

# イットリウム鉄ガーネットの格子不整合が及ぼす スピン波伝搬特性への影響

吉本拓矢<sup>1</sup>, 後藤太一<sup>1,2</sup>, 岩本文吾<sup>1</sup>, 中村雄一<sup>1</sup>, 内田裕久<sup>1</sup>,  
ロス キャロライン<sup>3</sup>, 井上光輝<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>豊橋技科大, <sup>2</sup>JST さきがけ, <sup>3</sup>マサチューセッツ工科大)

Effect of lattice mismatch of yttrium iron garnet films on spin wave propagation properties

Takuya Yoshimoto<sup>1</sup>, Taichi Goto<sup>1,2</sup>, Bungo Iwamoto<sup>1</sup>, Yuichi Nakamura<sup>1</sup>,

Hironaga Uchida<sup>1</sup>, Caroline A. Ross<sup>3</sup>, Mitsuteru Inoue<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Toyohashi Univ. of Tech., <sup>2</sup>JST PRESTO, <sup>3</sup>MIT)

## 研究背景

磁化の歳差運動が位相差を持って伝搬するスピン波 (SW) は、低発熱な情報キャリアとして注目を集めている<sup>[1]</sup>。近年、イットリウム鉄ガーネット (YIG) 中を伝搬する前進体積 (FV) SW の干渉を用いた論理素子が報告された<sup>[2,3]</sup>。SW の分散関係は膜厚依存性を持ち、磁性体の膜厚が薄いほど波長の短い SW が効率的に伝搬できるため、SW 集積回路の実現に向けて、薄膜導波路を用いた素子の開発が望まれている。しかし、磁性体を薄膜化すると膜面直方向の反磁界が強くなり、FV SW の励起に必要な磁界が大きくなるため、素子全体の小型化が困難となる。本研究では、異なる格子定数を持つ3つのガーネット基板に、YIG 薄膜を形成し、格子不整合に起因する応力磁気異方性を利用して、FV SW 励起に必要な磁界の低減を試みた。

## 実験方法

パルスレーザ堆積法 (PLD) を用いて、ガドリニウムガリウムガーネット (GGG), 希土類置換型 GGG (SGGG), ネオジウムガリウムガーネット (NGG) 基板に、膜厚約 100 nm の YIG 薄膜を形成した。FV SW の伝搬特性を評価するため、作製した YIG 薄膜上に電子線描画を用いて、電極間距離 64  $\mu\text{m}$  のコプレーナ導波路 (CPW) 対を形成し、マイクロプローブを用いてネットワークアナライザと接続して、透過利得を測定した。

## 実験結果

SW 伝搬スペクトルの測定結果を Fig. 1 に示す。印加磁界の変化に応じて、周波数がシフトする FV SW の信号が確認できた。FV SW の信号と横軸の交点が FV SW の励起に必要な最低の磁界を表しており、NGG/YIG, SGGG/YIG, GGG/YIG の順に値が大きくなった。各基板の格子定数は NGG/YIG, SGGG/YIG, GGG/YIG の順に小さく、YIG が負の磁歪定数を持つことから、NGG 上の YIG が最も大きく歪み、その結果導入された磁気異方性によって、面直方向に磁化しやすくなったと考えられる。また、Fig.1 中にオレンジ色の直線で示した、磁気異方性を考慮した FV SW の分散関係の計算結果は、GGG/YIG, SGGG/YIG のスピン波伝搬特性と良く一致していた。以上の結果より、応力磁気異方性の変化によって、FV SW の励起に必要な磁界を低減できた。

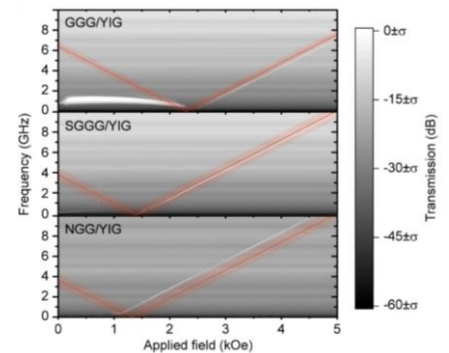


Fig.1 Spin wave propagation properties of YIG films on three garnet substrates.

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26220902, 15H02240, 16H04329, 17K19029, JST さきがけ, 頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム, 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) A. V. Chumak *et al.*, Nat. Phys. **11**, 453-461 (2015).
- 2) N. Kanazawa *et al.*, Sci. Rep. **6**, 30268 (2016).
- 3) N. Kanazawa *et al.*, Sci. Rep. **7**, 7898 (2017).

# 有機金属分解法を用いて成膜したスピノ波伝搬用磁性ガーネット薄膜における有機物分解時間の結晶性への影響

弘中祐哉, 芦澤好人, 中川活二  
(日本大学)

Effect of decomposition time on crystallization of garnet films for spin wave devices fabricated by metal organic decomposition method

Yuya Hironaka, Yoshito Ashizawa, and Katsuji Nakagawa  
(Nihon University)

## はじめに

電子デバイスの普及が急速に進む社会においてその省電力化は大きな課題であり、これを実現する材料研究が重要である。酸化物フェリ磁性体である磁性ガーネットは絶縁体であり、伝搬するスピノ波の減衰が小さいことから低消費電力デバイスへの応用が期待されている。我々は磁性ガーネットの高機能、高性能化を目指し、組成の変更が比較的容易な有機金属分解 (MOD) 法を用いてこれを成膜している。先行研究では、有機金属分解法を用いて  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (GGG) 単結晶基板上に成膜した単相磁性ガーネット薄膜における磁気共鳴の観測に成功した<sup>1)</sup>。さらに、磁気ひずみの異なる磁性ガーネット薄膜において、単相ガーネットの成膜に成功したことも報告している<sup>2)</sup>。さらに減衰の少ないスピノ波伝搬に向けて、より結晶性のよい磁性ガーネットを得るために有機金属分解法の有機物の分解時間を増加することにより結晶性の改善が出来たので報告する。

## 実験方法

試料には  $\text{Y}_{1.5}\text{Bi}_1\text{R}_{0.5}\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  ( $R = \text{Dy}, \text{Gd}, \text{Eu}$ ) を用いた。YIG をホストガーネットとし、Y の一部を磁気光学効果の大きい Bi で、さらに磁気ひずみ定数を変化するために、Dy, Gd, Eu でそれぞれ置換した。また、Fe の一部を磁化の大きさを制御するために Ga で置換した。基板には GGG (111) 単結晶基板を用いた。基板に MOD 溶液をスピノコートで塗布し、有機溶剤を蒸発するために 100 °C で 10 分間乾燥した。次に有機物を分解、揮発するために 450 °C で 10 分間あるいは 30 分間仮焼成を行って比較した。スピノコートから仮焼成までの工程を 1 回で約 40 nm の膜厚を得られ<sup>3)</sup>、これらを 4 回繰り返して、約 160 nm の試料を作製した。試料を結晶化する本焼成条件は 750 °C, 3 時間で一定とした。試料の結晶性の評価には X 線回折法を用いた。

## 結果および考察

Fig. 1 に磁性ガーネット相 (444) 面のロッキングカーブの半値全幅を仮焼成時間に対して示す。同一の結晶化条件の中で仮焼成時間を延ばすことにより、半値幅が小さくなり結晶性が良くなったことが分かる。また飽和磁化が増加する効果があることからガーネット結晶相の増加もあると推測される。これは仮焼成時間を延ばすことにより有機物の分解が十分に行われ、結晶化の障害となる有機物が減少したことが要因だと考えられる。

謝辞 本研究の一部は、平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1311020) の助成を受けて行われた

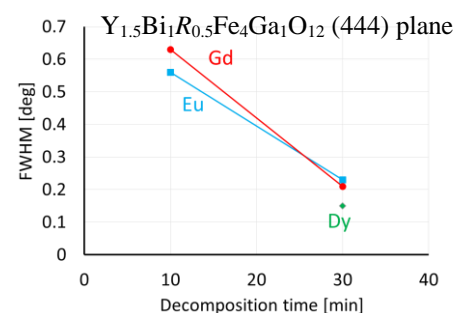


Fig. 1 Full width at half maximum (FWHM) of rocking curves of  $(\text{YBiR})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  ( $R = \text{Dy}, \text{Gd}, \text{and Eu}$ ) films

## 参考文献

- 1) T. Akazawa, H. Saito, Y. Hironaka, Y. Ashizawa, and K. Nakagawa: Absts. Int. Conf, Asian Uni. Magn. Soc. (IcAUMS) 2018, G4-1771 (2018).
- 2) Y. Hironaka, H. Saito, Y. Ashizawa, and K. Nakagawa: Absts. Int. Conf, Asian Uni. Magn. Soc. (IcAUMS) 2018, G5-1775(2018).
- 3) T. Ishibashi, A. Mizusawa, N. Togashi, T. Mogi, M. Houchido, and K. Sato: *J. Cryst. Growth*, **275**, e2427-e2431 (2005).

# イットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクス励起における 高周波伝送線路形状依存性の検討

神田哲典、室賀翔<sup>1</sup>、遠藤恭<sup>2</sup>  
(大島商船高専、<sup>1</sup>秋田大、<sup>2</sup>東北大)

High frequency transmission line design dependence of magnetization dynamics in yttrium iron garnet

T. Koda, S. Muroga<sup>1</sup>, Y. Endo<sup>2</sup>

(National Inst. of Technology, Oshima College, <sup>1</sup>Akita Univ., <sup>2</sup>Tohoku Univ.)

## はじめに

我々は室温で動作する高感度磁気センシングの基礎検討として、高周波伝送線路から高周波電力を入力することでイットリウム鉄ガーネット(YIG)の強磁性共鳴近傍の条件下で外部磁界変化に伴う非線形な磁化ダイナミクス変化を高周波電力の位相変化から高感度に捉えることを試みた[1]。その検討の中で、磁化ダイナミクスが高周波伝送線路の線路幅、および、間隔に大きく影響を受けることを見出した。そこで、系統的に高周波伝送線路形状を変化させた試料を新たに作製し、その高周波応答評価を検討したので報告する。

## 実験方法

試料には(111)ガドリウムガリウムガーネット (GGG) 単結晶基板上に液相エピタキシャル法で成長された膜厚 10  $\mu\text{m}$  の Bi-YIG(111)単結晶膜を用いた。試料上に高周波伝送線路として、フォトリソグラフィ法で非対称型のコプレーナウェーブ伝送線路、および、スロット伝送線路を形成した。0 dBm の高周波電力をこの伝送線路により YIG 上に入力し、反射電力強度の外部磁界依存性をネットワークアナライザで評価した。

## 実験結果

図1には非対称型コプレーナウェーブ線路において、その信号線路幅を 100  $\mu\text{m}$ 、グラウンド線路幅を 170  $\mu\text{m}$  とし、線路幅間隔を変化させた場合の測定結果を示す。入力周波数は 6.5 GHz である。全ての試料において 1000 Oe および 1100 Oe 付近に吸収ピークが確認されるがその吸収強度は線路幅間隔によって大きく変化した。複数のピークが存在する可能性として、信号線路とグラウンド線路での形状差に起因する局所反磁界差によって強磁性共鳴条件が異なることが挙げられる。そこで、信号およびグラウンド線路幅の等しいスロット伝送線路を作製して同様の評価を行った。図2には測定結果の一例として、線路幅は 20  $\mu\text{m}$ 、入力電力の周波数を 7.2 GHz とした場合の結果を示す。スロット伝送線路の場合にも明瞭な2つの吸収ピークが現れ、吸収ピークの磁界は線路幅間隔に対しても変化することがわかる。これらの検討結果から、電極線幅以外に、伝送線路間隔に起因する相互作用が Bi-YIG 膜の磁化ダイナミクスに影響を与えることを示唆している。講演では線路幅間隔の影響について考察した結果も報告する。

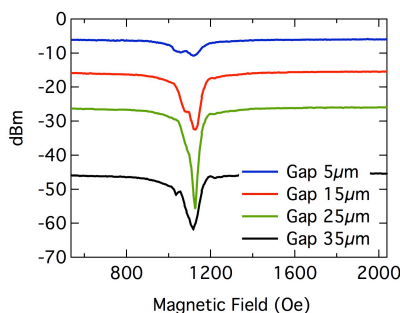


Fig. 1 Magnetic field dependence of reflected wave power with various gap length of asymmetrical-coplanar waveguides.

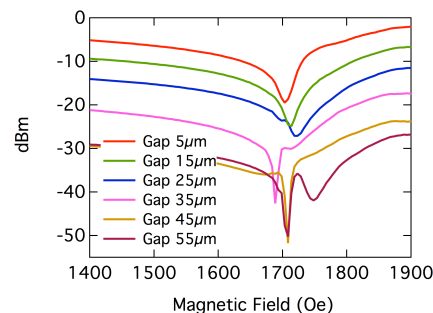


Fig.2 Magnetic field dependence of reflected wave power with various gap length of slot-waveguides.

謝辞 本研究にあたり、株式会社グラノプトから測定試料の御協力を頂きました。本研究の一部は、JSPS 科研費 No.18K14114 の助成を受けて行われた

参考文献 1) 第41回日本磁気学会学術講演概要集(2017)

# 金属-フッ化物系ナノグラニューラー膜の巨大ファラデー効果

小林伸聖, 池田賢司, Bo Gu\*, 高橋三郎\*\*, 増本博\*\*\*, 前川禎通\*\*\*\*  
(電磁研, \*中国科学院大学, \*\*東北大金研, \*\*\*東北大学学際研, \*\*\*\*理研)

## Giant Faraday effect of metal-fluoride nanogranular films

N. Kobayashi, K. Ikeda, B. Gu\*, H. Masumoto\*\*, S. Takahashi\*\*\*, and S. Maekawa\*\*\*\*  
(DENJIKEN, \*UCAS, \*\*FRIS Tohoku Univ., \*\*\*IMR Tohoku Univ., \*\*\*\*RIKEN)

**はじめに:** ファラデー効果を有する材料は、光アイソレーターに用いられ、光通信などの磁気光学素子として高度情報化社会に欠かせないものとなっている。我々は、強磁性金属とフッ化物から成るナノグラニューラー膜に関し、光透過性を有し且つ強(フェロ)磁性を同時に有する薄膜材料を見出した。光に対して透明な磁性体であることから、そのファラデー効果に興味をわくが、非常に大きいファラデー回転角を示す事が明らかとなった<sup>2)</sup>。本報告では、FeCo-(Al,Y)-F ナノグラニューラー膜に関し、膜組成とファラデー効果の関係、および巨大ファラデー効果のメカニズムについて検討した結果を報告する。

**実験方法:** 薄膜試料は、高周波スパッタ装置を用い、タンデム法によって作製した。ターゲットはFeCo合金円板(75mmφ)と、AlF<sub>3</sub>およびYF<sub>3</sub>粉末焼結円板(75mmφ)を用いた。膜組成は、波長分散型分光分析法(WDS)を用いて分析し、構造解析は、高分解能透過電子顕微鏡(HRTEM)によって行った。膜の光透過率は、フーリエ変換赤外分光法(FTIR)を用いて測定した。また、磁化曲線は、振動試料磁力計(VSM)を用いて測定し、ファラデー回転角は、6波長光源ファラデー効果測定装置(NEOARK BH-600LD2M)を用いて評価した。尚、各測定は室温で行った。

**結果:** Fig.1には、Fe<sub>21</sub>Co<sub>14</sub>Y<sub>24</sub>F<sub>41</sub>、Fe<sub>25</sub>Y<sub>23</sub>F<sub>52</sub>およびFe<sub>13</sub>Co<sub>10</sub>Al<sub>22</sub>F<sub>55</sub> ナノグラニューラー膜のファラデー回転角の波長依存性を示す。これらの膜のファラデー回転角の値は、いずれもBi-YIGに比して非常に大きく、特にFe<sub>21</sub>Co<sub>14</sub>Y<sub>24</sub>F<sub>41</sub>膜の光通信帯域の波長(1550nm)でのファラデー回転角は、Bi-YIGの約40倍もの大きな値を示す。Table 1には、ナノグラニューラー構造におけるグラニューラーとマトリックスの界面を想定し、グラニューラーを構成する界面付近の磁性元素(Fe)の磁気モーメントを、第一原理計算によって求めた結果である。界面付近のFeの軌道モーメントが大きくなっており、このことがナノグラニューラー膜の巨大ファラデー効果の要因となっていると考えられる。

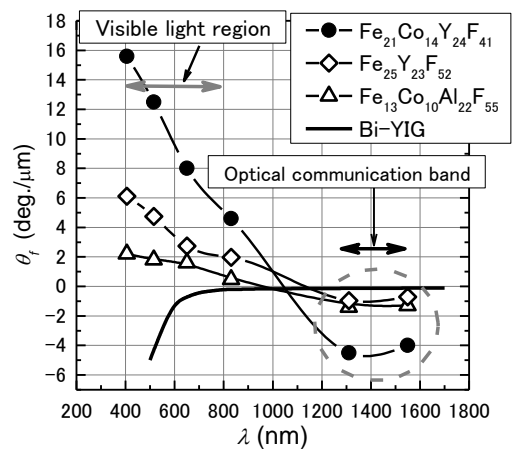


Fig.1 Relationship between the wavelength of incident light and the Faraday rotation angle of Fe<sub>21</sub>Co<sub>14</sub>Y<sub>24</sub>F<sub>41</sub>, Fe<sub>25</sub>Y<sub>23</sub>F<sub>52</sub> and Fe<sub>13</sub>Co<sub>10</sub>Al<sub>22</sub>F<sub>55</sub> films. The films were deposited on substrates of 600°C, 550°C and 680°C. At these temperatures. The value of Bi-YIG, is also indicated.

## 参考文献

- 1) N. Kobayashi, K. Ikeda, Bo Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, and S. Maekawa, 8, 4978 (2018)
- 2) N. Kobayashi, H. Masumoto, S. Takahashi, and S. Maekawa, Scientific Reports, 6, 34227, (2016)

Systems	Occupation $n_d$	Spin $S^z$ ( $\mu_B$ )	Orbit $L^z$ ( $\mu_B$ )
Fe-bcc bulk	5.96	2.27	0.041
Fe (001) surface	5.95	2.96	0.091
Fe-2ML (monolayer)	6.02	2.93	0.076
Fe/AlF <sub>3</sub> interface	6.07	2.12	0.142
Fe/YF <sub>3</sub> interface	5.53	3.22	0.065

Table 1. For 3d orbitals of the Fe atom, density functional theory calculation results of occupation number  $nd$ , spin moment  $S^z$ , and orbital moment  $L^z$  in Fe-bcc bulk, Fe(001) surface, Fe-2ML with ML being the monolayer, and Fe/insulator interfaces with insulators being AlF<sub>3</sub> and YF<sub>3</sub>.

# 集積型 Q スイッチレーザーに向けた(Tb,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 膜の作製

森本凌平\*, 後藤太一\*\*\*, 中村雄一\*, Pang Boey Lim\*, 内田裕久\*, 井上光輝\*  
(\*豊橋技科大, \*\*JST さきがけ)

Fabrication of (Tb,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> films for integrated Q-switched laser  
R. Morimoto\*, Taichi Goto\*\*\*, Y. Nakamura\*, P. B. Lim\*, H. Uchida\*, M. Inoue\*  
(\*Toyohashi Univ. of Tech., \*\*JST PRESTO)

## はじめに

磁気光学効果を用いた Q スイッチレーザー<sup>1-4)</sup>は、従来の能動制御型 Q スイッチレーザーよりも 100 倍以上薄く、これにともなう短パルス化、高出力化が、可能であるため、加工用レーザー応用等に注目されている。これまでに、我々は、磁性ガーネット膜を利用し共振器長が 10 mm の小型な Q スイッチの動作を確認している<sup>1-4)</sup>。しかし、磁性ガーネット膜とレーザー結晶間に、光学系の固定具や位置調整具によって数 mm の空隙が生じ、共振器長を大きくしていた。そこで、本報告では、共振器長を極限まで短くする膜構造を作製するために、レーザー結晶である Nd 置換 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Nd:YAG) 結晶基板上での、磁性ガーネット膜の作製条件を探索した。

## 実験方法

磁性ガーネット膜の形成にはパルスレーザー堆積法を用いた。(Tb, Bi) : (Fe, Ga) = 3 : 5 の酸化物焼結ターゲットを、波長 248 nm, パルス幅 25 ns, 繰り返し 10 Hz, エネルギー 360 mJ の KrF エキシマレーザーでアブレーションすることで、(Tb,Bi)<sub>3</sub>(Fe,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (BiGa:TIG) を成膜した。ターゲットの組成比は、文献[1-3]で使用した磁性ガーネット膜と同様のものを用いた。基板には 5 mm×5 mm×0.5 mm の 1at.%Nd:YAG を使い、成膜時圧力 2.6 Pa の酸素雰囲気中で、基板加熱温度は 650 から 950°C まで変化した。形成した BiGa:TIG 膜について、X 線回折による結晶性および磁気・光学・磁気光学特性の評価を行った。

## 実験結果・考察

ファラデー回転角の測定には回転検光子法を用いた。特に大きなファラデー回転角を示した、基板加熱温度 675, 700, 725°C で形成された BiGa:TIG について、波長 1064 nm における磁気光学特性を Fig. 1 に示す。基板加熱温度 700°C において、磁化飽和時のファラデー回転角は最大で 0.9 deg/μm を示した。この値は単結晶の無置換 TIG バルクに比べ約 2 倍大きい値を示している。この大きなファラデー回転角は、Bi 置換によるものであると考えられる。また、X 線回折の測定結果より、BiGa:TIG 膜が Nd:YAG 基板上にエピタキシャル成長していることが確認できた。この結果により、磁気光学 Q スイッチをレーザー結晶上に直接形成し、能動 Q スイッチを用いたマイクロチップレーザーを実現することが期待できる。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 No. 26220902, 17J05958, 26706009, 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. Goto, et al., *Opt. Express*, **24**, 17635 (2016).
- 2) R. Morimoto, et al., *Sci. Rep.*, **6**, 38679 (2016).
- 3) R. Morimoto, et al., *Sci. Rep.*, **7**, 15398 (2017).
- 4) R. Morimoto, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 061101 (2018).

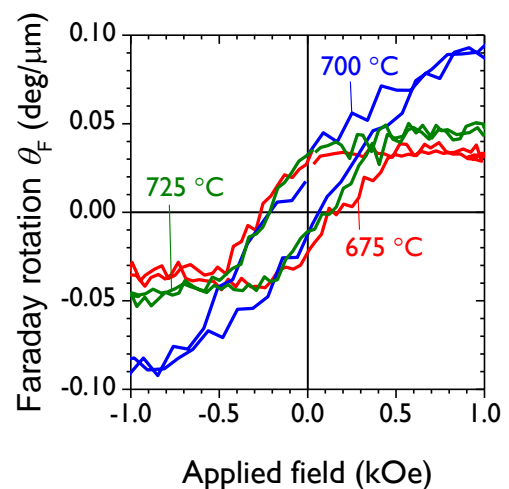


Fig. 1 Faraday rotation loops of BiGa:TIG films with different substrate temperature at the wavelength of 1064 nm..