

# 磁気光学効果測定を目的としたコリニア位相干渉光学系の設計

高木宏幸, 高木田 耕作, 橋本良介, 後藤太一, 井上光輝  
(豊橋技術科学大学)

## Design of Collinear Interference Optical System for Magneto-optic Effect Measurement

H. Takagi, K. Takakida, R. Hashimoto T. Goto, M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology)

### はじめに

磁気光学効果は磁性体の磁化方位に応じて直線偏光が回転する現象である。これは磁化状態によって左右円偏光の位相差が生じるためである。位相差を高感度で測定する手法にマイケルソン干渉計があるが、参照光と物体光が別の光路を通るため、空気の揺らぎや振動等の外乱の影響を受けやすい。本研究では、参照光と物体光を同軸とすることで外乱に対して影響を受けにくいコリニア位相干渉光学系を提案し、その原理実証としてシミュレーションを用いて磁性体の位相変調の検出を行った。

### 実験方法および結果

本研究で提案するコリニア位相干渉光学系を図1に示す。参照光と物体光が同軸上を伝搬するため、外乱に対して影響を受けにくい。参照光と物体光の生成にはフレネルゾーンプレートを用いる<sup>1)</sup>。参照光は、試験体表面(焦点距離 $f=45\ \mu\text{m}$ )の一点に集光して位相の基準値となる。物体光は、フレネルゾーンプレートで回折せずに透過し、試験体に垂直に入射する。両者の反射光は、再びフレネルゾーンプレートを通じた後、同一のベクトルを伝搬することで位相干渉を起こし、試験体表面で生じる位相変調を測定する。コリニア位相干渉光学系の原理実証として、有限要素法解析ソフト(COMSOL Multiphysics ver.4.3a RF Module)を使用して電界計算を行い、干渉光強度の変化から位相差を検出できることを検討した。シミュレーションモデルはビームスプリッター、フレネルゾーンプレート、試験体、光強度測定面から構成され、入射光として同一平面の2箇所から波長 $532\ \text{nm}$ 、幅 $4\ \mu\text{m}$ の光を平行に入射する。試験体はアルミニウムの一部を鉄に置き換えた構造とし、光源の片側の入射位置に幅 $5\ \mu\text{m}$ の鉄を設けた。磁性体の磁化の大きさは、鉄の飽和偏光面回転角である $0.34\ \text{deg}$ まで段階的に設定した。物体光と参照光の干渉光強度は、光強度測定面で測定した。鉄の磁化方向は膜厚方向上下の2通りとし干渉光強度の差分値を取得した。

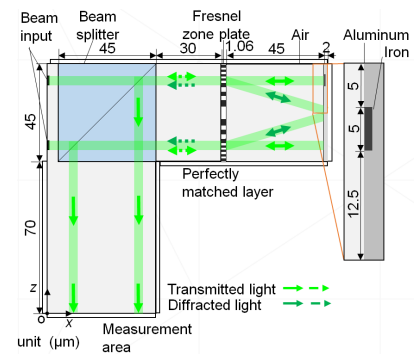


図1 コリニア位相干渉光学系

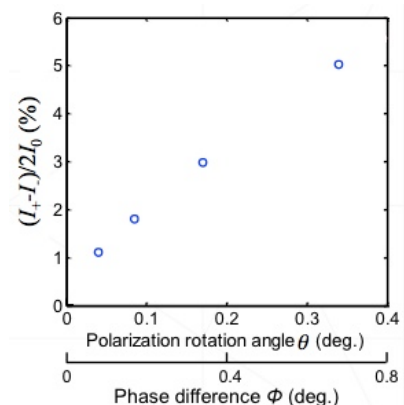


図2 位相変調検出のシミュレーション結果

磁気光学効果による位相変調のシミュレーション結果を図2に示す。図2は鉄による偏光面回転角 $\theta$ (左右円偏光の位相差 $\phi$ )に対する $(I_+ - I_-)/2I_0 \times 100$ の大きさである。ここで $I_+$ と $I_-$ は鉄の磁化が膜厚方向上下の時の干渉光強度、 $I_0$ は鉄の偏光面回転角が $0$ の時の干渉光強度である。図2より、干渉光強度は鉄の偏光面回転角によって変化しており、干渉光強度から磁性体の磁気光学効果を検出できることが示された。

以上より、本光学系を用いて数 $\mu\text{m}$ オーダかつ、 $0.3\ \text{deg}$ 程度の位相差(偏光面回転)の磁性体の磁気光学特性を測定できると考えられる。

参考文献 1) H. Tashiro, et al., JSPE, vol. 62, (1996) 393

# マルチキャビティ磁性フォトニック結晶を利用した欠陥深さ評価

橋本良介, 後藤太一, 高木宏幸, 井上光輝  
(豊橋技術科学大学)

Estimation of defect depth using multi-cavity magnetophotonic crystal

R. Hashimoto, T. Goto, H. Takagi, and M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology)

## はじめに

現在、安全性向上のために様々な非破壊検査が行われており、構造物の修理・交換の時期を確認するために欠陥の深さを定量的に評価することが求められる。そこで、目視のように高速で検査可能な、磁気光学(MO)イメージング<sup>1)</sup>に着目した。我々は、磁区サイズが 50 nm 程度の多結晶イットリウム鉄ガーネットを磁性膜に利用することで、高空間分解能な MO イメージを取得した<sup>2)</sup>。一方、欠陥深さに応じて漏洩磁界の強度が変化することから、磁性膜の偏光面回転角が変化する。この変化は画像のコントラストとして取得できるため、欠陥深さの評価が可能である。漏洩磁界が被検体からの距離に応じて減衰するため、磁性膜を薄膜化する必要がある。我々は、薄膜で大きな偏光面回転角が得られる磁性フォトニック結晶(MPC)を用いて欠陥深さ評価を行った。しかし深さ評価に使用した MPC では、磁気飽和を回避するために印加磁界の調整が必要で検査時間を要し、MO イメージングの高速性が損なわれた。本研究では、漏洩磁界の減衰を逆に利用して、被検体から距離を離すことで、磁気飽和を回避できると考えた。つまりこの手法では、MPC を高さ方向に移動する必要がある。しかし、高速で MPC を移動させることは困難である。そこで、MPC を移動させずに欠陥深さを評価するために、MPC 中に磁性層を複数挿入したマルチキャビティ MPC を設計した。

## 実験方法・結果

有限要素法シミュレータ(COMSOL ver.4.3a)を用いて、試験体からの距離と漏洩磁界の強度の関係を調査し、磁気飽和することなく欠陥深さ 1 mm から 10 mm まで評価できる磁性層の位置を求めた。試験体には鉄を想定し、下方向から磁界を印加するための磁化器を想定した。被検体と磁化器の外側は空気とした。従来手法では、欠陥深さに応じて印加磁界を制御する必要がある。そこで、磁界制御を不要にするために、印加磁界を 220 Oe で固定し、MPC が磁気飽和しない位置を計算的に求めた。図 1 は欠陥深さと漏洩磁界強度の関係を示す。青の実線は、印加磁界を 220 Oe として、MPC を 3.1  $\mu\text{m}$  だけ被検体から離れたときの漏洩磁界強度を示す。一方、赤の実線は従来通りに印加磁界を制御した場合の漏洩磁界を示す。この結果から、被検体から距離を 3.1  $\mu\text{m}$  離すことは、印加磁界を制御し、118 Oe 印加したときと同義であることが分かる。従って、距離を離れた位置に磁性層を 2 層有する MPC を作製することで印加磁界一定で、10 mm までの欠陥深さが評価できることが示唆された。次に、このようなマルチキャビティ MPC を設計した。高さ方向に約 3.1  $\mu\text{m}$  離れた位置に光学膜厚の異なる磁性層を 2 層配置した MPC を設計し、その光学特性を、マトリックスアプローチ法を利用して求めた。設計された構造は、基板/誘電体ミラー/磁性層/誘電体ミラー/スペーサ/誘電体ミラー/磁性層/誘電体ミラーである。計算において各磁性層の設計波長に対応した波長で MPC の局在が得られた。これは光源の波長を選択することで、高さが異なる位置の磁性層で MO イメージが得られることを意味している。以上より、本 MPC は波長を選択することで、対象物からの高さが異なる位置での MO イメージが取得でき、その漏洩磁界の空間的分布の違いから欠陥深さの評価ができると考えられる。

## 参考文献

- 1) Z. Zeng, X. Liu, Y. Deng, L. Udpa, L. Xuan, W. C. L. Shih, and G. L. Fitzpatrick: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 11 (2006).
- 2) R. Hashimoto, H. Takagi, T. Yonezawa, K. Sakaguchi and M. Inoue: *J. Appl. Phys.*, **115**, 17A931 (2014).

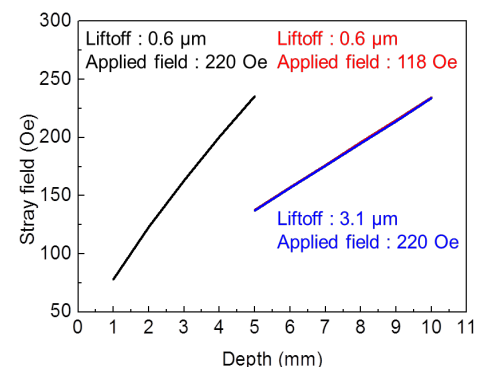


Fig. 1 The relationship between the strength of stray field and depth of defect.

## カラー用磁性フォトニック結晶の設計

工藤 慧、中村和樹、酒井将生、後藤太一、高木宏幸、林 攀梅、井上光輝  
(豊橋技術科学大学)

### Design of Magneto Photonic Crystal for RGB Colors

K. Kudo, K. Nakamura, S. Sakai, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim, M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology)

#### はじめに

自然な 3 次元像を再生する表示方法として電子ホログラフィが注目されている。ホログラフィは物体が存在する場合と同様の光の状態を再現するため、輻輳や焦点の調節など生理的要因に負担をかけることなく裸眼で見ることができる 3 次元像を表示できる<sup>1)</sup>。磁気光学 3 次元ディスプレイでは希土類置換型イットリウム鉄ガーネット(R:YIG)の垂直磁化膜に磁気情報としてホログラムを表示することで、3 次元像の単色再生を実現している。しかし、R:YIG 単層膜の回折効率は波長と膜厚に依存するため、カラー像の再生には波長に合わせた膜構造の設計が必要となる。本研究では磁気光学 3 次元ディスプレイの 1 枚の磁性メディアを用いたカラー化を目的として、磁性ガーネット膜の構造を設計した。

#### 実験方法

赤(R)緑(G)青(B)各色にあわせた 3 枚の欠陥層を誘電体ミラーによりはさんだ反射型の磁性フォトニック結晶(magneto photonic crystal:MPC)の構造をマトリクスアプローチ法によって設計した。この構造では、各色の欠陥層に局在する光の波長を独立させることで、1 枚のメディア内で空間分割方式によるカラー像の再生を行うことができる。各層の独立性を評価するために、3 層の欠陥層中 1 層のみ磁気旋光を与えて、カー回転角および反射率の波長スペクトルを計算し回折効率を求めた。再生像の輝度は磁性膜の回折効率および参照光の強度によって決定される。参照光強度は、ISO 13406 規格で推奨されている輝度 100 cd/m<sup>2</sup> を達成するように RGB の各波長について調節を行った。各欠陥層に RGB 各波長を入射した場合の輝度値を算出し、欠陥層に対応した入射波長に対する対応していない入射波長の輝度比をクロストークとして評価した。

#### 実験結果

設計した MPC の構造を Fig.1 に示す。各色の欠陥層上部の誘電体ミラーに対し、下部の誘電体ミラーのペア数を増加させることで、赤色光に比べ透過率の低い青色光や緑色光が奥の欠陥層まで到達し減衰してしまうことを防いでいる。RGB それぞれのピーク波長は R:620 nm、G:524 nm、B:440 nm となっており、その波長で 100 cd/m<sup>2</sup> を達成する参照光強度は R: 174.2 mW/cm<sup>2</sup>、G:7.0 mW/cm<sup>2</sup>、B:929.6 mW/cm<sup>2</sup> となる。Fig.2 に各欠陥層でホログラムを表示した場合の輝度を示す。例えば R は赤色用磁性層のみ磁気旋光を与えた結果である。クロストークの値は青色光のホログラムが赤色光で再生されるときが最大で 1.99 % であり、設計波長外の光による再生像の影響は非常に小さく、RGB ごとに像を再生できる結果を得た。今後、MPC を作製し、カラー像を実際に再生することを試みる。

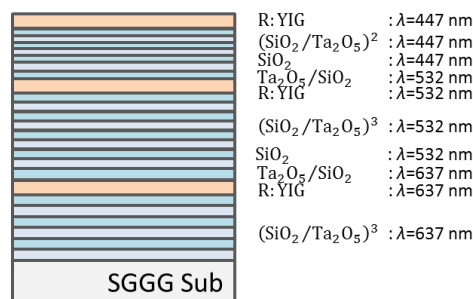


Fig.1 Structure of the MPC for RGB

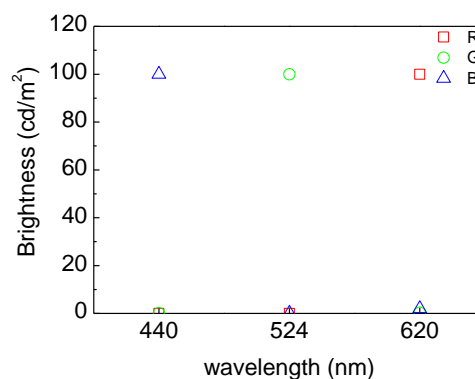


Fig.2 Wavelength dependence of brightness

**参考文献** 1) 三科智之, “立体電子ホログラフィー技術” 電子情報通信学会誌 93(6), 492-498, (2010)

## 磁性ガーネットを用いた磁気光学 Q スイッチの開発

森本凌平, 後藤太一, John Pritchard\*, 吉本拓矢, 高木宏幸, 中村雄一,  
Pang Boey Lim, Nicolaie Pavel\*\*, Mani Mina\*, 平等拓範\*\*, 井上光輝  
(豊橋技術科学大学, \*アイオワ州立大学, \*\*分子科学研究所)

Development of Magneto-optical Q-switch Using Magnetic Garnet Films

R. Morimoto, T. Goto, J. Pritchard\*, T. Yoshimoto, H. Takagi, Y. Nakamura,  
P. B. Lim, N. Pavel\*\*, M. Mina\*, T. Taira\*\*, M. Inoue

(Toyohashi University of Technology, \*Iowa State University, \*\*Institute for Molecular Science)

### はじめに

マイクロチップ固体レーザー<sup>1,2)</sup>は、レーザーダイオードとほぼ同サイズでありながら、狭線幅の単一モード発振や Q スイッチ、モードロック発振による短パルス化によって、高い時間分解能、高安定性、および高尖頭値のレーザー光が望める。特に出力パルスの繰り返し周波数やパルスパターンを制御可能な能動 Q スイッチとして、電気光学効果および音響光学効果を利用したものが報告されているが、原理的に素子サイズの小型化に限界があったり、駆動装置が大型になったりという難点があった。我々は、原理的に薄膜化が可能で<sup>3,4)</sup>、応答速度が極めて高速な磁気光学効果を利用した磁気光学能動 Q スイッチを提案している。磁気光学効果を使った Q スイッチの実証例はほとんど無いため、本研究では、透過率が高く、単位膜厚あたりの磁気光学効果の大きな磁性ガーネットを使用し、磁性ガーネット膜の面直方向にパルス磁界を印加することで磁気光学能動 Q スイッチングの実証を行った。

### 実験方法

マイクロチップ固体レーザーとは、従来は共振器長が 1 m もあるような固体レーザーを、薄片の媒質を用いることで超小型化したものを指す。ここでは基本的な動作の検証を目的として、厚み 4 mm の Nd:GdVO<sub>4</sub> 結晶と外部鏡に試作した磁気光学能動 Q スイッチ素子を配置すべく共振器長を 130 mm と比較的長くしているが、最終的には磁性ガーネット膜をレーザー材料に直接蒸着できることから超小型構成が望めるものである。能動 Q スイッチ素子には、ガーネット基板に、液相エピタキシャル成長法によって成膜された、膜厚 190 μm の単結晶磁性ガーネット膜を用いた。波長 1064 nm における透過率は 78 %, ファラデー回転角は 47 度であった。直径約 6 mm のヘルムホルツコイルを光軸に対して垂直に、磁性ガーネット膜を挟むようにレーザー共振器中に固定し、パルス磁界を膜に対して垂直方向に印加した。

### 実験結果

小型ヘルムホルツコイルに、半値幅 2.3 μs, 振幅 3 V, 繰り返し周波数 100 Hz のパルス信号を印加したところ、Fig. 1 に示すような、Q スイッチ発振出力が確認された。得られたパルス光は半値幅 50 ns, 波長 1064 nm であった。この結果により、磁性ガーネットを用いた磁気光学能動 Q スイッチングが実証された。講演会では、詳細なレーザー共振器構造および印加パルス磁界を変化した場合の発振特性についても報告する。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 若手研究 (A) No. 26706009, 挑戦的萌芽研究 No. 26600043, 科研費基盤研究 (S) No. 26220902 の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- 1) T. Taira, et al., *Opt. Lett.*, **16**, 1955 (1991).
- 2) T. Taira, *Opt. Mater. Express*, **1**, 1040 (2011).
- 3) M. Inoue, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, R151 (2006).
- 4) T. Goto, et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **36**, 197 (2011).

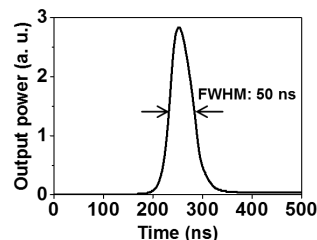


Fig. 1 Optical power of Q-switched pulse using magneto-optical garnet film. The pulse width was 50 ns at a repetition rate of 100 Hz.

## 磁気 Kerr 効果測定／変位校正機能を備えた 10<sup>-8</sup> オーダの薄膜磁歪測定装置の開発

○目黒 栄, 飯田 達矢, 旗持 純, 小田切 雄介, \*斉藤 伸 (ネオアーク, \*東北大学)

Development of 10<sup>-8</sup> order magnetostriction measuring system for thin film  
with calibration function of displacement and measuring function of Kerr signal

S. Meguro, T. Iida, J. Hatamochi, Y. Odagiri, \*S. Saito (Neoark Corp., \*Tohoku Univ.)

**はじめに** 昨今の磁気デバイス用磁性薄膜では、要求仕様の導出のために様々な材料を用いて軟磁性を誘導する必要があり、磁歪の把握とその制御技術の確立は極めて重要である。薄膜磁歪の測定は片持支持した試料を回転磁界中に設置し磁化を磁場方向に飽和させた際の試料の反りを変位測定する方法により行われている。一般に変位量の計測には光てこ法が用いられる。10<sup>-7</sup> 台以下の微小磁歪測定では、試料の磁極への吸引等のように測定変位に磁歪以外の成分が重畳する影響が無視できず、磁化の飽和領域を判定した上で磁歪成分を分離評価することが必要となる<sup>1)2)</sup>。また微小磁歪を検出する光学系にはレンズ等の光学素子が用いられ、残存収差の影響を考慮すると幾何学的配置から微小な絶対変位量を算出することは精度的難しく校正が必要となる。そこで我々は光てこ光学系と縦 Kerr 効果光学系とを一体化し試料の磁化状態を判定できる機能を設け、さらに光ヘテロダイン変位計を搭載し同時計測可能とすることでナノメートルレベルの変位量校正機能も具備した新たな薄膜磁歪測定装置を開発したので報告する。

**実験結果** Fig. 1 に開発した薄膜磁歪測定装置の構成図を示す。印加磁界は直交ヘルムホルツコイルを励磁して発生させ、回転周波数 30 Hz, 最大振幅 100 Oe とした。光てこプローブ光により縦 Kerr 効果も検出可能とするため、プローブレザ光を直線偏光とし、検出側では試料からの反射光を無偏光ビームスプリッタで分岐し、光てこ検出用 4 分割検出器と縦 Kerr 効果検出用偏光差動検出器にそれぞれ導いた。変位絶対値校正用の光ヘテロダイン変位計 (分解能 0.8nm) は試料に正対するよう配置し、試料の固定端近傍と解放端にビームを照射し反射光同士を干渉させた。Fig. 2 に厚さ 140 μm のガラス基板上に成膜した Ni<sub>80</sub>Co<sub>20</sub> 薄膜 (膜厚 20 nm) の回転磁界下での磁歪変位量および縦 Kerr 信号を示す。磁歪変位は一軸対称性を反映し、回転磁界の 2 倍の周期で変化している。回転磁界振幅を増加させるとともに磁歪変位と Kerr 信号はともに振幅が増大するとともに波形歪が小さくなり振幅が飽和することがわかる。Kerr 信号は磁歪変位とは独立に得られるため、磁歪変位が小さい場合でも飽和領域の判断が可能である。光テコ信号の校正は磁歪変位の大きい試料を用いて行った。Fig. 3 に厚さ 140 μm のガラス基板上に成膜した Ni および NiFe 薄膜 (膜厚 100 nm) の回転磁界振幅に対する磁歪変位および Kerr 信号を示す。NiFe 薄膜は 50 Oe 以上で変位および Kerr 信号が飽和しているが、Ni 薄膜ではいずれも飽和しておらず、印加磁界が不足していることがわかる。計測された Ni<sub>80</sub>Co<sub>20</sub> 薄膜の磁歪は 6.0×10<sup>-6</sup>, NiFe 薄膜の磁歪は 3.4×10<sup>-7</sup>であった。講演では 10<sup>-8</sup> オーダの磁歪測定についても報告する。

**参考文献** 1) “磁性薄膜の測定法”, トリケップス, 67 (1990). 2) T. Kawai *et al.*, *Thin Solid Films*, **519**, 8429 (2011).

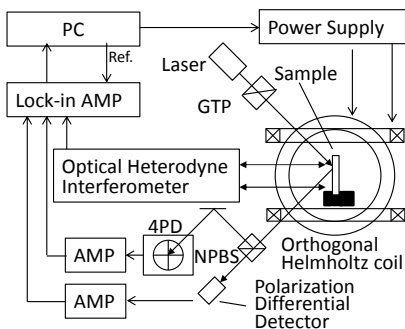


Fig.1 Diagram of the magnetostriction measuring system with calibration function of displacement and measuring function of Kerr signal.

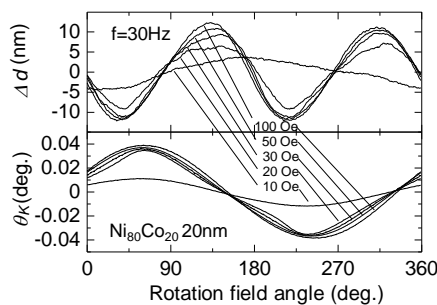


Fig.2 Relations of magnetostriction displacement  $\Delta d$  and the Kerr signal  $\theta_K$  for the angle of the rotating magnetic field in Ni<sub>80</sub>Co<sub>20</sub> film.

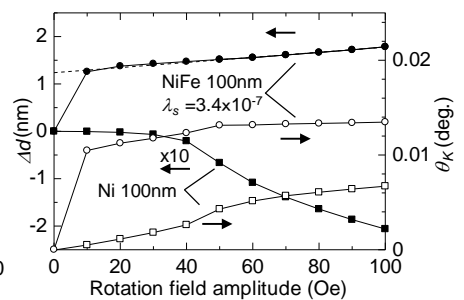


Fig.3 Relations of the magnetostriction displacement  $\Delta d$  and the Kerr signal  $\theta_K$  for the rotating magnetic field in NiFe film and Ni film.