発振の一方の位相群を固定し、他方の位相群を連続的にずらすことで、高周波磁界も含んだ位相情報の取得も可能である。

(2) 新しい変調方式を利用した高周波磁界計測

前項でレーザ入力トリガ信号 BPSK 変調方式は、パルスレーザ光バースト変調方式では困難であった高周波磁界の計測を実現しながら、被測定回路を通常駆動させ発生磁界のみを検出する手法として極めて有望であることが明らかになった。そこで、この方式を用いた検出器を構成し、実験によりその有用性を確認した。ここでは特に、検出限界感度を中心に述べる。

検出限界感度の算出方法

計測システムの感度評価として、検出限界感度を実験的に算出した。算出方法は、MSLは導電部の端に垂直方向成分最大磁界が発生するので、レーザの入射位置を固定し、MSLに10dBmのRF電力を印加したときの磁界波形を各周波数で測定した。この磁界波形の V_{peak} はファラデー回転量と受光光強度の乗算に比例する値であり、この値を S と定めた。また、各周波数における一定時間内のノイズレベルを計測し、この値を N と定めた。これより検出限界感度、即ち発生磁界による検出値がノイズレベルに埋もれるMSLへの最小入力電力 L [dBm]は式(1)で表すことができる。

$$L \text{ [dBm]} = 10 \text{ [dBm]} - 20\log(S/N) \text{ [dB]} \quad (1)$$

この値を各周波数で算出し、検出限界感度とした。この評価において、照射したレーザ光強度は規格化して比較している。

実験方法

計測システムの簡易構成を図4に示す。2ch ファンクションジェネレータを用い、相対的に位相がずれた信号をSPDTに入力し、10kHzの信号をスイッチングの制御信号としてSPDTへ入力することで、レーザ入力トリガ信号のBPSK変調を行った。また、10kHzを基準参照信号としてロックインアンプへも入力した。

本変調方式の妥当性を実験的に確かめるために、MSL近傍磁界分布測定と計測システムの感度評価を行った。

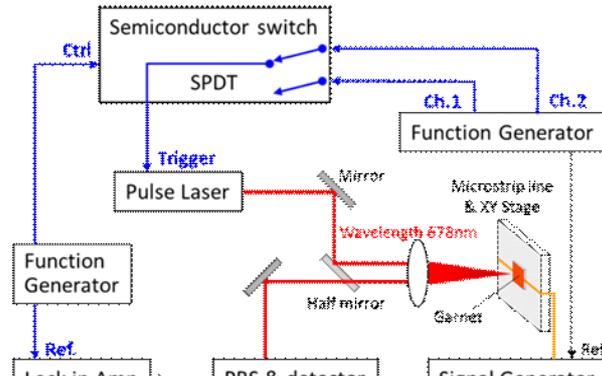


図4 レーザ入力トリガ信号BPSK変調方式時の計測システムの簡易構成

磁界分布測定と検出感度

MSLにRF 1GHz, 19dBm印加し、MSL近傍1.5mm四方の磁界分布を測定した結果を図5に示す。分布測定結果から、磁界バースト変調方式と同様に近傍磁界分布を明瞭に再現できていることを確認でき、本方式の妥当性を証明できる。

次に、レーザ入力トリガ信号BPSK変調方式と従来法の磁界バースト変調方式の検出限界感度を比較した結果を図6に示す。この結果から、本変調方式は磁界バースト変調方式とほぼ同等の検出感度を有しており、懸念していたSPDTのスイッチングに伴うノイズの影響はほぼないことが確認できる。この結果から、本変調方式は回路を侵襲しない変調方式であり、かつS/Nの低下もないため、従来法の上位互換の変調方式であるといえる。

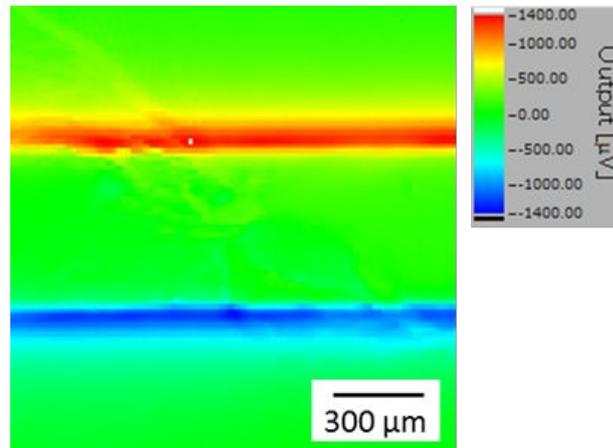


図5 MSL近傍磁界分布計測結果

以上の結果より、レーザ入力トリガ信号BPSK変調方式を適用して磁界検出が可能であるか実験的に検証することで、新規変調方式の妥当性を示した。この方式を適用することで、被測定回路の駆動を干渉せずに計測が可能である。また、計測システムの検出限界感度を算出し、GHz帯を含む広帯域で検出感度0.1mOep-pを高空間分解能を維持しながら実現した。

この方式を利用して、パワーアンプチップ周辺磁界分布を計測した。その結果を図7に示す。出力端子部分に大電流が流れていることが想定される磁界分布が計測されており、不要電波対策をするべき箇所の可視化ができていることが明らかであり、本研究の目的を達成したものである。

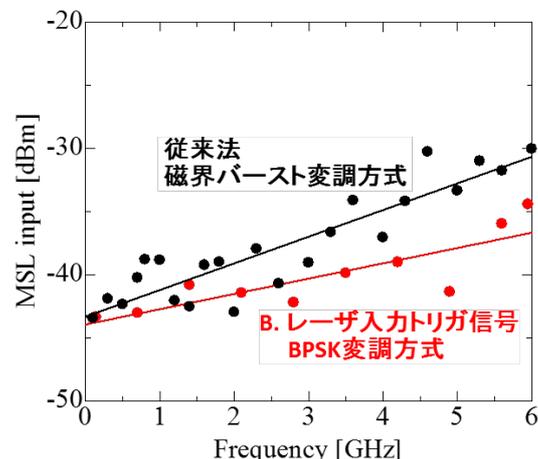


図6 MSL入力電力値より算出した検出限界感度

可搬型プロトタイプ試作

前項までで得られた知見をもとに、可搬型磁界測定装置をプロトタイプとして試作した。図8に示すように可搬可能なプロトタイプを試作し、その能力を検討した。その結果、テストベンチにおいて可搬型プロトタイプ(光プローブ)を用いて高周波漏洩磁界が計測可能であることを明らかにした。また、感度についても検討を行い、光学定番上に構築したデスクトップタイプとほぼ同程度の感度を有することを明らかにした。

以上の結果より、本研究においては当初の目的以上の成果を上げて終了することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

石山和志 「ファラデー効果を利用した高周波磁界計測」日本磁気学会研究会 / 磁気センサ専門研究会 (2019.3.18, 東京)

K. Ishiyama, “Magnetic Near Field Measurement by Pulsed Laser” PIERS2018 (2018.8.1-2, 富山)

石山和志 「光プローブ高周波磁界計測における変調方式に関する検討(招待講演)」電子情報通信学会 PEM 研究会 (2018.7.26, 東京)

K. Ishiyama, “Visualization of RF magnetic near-field (invited)” ETOPI11 (2018.7.16-19, Krakow Poland)

D. Tatsuoka, Y. Matsumoto, S. Hashi and K. Ishiyama, “RF magnetic near-field measurements with magneto-optical effect” ETOPI11 (2018.7.16-19, Krakow Poland)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

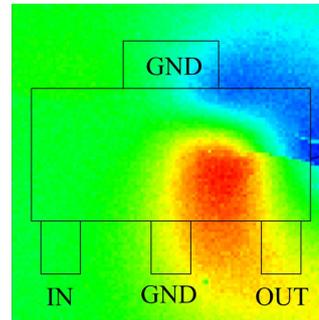
6. 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

パワーアンプからの漏洩磁界分布測定



1GHzの高周波磁界を測定



パワーアンプ位置

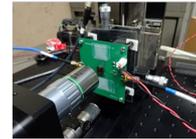
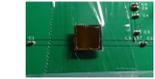


図7 パワーアンプチップ周辺磁界測定結果



図8 試作した可搬型プロトタイプ写真