

# 反射型配置における Co/Ru 多層膜の近赤外磁気カー効果と マグネトリフラクティブ効果

○齊藤 伸, 佐藤 春彦, 大木 敬介, 赤羽 浩一, 内田 裕久\* (東北大学, \*豊橋技術科学大学)

Kerr and magneto-refractive effects in near-infrared for Co/Ru multilayer films

in reflection configuration

S. Saito, H. Sato, K. Ooki, K. Akahane, and H. Uchida\* (Tohoku Univ., \*Toyohashi Univ. Tech.)

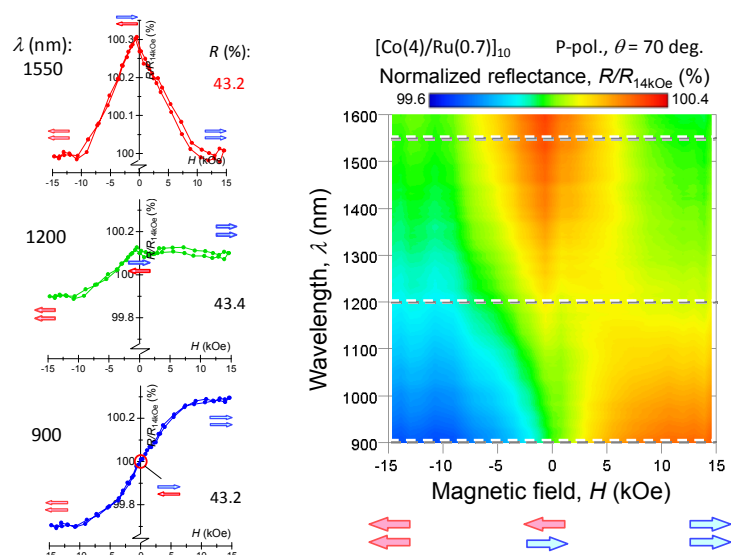
## 1. はじめに

強磁性/非磁性多層膜 (GMR 多層膜) で観測されるマグネトリフラクティブ効果 (MRE) は、強磁性層の磁化配列に対応して反射光に強度変化が現れるため注目されている。しかしながら報告されている光量変化は数%程度と小さく、実際にアプリケーションに展開するためには MRE の材料検討をさらに深める必要がある。著者らは、Co/Ru からなる GMR 多層膜の透過型配置における MRE (T-MRE) を測定し、磁化の平行/反平行状態に対応させたドルーデ項により測定範囲外の波長依存性についても見積もった。一方で金属膜の場合、反射型配置の方が透過型より光量が多いことが多く、また透過型配置に比して偏光や入射角等の自由度が増える。特に P 偏光を入射する場合、膜厚方向に振動電界を印加できるため、GMR 多層膜中のスピン依存散乱に伴う輸送特性が有効に MRE の増強に寄与する可能性がある。そこで本講演では、近赤外域での P 偏光反射型配置における MRE (R-MRE) について評価・解析した結果を報告する。

## 2. 実験結果

Fig. 1 (左) に [Co(4 nm)/ Ru(0.7 nm)]<sub>10</sub> 多層膜の入射角 70 度における波長 1550 nm, 1200 nm, 900 nm での P 偏光反射率の磁気履歴曲線を示す。磁界は試料面内で光の進行方向と垂直方向に印加した。1550 nm では磁気履歴曲線の形状が磁気抵抗曲線と類似しており、磁化の相対角に対応して光量変化していることが示唆される。1200 nm では反射率は正の磁界を印加した際にはほぼ一定、負の磁界を印加した場合は減少して飽和しており、光量変化が磁界に対し非対称となる。900 nm の磁気履歴曲線は磁化曲線と類似しており、磁化の向きに対応して光量に変化していると考えられる。Fig. 1 (右) に 900 から 1600 nm までの P 偏光反射率の磁気履歴曲線をまとめてマップ状に示す (カラー)。縦軸は波長、横軸は磁界、色の寒暖は反射率を表している。グラフ中の破線は、前述した 3 波長の磁気履歴曲線に対応する。グラフ下側の短波長側では反射率は正の高磁界側で高く、負の高磁界側では低い。グラフ上側、すなわち長波長化に伴い高磁界側での反射率は平均化され、代わって零磁界付近での反射率が高くなる。この形状変化の境界が 1200 nm 付近にあることが明瞭に見てとれる。この光学特性の波長依存性は、短波長側では局在電子のバンド間遷移に起因する横カー効果、長波長側では伝導電子のスピン依存散乱が強く反映された結果であると示唆される。

講演では、磁界に対する偶関数成分 (T-MRE) と奇関数成分 (横カー効果) を分離して定量解析した結果を説明する。



**Fig. 1** Experimental reflectance with the incident angle  $\phi$  of 70 deg. plotted against wavelength and magnetic field for a [Co(4)/Ru(0.7)]<sub>10</sub> film. The cross section in the broken lines correspond to the normalized loops of reflectance (bottom) in 900 nm, (middle) 1200 and (bottom) in 1550 nm, respectively.

# 透過型配置における Co/Ru 多層膜のマグネトリフラクティブ効果の近赤外波長依存性

○大木 敬介, 佐藤 春彦, 赤羽 浩一, 内田 裕久\*, 齊藤 伸 (東北大学, \*豊橋技術科学大学)

Near-infrared wavelength dependence of magneto-refractive effect of Co/Ru multilayer film in transmission configuration

K. Ooki, H. Sato, K. Akahane, H. Uchida\* and S. Saito (Tohoku Univ. \*Toyohashi Univ. Tech.)

## 1. はじめに

磁気センサは空間の磁界の大きさや方向を検出するデバイスである。所望の周波数帯において高い検出感度や必要なダイナミックレンジを達成するために、様々な磁界効果を測定原理とするデバイスが提案され、実用化されている。中でも光をプローブとしたセンサは検出部を小型にでき、真空中、液中、狭空間中での磁界のセンシングが可能となるため注目されている。簡素な光学系によりセンサを構成するためには、偏光変化ではなく光の強度変化を用いることが有効であり、我々は強磁性/非磁性多層膜 (GMR 多層膜) やグラニュー膜等に現れるマグネトリフラクティブ効果 (MRE) に注目している。MRE の先行研究は、理論報告は 1995 年以降<sup>1)</sup>、実験報告は 2002 年以降<sup>2)</sup> から散見される。しかしながら、実験者の主な興味が磁気抵抗素子の MR 曲線の非接触計測にあったため、センサ応用を念頭においた MRE の材料研究は十分とはいえない。そこで著者らは、零磁場での反平行配列を確実に実現することを意図して、強磁性層に Co、非磁性層に Ru を選択した GMR 多層膜の透過型配置における MRE (T-MRE) を測定し、伝導電子の輸送特性と光学遷移が MRE に及ぼす影響について、赤外域波長依存性を誘電率解析して評価した。

## 2. 実験結果

Fig. 1 に [Co(4 nm)/Ru(0.7 nm)]<sub>10</sub> 多層膜の (a) 波長 1550 nm 及び (b) 900 nm での T-MRE の印加磁界に対する変化を示す。900 nm の MRE 曲線は磁気抵抗曲線と類似しており、別途計測した磁化曲線と対応させると、磁化の相対角に応じて光量変化していることがわかる。一方、1550 nm での MRE 曲線は 900 nm とは変化分の符号が異なった。T-MRE の波長依存性をまとめた結果 (c)、前述した符号反転は 1100 nm 程度で生じており、長波長程負の T-MRE 値が増強されていることが見てとれる。

この T-MRE の波長依存性を理解するために、磁化の平行/反平行配列それぞれの場合についてドルーデモデルを仮定し、誘電率解析を行った。GMR 多層膜全体の誘電率を  $\epsilon_{\text{SAL}}$  とすると

$$\epsilon_{\text{SAL}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{-i\omega\tau_{\text{SAL}}}{1 - i\omega\tau_{\text{SAL}}} \left( 1 - \frac{\beta_{\text{SAL}}^2 (M/M_s)^2}{(1 - i\omega\tau_{\text{SAL}})^2 - \beta_{\text{SAL}}^2 (M/M_s)^2} \right)$$

とかける<sup>1)</sup>。ただし、 $\tau_{\text{SAL}}$  と  $\beta_{\text{SAL}}$  はそれぞれ多層膜全体での伝導電子の平均散乱時間、平均スピン依存散乱係数である。 $M/M_s$  は強磁性層の磁化の配列が平行の場合 1、反平行の場合 0 で与えられる。Fig. 2 に多層膜の磁化の配列が平行あるいは反平行の場合について、ガラス基板での多重反射を考慮した透過率スペクトル ( $T_{\text{AP}}$ ,  $T_{\text{P}}$ ) を算出し、差分である T-MRE の波長依存性を計算した結果を示す。ここで  $\omega_p$ ,  $\tau_{\text{SAL}}$ ,  $\beta_{\text{SAL}}$  は楕円偏光解析法と MRE の計測結果からフィッティングにより算出した。計算結果によると、長波長化に伴う負の T-MRE の増強は、3  $\mu\text{m}$  以上にて飽和傾向を示し、その値は -1.3 % 程度と見積もられた。

講演では T-MRE 増強のための材料設計指針も説明する。

参考文献 1) J. C. Jacquet et al., *MRS*, 384, 477 (1995).  
2) V. G. Kravets et al., *PRB*, 65, 054415 (2002).

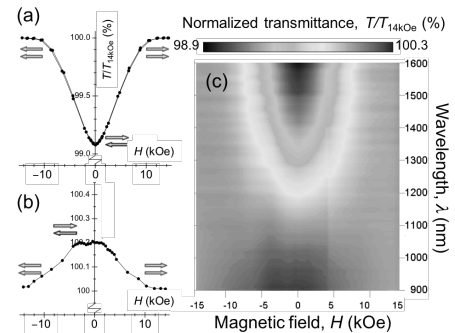


Fig. 1 Normalized loops of T-MRE for a [Co/Ru]<sub>10</sub> film at (a) 1550 nm and (b) 900 nm, and (c) 900 – 1600 nm.

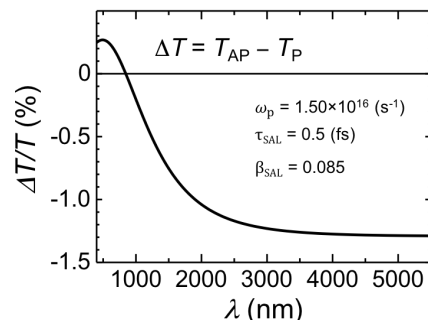


Fig. 2 Normalized T-MRE spectrum calculated with extended Drude model.

# キロワット出力を有する磁気光学 Q スイッチレーザーの開発

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

## Development of Magneto-optical Q-switch Laser with Kilowatts Power Output

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

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

### はじめに

マイクロチップ固体レーザーとは、従来の共振器長が 1 m 級の固体レーザーを、薄片の媒質を用いることで超小型化したものを指す。電気光学効果および音響光学効果を利用した能動 Q スイッチは外部制御によりジッターを抑制しながら高出力パルスを発生可能であるが、原理的に素子サイズの小型化に限界があるため、マイクロチップレーザーの構築が困難であった。我々は、原理的に薄膜化が可能で、応答速度が極めて高速な磁気光学効果を利用し、能動制御可能でありながら全長が 1 mm に満たない非常に小型な Q スイッチを提案している<sup>2,3)</sup>。これまでの報告では出力尖頭値が小さいという課題があったが、本報告では、尖頭値がキロワットオーダーの高出力パルスの発生について述べる。

### 実験方法

Fig. 1 に示すようにレーザー共振器を構築した。磁気光学能動 Q スイッチ素子として、膜厚 190  $\mu\text{m}$  の単結晶磁性ガーネット膜を直径 5.3 mm のコイルで挟み、厚み 4 mm の Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 結晶と外部鏡の間に、共振器長が 10 mm となるように配置した。励起には波長 808 nm のダイオードを使用し、高エネルギー励起を行うためにパルス発振とした (Quasi-CW 励起)。励起光の尖頭値は 32 W、パルス幅は 200  $\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数は 1 kHz とした。また、コイルに印加したパルス信号は半値幅 2.3  $\mu\text{s}$ 、振幅 56 A である。磁性ガーネット膜面に存在する迷路状の磁区の消失・発現をパルス磁界によって変化し、共振器内の光回折を制御することで Q スイッチ発振が生じた。

### 実験結果

パルス幅 27 ns、尖頭値 1.1 kW、ビーム品質  $M^2$  は 3.7 の高出力パルスが長さ 10 mm の共振器構造で得られた。この尖頭値はこれまで得られていた出力 0.2 kW に比べ 1 桁程度大きなものである。この結果により、小型で高出力が得られる磁気光学能動 Q スイッチの動作を実験的に示すことができたといえる。またこれまでの報告で使用されていた Nd:GdVO<sub>4</sub> と異なり、等方性材料であるため出力パルスはランダム偏光であることが確認できた。今後はマイクロチップレーザーの形成による、更なる出力と安定性の向上が期待される。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 No. 26220902, 17J05958, JST さきがけ No. JPMJPR1524, 矢崎科学技術振興記念財団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. Goto, et al., Opt. Express, **24**, 17635 (2016).
- 3) R. Morimoto, et al., Sci. Rep., **6**, 38679 (2016).

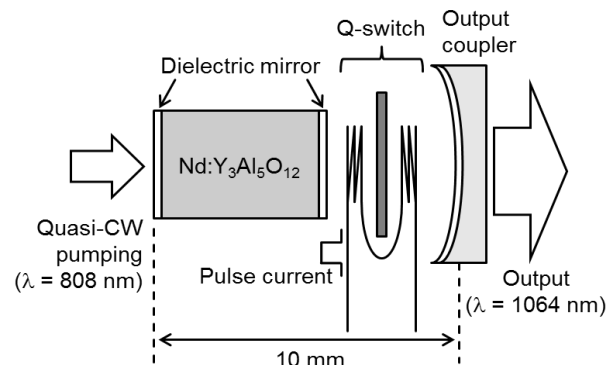


Fig. 1 Sketch of the components of the magneto-optical Q-switched laser system. The cavity length was 10 mm.

# 長方配列 Au 粒子を用いた磁気光学プラズモニック構造体の光学および磁気光学応答

川口佑磨, 水谷佑介, 板橋悠人, 後藤太一\*, 高木宏幸,  
中村雄一, P. B. Lim, 内田裕久, 井上光輝  
(豊橋技科大, \*JST さきがけ)

## Optical and magneto-optical responses of magneto-optical plasmonic structure with rectangularly arranged Au particles

Y. Kawaguchi, Y. Mizutani, Y. Itabashi, T. Goto\*, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology, \*JST PRESTO)

### はじめに

透明な磁性体である磁性ガーネットは、磁化の方向によって透過する光の偏光面を回転させるファラデー効果を利用して光通信部品などに用いられているが、今後、光デバイスやセンサへ応用するためには、より大きな回転角を持つ材料の開発が望まれる。そのための候補となるのが、Au 粒子による局在型表面プラズモン共鳴を利用するファラデー効果の増大である。本研究では、長方配列の Au 粒子と磁性ガーネット (Bi:YIG) との複合構造体の光学および磁気光学応答を実験およびシミュレーションを用いて考察をする。

### 実験および計算方法

電子線描画装置によって作製した Au 粒子の上に Bi:YIG を成膜した構造体を作製し、透過率およびファラデー回転スペクトルを測定した。また時間領域差分法によるシミュレーションソフト FDTD Solutions (Lumerical Solutions Inc.) を用いて透過率スペクトルを求めた。

### 結果

Fig.1 に x 方向の周期 200 nm, y 方向の周期 250 nm の長方格子状に配列にした Au 粒子を示す。偏光の角度を 0, 30, 45, 60, 90 deg. にしたときの透過率とファラデー回転スペクトルをその下に示す。プラズモン共鳴による光吸収が大きくなるのは、Au 粒子が直線状に並んだ 0 と 90deg. のときである。しかし最も大きなファラデー回転角は、偏光の角度が 45deg. のときに得られた。

FDTD 法によって求めた透過率スペクトルを Fig. 2 に示す。周期が小さな x 方向に電界ベクトルの向きを合わせた場合は長波長側に大きなプラズモン共鳴の光吸収が現れ、周期が大きな y 方向の場合は短波長側に光吸収が現れた。角度を変化させると透過率スペクトルが変化するが、45deg. では平均化されたようなスペクトルになった。このようにシミュレーションで得られた角度依存性の定性的な振舞いは、実験結果と一致する。今後、実験結果との違い、さらに Fig.1 に示した特徴的なファラデー回転角の偏角依存性について検討を進める。

### 謝辞

本研究の一部は、科研費 17K06349, 26220902 の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- 1) H. Uchida, Y. Mizutani, Y. Nakai, A. A. Fedyanin and M. Inoue, J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 44, 064014-1-7 (2011).

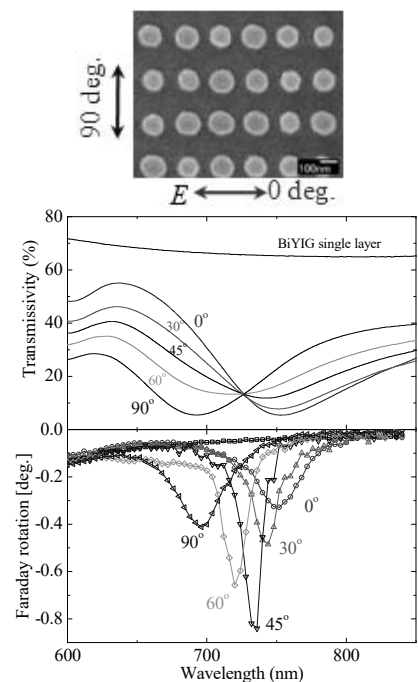


Fig.1 A SEM image, transmissivity and Faraday rotation spectra of Bi:YIG composite structure with rectangularly arranged Au particles. X and Y period are 200 and 250 nm. Polarization angles are indicated.

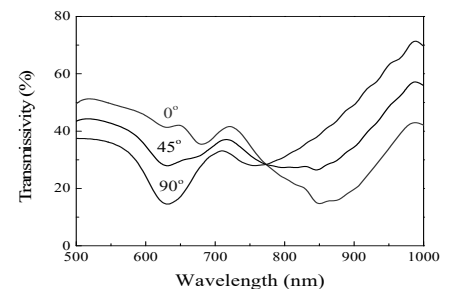


Fig. 2 Transmissivity spectra obtained by FDTD simulation for the composite structure as shown in Fig. 1.

# MOD 法で作製した Bi 置換 YIG 膜の光磁気特性評価

大内康宏、寺島顕一、高瀬つぎ子、山口克彦  
(福島大)

Magneto-Optical Property of Bi-YIG Thin Film by The MOD Method

Y. Ouchi, K. Terashima, T. Takase, K. Yamaguchi  
(Fukushima Univ.)

## はじめに

近年、スピン流が発見され、スピンホール効果と逆スピンホール効果の発見によりスピン流を電氣的に生成、検出が可能となり、センサや発電モジュール、情報伝達手段への応用が行われている。絶縁体のフェリ磁性である希土類鉄ガーネットであるイットリウム鉄ガーネット(YIG)は優れたスピン波スピン流伝導を持つものとして知られている。本研究では Bi 置換 YIG(Bi:YIG)膜を作製し、その物性を評価、特に磁気光学的特性を検討する。

## 実験・結果

Bi:YIG 膜を石英基板上に有機金属分解法(MOD)法で作製した。作製手順は tab. 1 の通りである。作成した試料の磁気モーメントを試料振動型磁力計(VSM)で測定した結果が fig.1 である。また、Bi:YIG 膜の磁化と Pt 膜の伝導電子との磁氣的結合を確認するためにスピitzerバック効果の確認をした。Tab.1 の手順で作製した Bi:YIG 膜に Pt 膜をスパッタ法で製膜し、さらに白金膜の膜質を改善するために複合膜全体を大気中で 600°C 1 時間のアニール処理を行った。作製した試料でスピitzerバック効果を試したところ fig.2 のような結果が得られ、スピitzerバック電圧が検出されたと考えられる。

Tab.1 method of prefucturing Bi:YIG

| procedure | 1.Spin coat              | 2.heating   | 3.pre-bake  | 4.bake       |
|-----------|--------------------------|-------------|-------------|--------------|
| condition | 500rpm5s →<br>3000rpm30s | 150°C<br>5m | 550°C<br>5m | 700°C<br>14h |

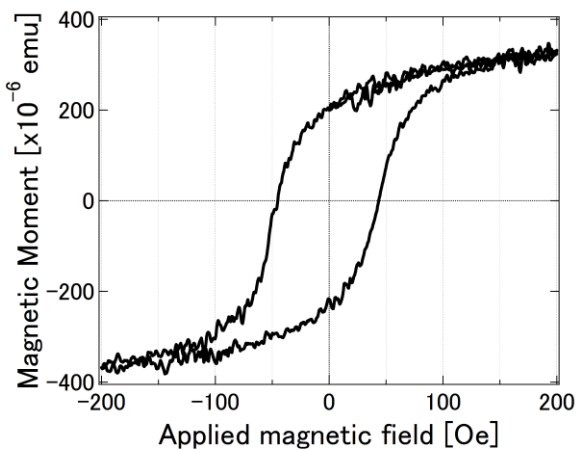


Fig1.magnetic moment loop for Bi:YIG thin film

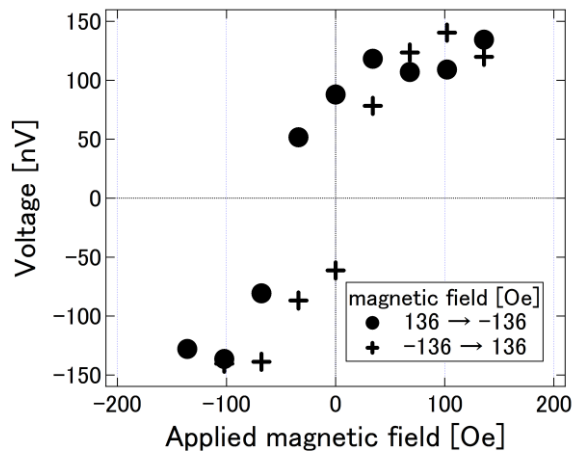


Fig2.magnetic moment loop for Bi:YIG thin film

## 参考文献

- 1) K.Uchida and Hiroto.A et all, Proceedings of the IEEE, Vol.104,10(2016),1946-1972.