

FM-OFGによる周波数選択性を備えた高周波磁界の高感度検出法

笹田一郎
(笹田磁気計測研究所)

Selective detection of high frequency magnetic field by using a fundamental mode orthogonal fluxgate
Ichiro Sasada (Sasada Magnetics and Sensors Lab)

はじめに

10 kHz~1 MHz帯の高周波磁界の検出にはpickup coilを用いるのが簡単であるが、磁界の振幅がpT程度になると細長いコアに数千~数万ターンの巻線を施したインダクションマグネトメータ[1]が用いられる。本稿では直径が4 cm、巻き数80ターンのpickup coilと基本波型直交フラックスゲート(以下FM-OFG)を用いて、周波数選択性を備え、1 pT程度の高周波磁界を平均化なしで検出する方法を報告する。

センサの構成

Fig. 11にFM-OFGによる高周波磁界検出法を示す。通常と異なる点は、観測したい高周波磁界の周波数 f_s 近傍にFM-OFGの駆動周波数 f_c を設定する。そして結果は $|f_c - f_s|$ の周波数にダウンコンバートされて出力される。FM-OFGは通常の低周波磁界にも応答するので、pickup coil、増幅器、電圧から電流へ変換する抵抗、センサヘッドに磁界を入力するコイルとセンサヘッドをシールドする磁気シールドを用いる。

実験結果

直径59 cmの磁界発生コイルに0.5 μ A, $f_s=54.101$ kHzの電流を流し、その中心に直径4 cm 80ターンのpickup coilを置き、FM-OFGの励磁周波数 $f_c=54.1$ kHzとした。通常の室内環境であるのでFig. 2に示す様に種々の環境磁界が存在する。検出試験のための磁界はFig.2中に矢印で示しているが、他のスペクトル中に埋没しているように見える。検出結果は $|f_c - f_s|=1$ Hzに現れ、Fig. 3に示す。-10秒のところでコイルに0.5 μ Aを通电しているが、対応して1 Hzの波形が現れている。

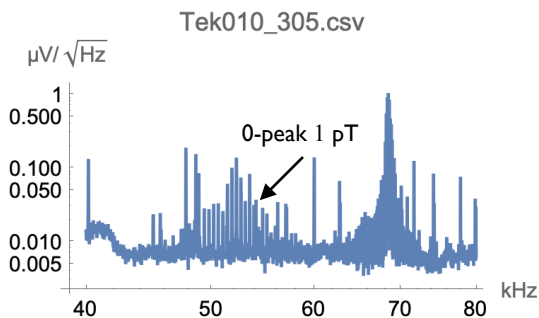


Fig. 2 Environmental magnetic fields and test input field at 54.101 kHz, pointed by an arrow. Observed by a D=4 cm, 80 turn pickup coil with 100 times amplifier.

参考文献

- 例えば, R. J. Prance et. al. Rev. Sci. Instrum., Vol. 74, No. 8, August 2003

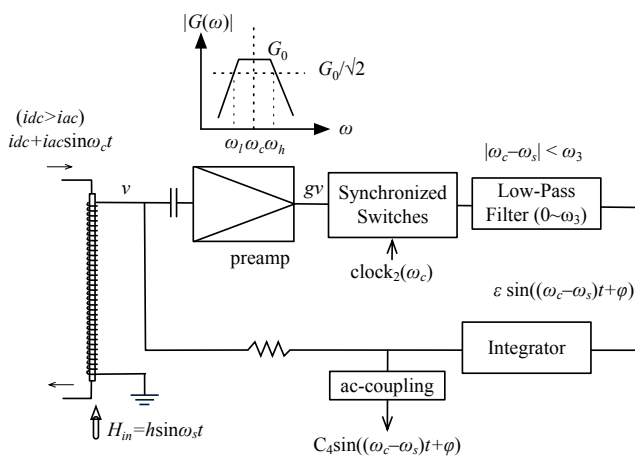


Fig. 1 FM-OFG for a high frequency detection, where ω_c is close to ω_s .

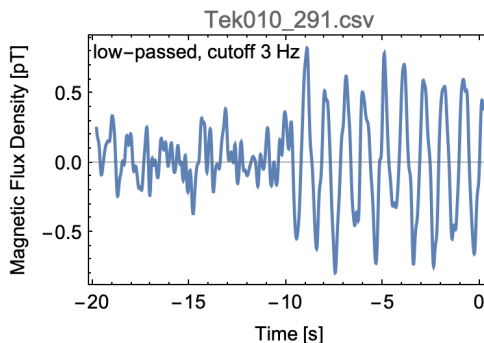


Fig. 3 1 pT magnetic field of $f_s=54.101$ kHz is detected as 1 Hz. The 1 pT magnetic field is turned on in the middle of the time window.

磁性ガーネット薄膜の高周波応答の評価

栢 修一郎, 吉原幹太, 齊藤悠一*, 石山和志**

(東北学院大, *ランカスター大, **東北大)

Evaluation of high frequency response for magnetic garnet film

S. Hashi, K. Yoshihara, Y. Saito*, K. Ishiyama**

(Tohoku-Gakuin Univ., *Lancaster Univ., **Tohoku Univ.)

はじめに

パルスレーザーと磁性ガーネットの磁気光学効果を組み合わせた高周波近傍磁界の測定法について検討を行っている^{(1),(2)}。時間分解磁気光学効果測定法の適用により測定磁界の位相情報の測定も可能であり、より高い周波数帯域の磁界測定のため、フェムト秒レーザーを導入した測定システムを構築した。しかしながら、磁界センサとして用いている磁性ガーネット薄膜の磁気光学効果の高周波応答に依存することから、今回その評価を行ったので報告する。

実験方法及び結果

構築した測定システムの構成図を Fig. 1 に示す。光源にはフェムト秒レーザー (波長: 1030nm, パルス半値幅: 約 200 fs., 繰り返し周波数: 約 40MHz) を用いた。今回は SHG (Second Harmonic Generation: 光第二高調波発生) 結晶により 515nm へ波長変換した光を測定に用いた。磁界検出に用いる磁性ガーネット膜は単結晶の面内等方磁化膜で、表面には誘電体多層膜から成る反射膜が形成されており、反射膜側を底面として MSL (Microstrip line) 上に配置する。直線偏光されたレーザー光を 50 倍の対物レンズを通してその焦点が MSL の片側の端部付近直上に合うように垂直入射する。高周波磁界印加時の MSL 端部付近に生じる磁界により、ガーネット膜面直方向への磁化の立ち上りに応じたファラデー効果により、偏光状態が変化した反射光をプリズムで分離した後、フォトディテクタで差動検出 (バランス検出) する。またレーザーの発光の繰り返し周波数と MSL に印加する高周波信号を同期することで、繰り返し周波数の整数倍の周波数の特定位相でのみレーザーが発光する。さらに高周波信号を低周波のパルスで変調し、その変調周波数をロックインアンプの参照信号としてディテクタの出力電圧を計測する。

アルミナ基板上に形成した長さ 10mm, 線幅 95 μ m の MSL に、レーザーの繰り返し周波数の整数倍の周波数の信号を印加し 40GHz まで変化させたときのファラデー回転角の測定結果を Fig. 2 に示す。周波数の上昇に伴いファラデー回転角は減少していくことがわかる。但し、用いた MSL の反射特性の測定結果より、周波数の上昇に伴って反射の値が大きくなることから、MSL 端部に生じる磁界強度も低下しているものと思われる。ガーネット膜の高周波応答特性の評価には、さらなる検討が必要であると思われる。

参考文献

- 1) H. Nasuno, S. Hashi, K. Ishiyama: IEEE Trans. Magn., 47, 4011~4013 (2011)
- 2) 栢修一郎・齊藤悠一・石山和志: 令4電気学会A部門大、15-A-p1-5

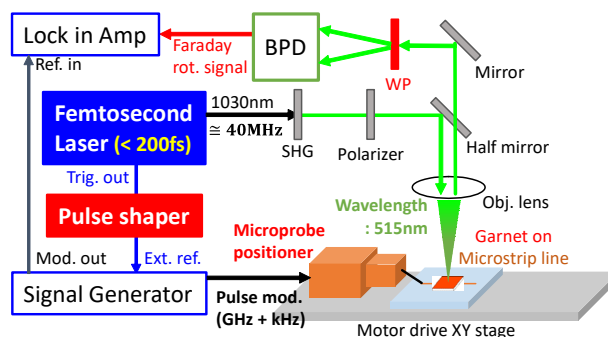


Fig. 1. Schematic diagram of measurement system

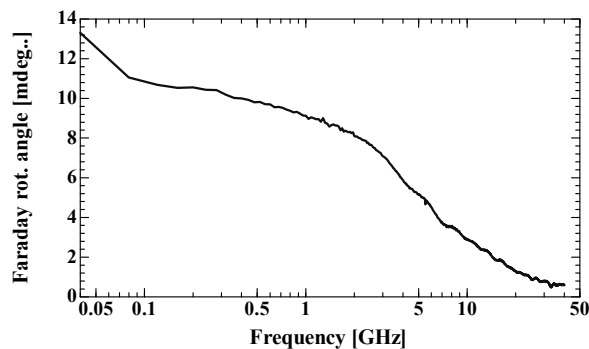


Fig. 2. Frequency dependence of Faraday rotation angle for magnetic garnet film up to 40 GHz

シールドドループコイル法による高周波透磁率測定の高帯域化

中村貴志 佐藤裕磨 板垣篤 宮澤安範* 山口正洋*
(凌和電子 *東北大)

Higher-frequency permeability measurement using shielded loop coil method

T. Nakamura, Y. Sato, A. Itagaki, Y. Miyazawa*, M. Yamaguchi*

(Ryowa Electronics Inc. Tohoku Univ.)

まえがき 高周波磁性材料は、マイクロ波～ミリ波帯で動作する 5G 以降の無線通信機器の誘導部品および電磁ノイズ抑制体の新しい候補材料である。それらの比透磁率は 10 未満と想定されるため、従来、高透磁率材料を前提として開発された透磁率測定装置に対して、低透磁率対応と高周波対応が同時に必要である。本論文では、シールドドループコイル(以下、SLC と略す)型透磁率測定法¹⁾による測定可能帯域を 13.5 GHz²⁾から 20 GHz 以上に拡張するとともに、低透磁率試料の測定にも対応可能としたので報告する。

装置構成と実験結果 SLC 型高周波透磁率測定装置は、側面解放型 TEM セル内部に生じる磁界を励磁源として、短冊状試料を面内方向に励磁し、試料の磁束変化を試料周囲に配置された多層平面 SLC で検出する。VNA から TEM セルへ励磁し、SLC からの検出信号を受信信号とし、 s_{21} から複素比透磁率を算出する。TEM セルは整合終端させるため試料には進行波電磁界が印加される。SLC は電界除去機能を持ち磁界成分のみを検出可能である。

高帯域化と低透磁率対応の基本指針は、治具の小型化である。各 부품の寸法を製品¹⁻²⁾の 4 分の 1 とし、Fig. 1 のとおり試作した。ただし多層プリント配線板上のビアホール寸法には制約があり、指針通りには小型化していない。また K コネクタ (40 GHz) は従来の SMA コネクタ (18 GHz) と同寸のため、TEM セルのコネクタ接続部の基本寸法は不変とした。

一方、校正測定における直流磁界により試料を十分磁気飽和させることが測定精度を高めるために有用である。従来、ヘルムホルツコイルでは 0.1 T、電磁石では 0.5 T を印加可能であったが、本研究では 5 T まで印加可能な超伝導磁石を導入し、直径 50 mm、長さ 500 mm の鏡筒に、試料と測定治具を収めた。

カルボニル鉄コンポジットシートの複素比透磁率を超伝導磁石の鏡筒内で測定し、Fig. 2 にその実部を直流磁界強度に対して示した。試料の設計充填率は 40 vol.%、長さ 4.0 mm、幅 0.8 mm、厚さ 130 μm で、基材は厚さ 500 μm の PET である。磁界強度が 3 T 以上の場合に比透磁率が 1 となり、試料を十分飽和できたことが分かる。これより超伝導磁石の有用性が明らかである。

超伝導磁石による実験にご協力頂いた東北大学・薮上・桑波田研究室の皆様へ感謝します。本研究は、総務省電波資源拡大のための研究開発「不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(JPJ000254)の補助を受けた。

参考文献

- 1) M. Yamaguchi, Y. Miyazawa, K. Kaminishi, Ken-Ichi Arai, Trans. Magn. Soc. Japan, 3, 137-140 (2003).
- 2) M. Naoe, N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Iwasa, K-I Arai, H. Masumoto, JMMM, 391, 213-223 (2015).

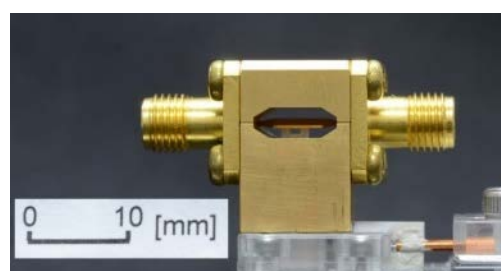


Fig. 1 New jig for ≥ 20 GHz measurements

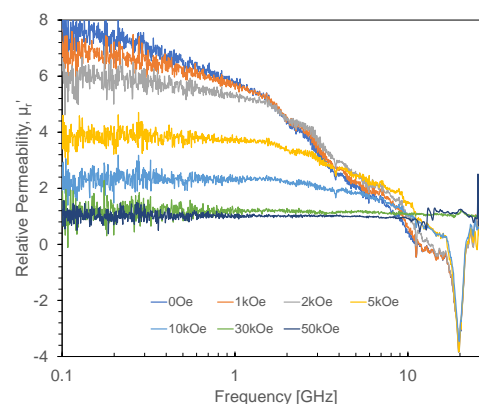


Fig. 2 Measured real part relative permeability of a Carbonyl Iron Powder composite sheet

Bi,Ga 置換 Eu ガーネットの磁化および角運動量補償組成

朝野 航¹、M. A. A. Masud¹、西 敬生²、大島大輝³、加藤剛志³、李 基鎮⁴、河原正美⁵、
Fatima Zahra Chafi¹、西川雅美¹、石橋隆幸¹

(¹長岡技科大、²神戸高専、³名古屋大学、⁴西江大学、⁵高純度化学)

Compensation compositions for magnetization and angular momentum in Bi, Ga-substituted Eu garnets

W. Asano¹, M. A. A. Masud¹, T. Nishi², D. Oshima³, T. Kato³, K. Lee⁴, M. Kawahara⁵,
F. Z. Chafi¹, M. Nishikawa¹, T. Ishibashi¹

(¹Nagaoka Univ. Tech., ²Kobe City College Tech., ³Nagoya Univ., ⁴Sogang Univ., ⁵Kojundo Chem.)

1. はじめに

我々はこれまでに、Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe₅O₁₂ 薄膜を開発し、磁気光学イメージングにおいて 6 GHz の周波数まで可視化することに成功している⁽¹⁾。しかし、さらに高い周波数の測定を高感度に行うためには、高周波特性の改善が必要である。高周波特性を向上させるには、強磁性共鳴の周波数を向上させる必要があるが、フェリ磁性体においては、角運動が消失する角運動量補償組成付近で、強磁性共鳴が大きく増大することが知られている。先行研究で EuBi₂Fe_{5-x}Ga_xO₁₂ (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) 薄膜を作製・評価を行い、Ga 置換量 1 付近に角運動量補償組成があると考察した。そこで今回は、EuBi₂Fe_{5-x}Ga_xO₁₂ (x=0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4) 薄膜を作製し、強磁性共鳴(FMR)測定による評価を行った結果について報告する。

2. 実験方法

EuBi₂Fe_{5-x}Ga_xO₁₂ (x=0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4) 薄膜は、MOD 溶液(BiFeEu(2/5/1)、BiFeEuGa(2/3/1/2)、高純度化学研究所)を各 Ga 置換量に調製した溶液を、Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG) (100) 基板上に滴下、スピンドーターで 3000 rpm、30 秒間の条件で塗布した。その後、ホットプレートを用いて 100 °C で 10 分間乾燥、450 °C で 10 分間仮焼成を行った。一連の操作を 5 回繰り返した後、マッフル炉を用いて 770 °C で 3 時間本焼成を行った。FMR 測定は、マイクロ波周波数 9.09 GHz、掃引磁場範囲 0-10 kOe、マイクロ波出力 5 mW、磁場印加角度 $\beta = 0-180^\circ$ (面直方向を 0°) として行った。 β を変数として共鳴磁場 H_{res} を数値的に解き、実験で求めた H_{res} の β 依存性に対して最もいいフィッティング曲線を与える数値として結晶磁気異方性定数 K_1 、一軸誘導磁気異方性定数 K_u 、および磁気回転比 γ を求めた⁽²⁾。

3. 結果および考察

Fig.1 に FMR 測定より求めた有効磁気異方性定数 K_{eff} 、および γ を示す。Ga 置換量 1.2, 2 では、FMR スペクトルのピークが他のものと比べ非常に小さく共鳴磁場を確認することができなかった。Ga 置換量 0~1.5 では、 K_u は負の値を示し、結果として K_{eff} が負の値を示した。このことは磁気光学イメージングに用いる際に必要な面内磁気異方性を有していることを意味する。また、Ga 置換量 0.9 の γ が 2.56 MHz/Oe だったのに対し、Ga 置換量 1 の γ は 4.69 MHz/Oe と約 1.84 倍に増加した。この理由は、Ga 置換量 0.9 から 1 の間に角運動量補償組成が存在しているためであると考えられる。詳細は、当日報告する。

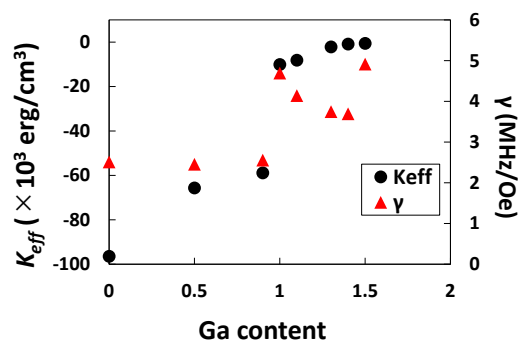


Fig.1 K_{eff} and γ of EuBi₂Fe_{5-x}Ga_xO₁₂ thin films with Ga content of 0 - 2 measured at $\beta = 0^\circ$.

謝辞：本研究の一部は、JSPS 二国間交流事業(JPJSBP120208805)、名古屋大学未来材料・システム研究所共同研究の支援を受けて実施された。

参考文献

(1) T. Ishibashi, J. Magn. Soc. Jpn., **44** (2020) page.108 - 116 (2) R. Urakawa *et al.*, AIP. Adv., **12** (2022) 095322-1 - 8

数 MHz 域における磁化過程の測定

田中大暁, 萬年智介, 磯部高範, 喜多英治, 柳原英人
(筑波大)

Measurement of magnetization process in several MHz range

H. Tanaka, T. Mannen, T. Isobe, E. Kita, and H. Yanagihara
(Univ. of Tsukuba)

1 はじめに

現在, パワーエレクトロニクス分野では, 高速スイッチングが可能な次世代パワー半導体デバイスの活用が進んでいる。これに伴い, 受動素子にも高周波動作への対応が求められている。低損失なインダクタ, トランスなどを実現するためには, 高性能なコア材料の開発が必要である。したがって, 高周波かつ大振幅磁界下における磁化過程を測定し, 特性を評価する技術が不可欠である。

これまでに我々は, LC共振を利用した励磁コイルと1次微分型ピックアップコイルを用いて, 周波数 3.7 MHz, 振幅 0.15 T の交流磁界に対する YIG の磁化過程を測定し, これをもとに装置の較正が可能であることを確認している¹⁾²⁾。しかし, 測定信号に重畳する寄生信号により, より高い精度で損失評価を行うことは困難であった。そこで本研究では寄生信号を抑制した測定系を構築することで改善を試みた。さらにフェライト試料に対して数 MHz 域における磁化過程を測定したので報告する。

2 実験方法

Fig.1 に本研究で構築した $M-H$ 測定装置の概要を示す。励磁コイルは空芯ソレノイドとセラミックコンデンサの直列回路から成る。励磁コイルの電源には, GaN-HEMT を用いたフルブリッジインバータを利用しており, 励磁コイルの共振周波数に近い矩形波電圧を印加することで, 大振幅の正弦波電流を流す。

試料の磁化の検出には, 1次微分型ピックアップコイル (PUC) を用いた。本研究では直径 2 mm の1回巻コイルを 2.5 mm 離して逆方向に巻いたものを作製し, これを励磁コイルが作る磁界の誘導起電力がキャンセルする位置に固定した。測定試料を片方のコイルの中心にセットすることで, 試料の磁気モーメントのみの時間変化による誘導起電力が検出されることになる。

装置の較正試料として直径 0.5 mm の球状単結晶 YIG を用いた。YIG は良好な絶縁物であるため, 高周波域においても渦電流の影響は十分に無視できる。また, 試料形状が球状であることから反磁界補正も容易である。飽和磁化を M_S とすると真球状試料の飽和磁界は, $\mu_0 H_S = M_S/3$ となる。YIG の M_S として文献値を用いて, 磁化飽和領域まで測定した $M-H$ 曲線から, 磁気モーメントおよび試料位置における磁界の値の較正が可能となる³⁾⁴⁾。

3 結果および考察

Fig.2 に 3.7 MHz の交流磁界と, VSM を用いて測定した直流磁界に対する YIG 較正試料の磁化曲線を示す。両者の磁化曲線を比較すると, 飽和に至るまでの全般的な特性はよく一致している。本試料の M_S は既知であるので, 装置で測定した M および H の較正が可能であることを確かめた。また, 較正試料の測定結果をもとに, 本装置を用いてインダクタコアに用いられるフェライト粉末について数 MHz 帯における磁化曲線を測定した。講演ではこれについても紹介する。

参考文献

- 1) 森賢太郎, 萬年智介, 磯部高範, 喜多英治, 柳原英人: 電磁環境/半導体電力変換合同研究会 EMC-21-043, SPC-21-163 (2021).
- 2) 金井雄平, 森賢太郎, 萬年智介, 磯部高範, 喜多英治, 柳原英人: 電気学会全国大会講演論文集, 2-074 (2022).
- 3) P. Lenox, L. K. Plummer, P. Paul, J. E. Hutchison, A. Jander, and P. Dhagat: *IEEE Magnetics Letters*, **9**, 6500405 (2017).
- 4) R. Onodera, E. Kita, T. Kuroiwa, and H. Yanagihara: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, 065003 (2022).

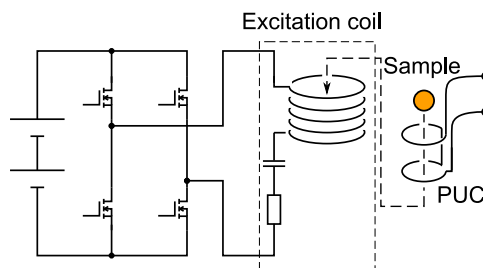


Fig. 1 Diagram of developed measurement system.

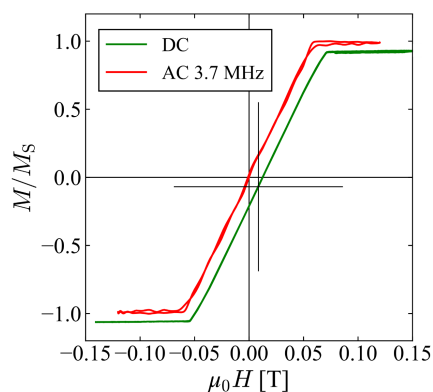


Fig. 2 AC and DC hysteresis curves for YIG sphere sample.

位相情報を含んだ近傍磁界測定によるクロストーク観察

菅原 祐介^{1,2*}, 後藤 太一², 石山 和志²

(¹東北大学大学院 工学研究科, ²東北大学 電気通信研究所)

Observation of Crosstalk by Near Magnetic Field Measurement Including Phase Information

Yusuke Sugawara^{1,2*}, Taichi Goto², Kazushi Ishiyama²

(¹Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., ²RIEC, Tohoku Univ.)

1. はじめに

電子基板中の素子の高密度化や電流の高周波化が進むに伴い、ノイズ対策として高周波近傍磁界測定技術が重要になっている¹⁾。そこで我々の研究室では、磁気光学結晶とレーザを用いた低侵襲な磁界測定を検討している。提案手法はプローブが非磁性であるため磁界に対する侵襲性が低く、パルスレーザを使用することでストロボ法により位相情報を含んだ磁界測定が可能なが特徴である²⁾。これらの長所を活かした磁界測定により、ノイズ電流の周波数や強度に加えてその波形や特徴を取得することで、ノイズ源や伝搬経路の特定が容易になると期待される。本報告では、ノイズの一種であるクロストークについて本手法により位相情報を含んだ磁界測定を行った結果を述べる。

2. 実験方法

Fig. 1 に測定対象のマイクロストリップライン(MSL)を示す。2本のMSLの線幅は2.3 mm、特性インピーダンスは50 Ω、線間は0.5 mmである。それぞれのMSLを加害者線・被害者線とし、加害者線にはシグナルジェネレータから信号を入力し片側を50 Ω終端、被害者線は両端を50 Ω終端した。Fig. 1 に点線で示した範囲に磁性ガーネットを近接させレーザを照射すると、磁気光学効果により磁性ガーネットが受ける垂直磁界強度に応じてレーザの偏光面が変化する。よって偏光面の変化した光を検出することで垂直磁界強度が測定可能となる。今回は Fig. 1 に点線で示した範囲について、加害者線へ24 dBm、1 GHzの正弦波を入力した際の基板垂直方向の磁界分布を入力信号の位相ごとに測定した。

3. 結果・考察

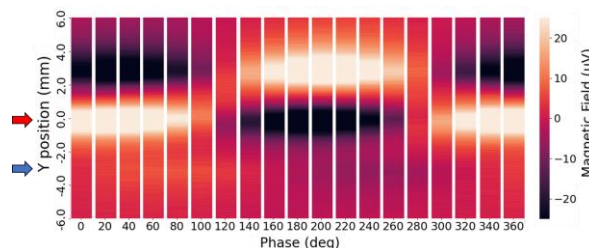
Fig. 2(a)に位相ごとの磁界分布測定結果を示す。縦軸は Fig. 1 に示した Y 軸、横軸は入力信号の位相である。加害者線の両端部である Y = 3.0, 0 mm 付近で互いに逆位相の磁界が確認でき、また被害者線の下端部である Y = -3.0 mm 付近でも強度が低いものの磁界が確認できる。Fig. 2(b)は Fig. 2(a)に矢印で示した加害者線と被害者線の磁界強度を取り出し、縦軸に磁界強度、横軸に位相をとってプロットしたグラフである。グラフから被害者磁界の位相は加害者のものから 50 deg 程度遅れていることが伺える。測定結果はシミュレーション結果と整合性があり、提案手法によって電子基板中のノイズの波形や特徴を検出可能であると示すことができた。

4. 参考文献

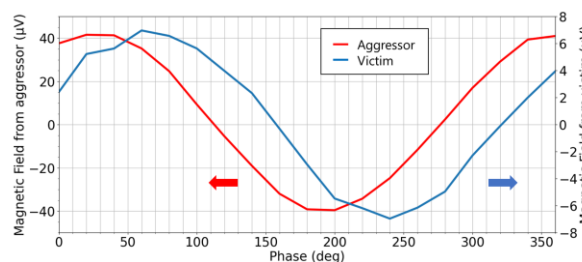
- 1) 浅井秀樹, 「新回路レベルの EMC 設計」, 2017.
- 2) 荻田健徳, 石田竜太, 後藤太一, 石山和志, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 7, No. 1, pp. 40-44, (2023).



Fig.1. Microstrip lines used for measurements.



(a) Colormap of measured magnetic field.



(b) Magnetic field waveforms of aggressor and victim.

Fig.2. Measured magnetic field distribution.