

Bi, Ga 置換 Eu ガーネットの室温における磁化及び角運動量補償組成

Magnetization and angular momentum compensation composition of Bi, Ga substituted Eu garnets at room temperature

朝野 航^{a)}・Md Abdullah Al Masud^{a)}・西 敬生^{b)}・大島 大輝^{c)}・加藤 剛志^{c)}・李 基鎮^{d)}・

河原 正美^{e)}・Fatima Zahra Chafi^{a)}・西川 雅美^{a)}・石橋 隆幸^{a)†}

^{a)}長岡技術科学大学, 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 (〒940-2188)

^{b)}神戸市立工業高等専門学校, 兵庫県神戸市西区学園東町 8 丁目 3 (〒651-2102)

^{c)}名古屋大学, 愛知県名古屋市千種区不老町 (〒464-8603)

^{d)}西江大学校, ソウル特別市麻浦区ペクポム路 35 (〒04107)

^{e)}株式会社高純度化学研究所, 埼玉県坂戸市千代田 5 丁目 1-28 (〒350-0214)

W. Asano^{a)}, M. A. A. Masud^{a)}, T. Nishi^{b)}, D. Oshima^{c)}, T. Kato^{c)}, K. Lee^{d)},

M. Kawahara^{e)}, F. Z. Chafi^{a)}, M. Nishikawa^{a)}, T. Ishibashi^{a)†}

^{a)} Nagaoka Univ. Tech., 1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

^{b)} Kobe City College Tech., 8-3 Gakuenhigashi-machi, Nishi-ku, Kobe-shi, Hyogo 651-2102, Japan

^{c)} Nagoya Univ., Nagoya-shi, Aichi 464-8603, Japan

^{d)} Sogang Univ., 35 Baekbeom-ro, Mapo-gu, Seoul 04107, Korea

^{e)} Kojundo Chem., 5-1-28 Chiyoda, Sakado-shi, Saitama, 350-0214, Japan

It is expected that ferromagnetic resonance frequency increased at compensation point for an angular momentum. In this study, $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ thin films prepared by metal-organic decomposition method were characterized by magneto-optical measurements and ferromagnetic resonance measurements. Compensation points for magnetization and an angular momentum were found at Ga compositions of 1 – 1.1 and 0.9 – 1, respectively. Gyromagnetic ratio was increased at Ga compositions of 1.

Keywords: Metal-organic decomposition method, Bi-substituted rare earth iron garnet, Gyromagnetic ratio, Angular momentum compensation composition, Ferromagnetic resonance, High frequency property

1. 序論

Bi 置換希土類鉄ガーネット($\text{R}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)は、可視から近赤外領域で優れた磁気光学(MO)特性を示すこと^{1)~3)}から、光アイソレータや磁気光学イメージングに用いられている。さらに、磁気光学イメージングでは、高周波プローブでは検出の困難な数 GHz 以上の近傍磁場の計測が期待されている。これまでに我々は、高周波領域における磁場を可視化する MO イメージング技術の開発に取り組み、 $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜を用いて、マイクロストリップラインから生じる近傍磁場を 6 GHz の周波数まで可視化することに成功している⁴⁾。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。そのためには、強磁性共鳴の周波数を向上させる必要がある。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、強磁性共鳴周波数が大きく増大することが知られている^{5), 6)}。そこで我々は、角運動量が補償点付

近の Bi 置換希土類鉄ガーネットを作製することを目的として研究を行ってきた。

Bi 置換希土類鉄ガーネットは、鉄イオンを含む四面体、八面体サイトと、希土類イオンを含む十二面体からなる。3つの四面体サイトと2つの八面体サイトに反平行の磁気モーメントを持つ Fe^{3+} が存在するため、フェリ磁性を示す。これらの Fe^{3+} を Al^{3+} や Ga^{3+} のような非磁性イオンで置換することで飽和磁化を制御することができる。また、選択する希土類イオンの種類によって、磁気モーメントの方向や大きさが異なる。そのため、非磁性イオンおよび希土類イオンの量を適切に選ぶことによって、角運動量補償組成を得ることができると考えられる。ただし、希土類イオンの種類によって磁性ガーネットの磁歪定数が大きく異なるため、得ようとする磁気異方性も考慮しながら組成を選択する必要がある。これまでに、Y, Nd, Eu, Sm, Pr などの希土類イオンを含む Bi 置換希土類鉄ガーネットについて磁気異方性を調べた結果⁴⁾から、 $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ は、磁気イメージングに適した面内磁気異方性を有し、角運動量補償組成が得られると期待できることがわかった。本論文では、 $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.5, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$,

Corresponding author: T. Ishibashi
(e-mail: t_bashi@mst.nagaokaut.ac.jp)

1.5, 2)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. 磁性ガーネットの高周波特性について

MO イメージング技術の高周波特性を改善するためには、まず、大きな磁気回転比 γ が必要である。次式は、強磁性体の磁化の時間応答を示すLLG方程式である⁵⁾。

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}] + \frac{\alpha}{M_s} \left[\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right] \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{M} は磁化ベクトル、 \mathbf{H} は磁場、 γ は磁気回転比、 α はダンピング定数である。第1項が歳差運動項、第2項が減衰項である。歳差運動項に含まれる係数 γ は共鳴周波数と比例関係にあり、これを制御することが重要である。

フェリ磁性の磁性ガーネットの場合、有効磁気回転比 γ_{eff} は、希土類の磁気回転比 γ_R 、希土類の磁気モーメント M_R 、鉄の磁気回転比 γ_{Fe} 、四面体および八面体サイトの Fe^{3+} の磁気モーメント $M_{\text{Fe}(te)}$ 、 $M_{\text{Fe}(oc)}$ を用いて次のように表される⁶⁾。

$$\gamma_{\text{eff}} = \frac{M}{S} = \frac{M_R + (M_{\text{Fe}(te)} - M_{\text{Fe}(oc)})}{\frac{M_R}{|\gamma_R|} + \frac{(M_{\text{Fe}(te)} - M_{\text{Fe}(oc)})}{|\gamma_{\text{Fe}}|}} = g_{\text{eff}} \frac{e}{2mc} \quad (2)$$

ここで、 M は正味の磁化、 S は正味の角運動量である。大きな磁気回転比を得るためには、上式より、正味の角運動量 S を小さくすればよいことがわかる。すなわち角運動量補償組成付近で大きな磁気回転比が得られると考えられる。一方で、磁気光学イメージングに用いるためには、面内磁気異方性、すなわち負の有効磁気異方性を兼ね備える必要がある。有効磁気異方性 K_{eff} は次のような式で表すことができる⁷⁾。

$$K_{\text{eff}} = K_1 + K_u - 2\pi M_s^2 \quad (3)$$

ここで、 K_1 は結晶磁気異方性定数、 K_u は一軸誘導磁気異方性定数、 $2\pi M_s^2$ は形状磁気異方性定数である。このうち、一軸誘導磁気異方性は選択した希土類サイトの元素の種類に依存する。また、形状磁気異方性は飽和磁化 M_s を変える、すなわち四面体サイトに非磁性イオンを置換することによって制御することができる。ただし、形状磁気異方性については、角運動量補償組成付近では M_s が小さくなり、磁気異方性への寄与は小さくなる。一軸誘導磁気異方性については、ガーネットの磁歪定数が希土類の種類によって符号も大きさも大きく異なることを利用して制御できると考えられる。一軸誘導磁気異方性定数と磁歪定数の関係は、次式で与えられる⁸⁾。

$$K_u = -\frac{3}{2}\lambda\sigma \quad (4)$$

ここで、 λ は磁歪定数、 σ は引っ張り応力である。また有機金属分解(MOD)法で作製したBi置換希土類鉄ガーネットは、基板との熱膨張係数の違いから、面内引っ張り応力が生じる⁹⁾。例えば、Ce, Sm, Euを用いた磁性ガーネットは、比較的大きな正の磁歪定数を有するため、面内引っ張り応力が面内磁気異方性に寄与することが期待される。

3. 実験

3.1 $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ 薄膜の作製

$\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.5, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2$)薄膜は、MOD溶液($\text{BiFeEu}(2/5/1)$, $\text{BiFeEuGa}(2/3/1/2)$ 、高純度化学研究所)を用いて各Ga置換量になるように調製した溶液を $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) (100)基板上に滴下、スピナーで3000 rpm、30秒の条件で塗布した。その後、 100°C のホットプレートで10分間乾燥、 450°C のホットプレートで10分間仮焼成を行った。この操作を5回繰り返した後、 770°C のマッフル炉で3時間本焼成を行った。

3.2 $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ 薄膜の評価

作製したガーネット薄膜の評価は、XRD測定、磁気光学測定およびFMR測定により評価を行った。XRD測定は、X線回折装置(Smart Lab 3kW (Rigaku))を使用し、線源はCu、測定範囲は $2\theta=20-80^\circ$ とした。磁気光学測定は、ストークスパラメータ法^{10, 11)}を用いて、マルチチャンネル分光器(USB2000+VIS-NIR)を使用し、波長範囲は450–950 nmとした。ここで、磁場は面直方向に印加された。FMR測定は、電子スピン共鳴分光装置(JEOL JES-RE2X)を使用し、マイクロ波周波数9.09 GHz、掃引磁場範囲0–10 kOe、変調磁場0.5 Oe、電力5 mW、磁場印加角度 $\beta=0-180^\circ$ (面直方向を 0°)として行った。

3.3 FMR測定による磁気異方性および高周波特性の評価

作製した薄膜の磁気異方性および磁気回転比 γ を、共鳴磁場 H_{res} の磁場方向依存性の測定から求めた^{7, 12)}。この手法により、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 の値を同時に調べることができる。

(100)配向の試料において、FMR測定の実験と解析に用いた座標系の模式図をFig. 1に示す。 θ と ϕ はそれぞれ磁化の極角と方位角である。 β は外部直流磁場 H の極角である。このときFMRが生じる条件は次式で与えられる^{7, 13)}。

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M_s^2 \sin^2 \theta} \left[\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} - \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial \phi} \right] \quad (5)$$

ここで、 ω は入射マイクロ波の角周波数、 M_s は試料の飽和磁化である。

単位体積当たりの磁化の総エネルギー E は、ゼーマンエネルギー、一軸誘導磁気異方性エネルギー、結晶磁気異方性エネルギー、形状磁気異方性エネルギーの和として次の

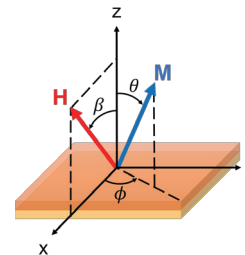


Fig. 1 A schematic illustration of coordinate system used in the experiments and analysis of FMR.

ように表される。

$$E = -HM_s(\sin\theta \cos\phi \sin\beta + \cos\theta \cos\beta) + K_u \sin^2\theta + \frac{K_1}{4}(\sin^4\theta \sin^2 2\phi + \sin^2 2\theta) + 2\pi M_s^2 \cos^2\theta \quad (6)$$

ここで、平衡状態で θ と ϕ は、 $\partial E/\partial\theta = 0$ および $\partial E/\partial\phi = 0$ を満たす。これを代入することで、共鳴条件式が次のように求められる。

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \left[H\cos(\beta - \theta) + 2\left(\frac{K_u}{M_s} - 2\pi M_s\right)\cos 2\theta + \frac{2K_1}{M_s}\cos 4\theta \right] \times \left[H\cos(\beta - \theta) + 2\left(\frac{K_u}{M_s} - 2\pi M_s\right)\cos^2\theta + \frac{K_1}{2M_s}(3 + \cos 4\theta) \right] \quad (7)$$

ここで、 H は H_{res} である。 β を変数として 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、最もよいフィッティング曲線を与えるパラメータとして、 K_1, K_u, γ を求めた。

4. 結果および考察

4.1 XRD 測定結果

作製した薄膜の XRD パターンを Fig. 2 に示す。全ての薄膜はいずれも GGG 基板の回折ピークの低角側にガーネット薄膜の回折ピークを確認できたことから、(100)配向した薄膜が得られていることがわかる。また、ピーク位置から求めた格子定数と最小二乗法によるフィッティング結果を Fig. 3 に示す。Ga 置換量が増加するとともに僅かであるが格子定数が小さくなる傾向が見られた。ここで、四面体サイトの Fe^{3+} および Ga^{3+} のイオン半径が 0.049 nm, 0.047 nm¹⁴⁾ であることから、 Ga^{3+} が Fe^{3+} の四面体サイトに優先的に置換されることで格子定数がわずかに小さくなったと考えられる。

4.2 磁気光学測定結果

作製した試料のファラデー回転角測定結果を Fig. 4 に示す。全ての薄膜において、520 nm 付近にピークを有する典型的な高濃度 Bi 置換希土類鉄ガーネットのファラデー回転スペクトルが得られた¹⁵⁾。また、Fig. 5 に 520 nm におけるファラデー回転角と Ga 置換量の関係を示す。図中の点線は、Bi 置換磁性ガーネットファラデー回転スペクトル

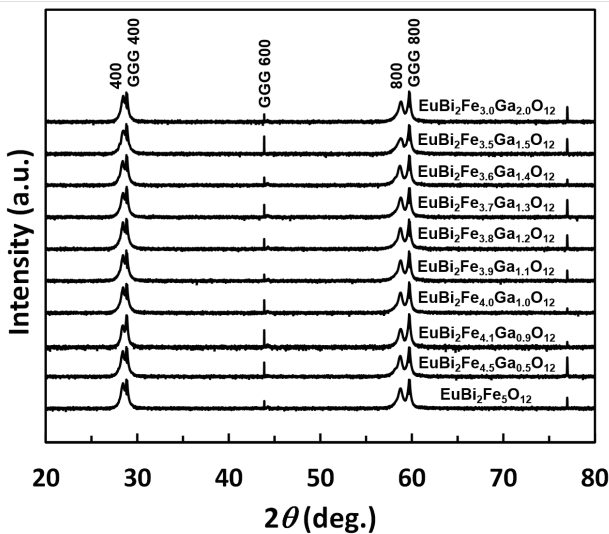


Fig. 2 XRD patterns of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films prepared on GGG (100) substrates.

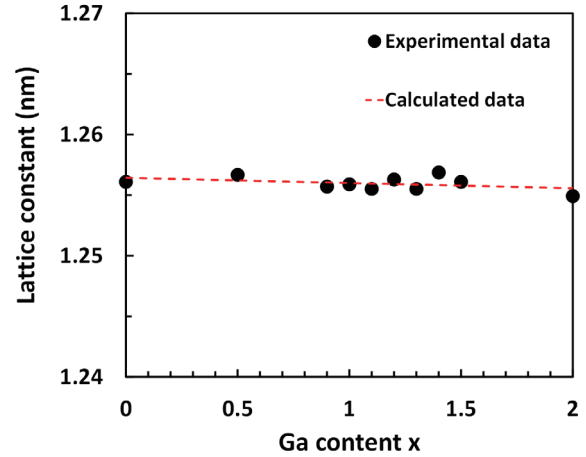


Fig. 3 Calculated value by the least-squares method and experimental data of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films prepared on GGG (100) substrates.

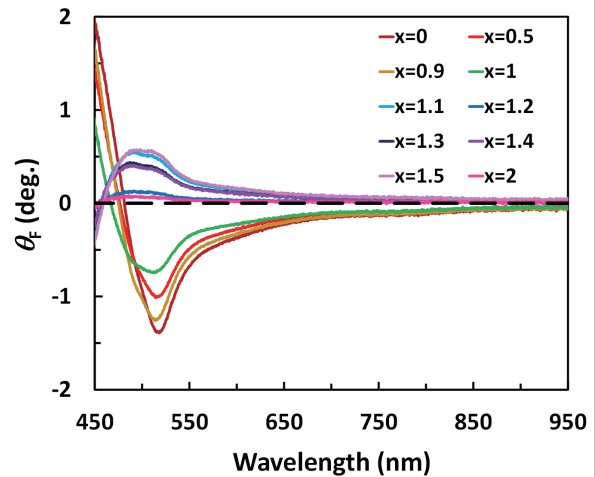


Fig. 4 Faraday spectra of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films prepared on GGG (100) substrates.

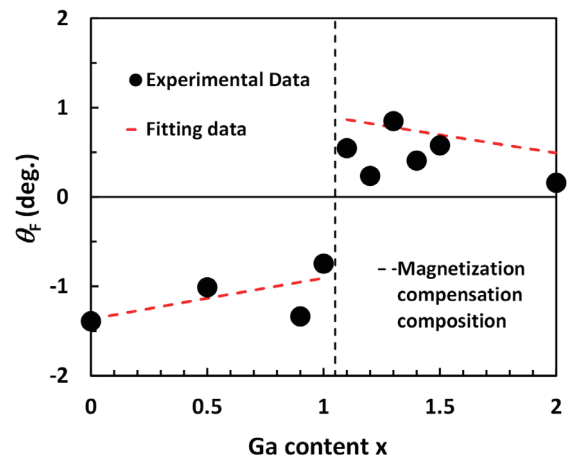


Fig. 5 Faraday rotation angle and Ga content of substitution around 520 nm of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films.

が次式,

$$\theta_F(\omega) = \frac{\pi e^2 \omega^2}{2nmc} \sum_{i=a,d} \left[\frac{N_i f_i}{\omega_{0i}} \left\{ \frac{(\omega_{0i} + \Delta_i)^2 - \omega^2 - \Gamma_i^2}{[(\omega_{0i} + \Delta_i)^2 - \omega^2 + \Gamma_i^2]^2 + 4\omega^2 \Gamma_i^2} - \frac{(\omega_{0i} - \Delta_i)^2 - \omega^2 - \Gamma_i^2}{[(\omega_{0i} - \Delta_i)^2 - \omega^2 + \Gamma_i^2]^2 + 4\omega^2 \Gamma_i^2} \right\} \right] \quad (8)$$

で表されることを利用して求めた回転角である¹⁶⁾。 e は電子の電荷、 m は電子の質量、 N は活性イオン密度、 $\omega_{0i\pm}$ ($=\omega_0 \pm \Delta$) は右円偏光と左円偏光の共鳴エネルギー、 ω_0 は共鳴電子遷移エネルギー、 $f_{\pm i}$ は右円偏光と左円偏光の振動子強度、 Γ_i は遷移の半値幅である。 また、 $i(=a,d)$ は、 a は八面体サイトおよび d は四面体サイトを表す。 ただし、 $x=0$

の時のファラデー回転角-1.4度として、 Ga置換量依存性を計算した。 また、導入した Ga^{3+} の90%が四面体サイトの Fe^{3+} を置換する¹⁶⁾とした。 Ga置換量0~1の時と、 Ga置換量1.1~2の時とでスペクトルの正負が反転していることがわかる。 この結果は、四面体サイトと八面体サイトの磁気モーメントの優位が反転したことを示すものである。 したがって、 Ga置換量1~1.1の間に正味の磁化が消失する磁化補償組成が存在すると考えられる。 また、得られたファラデー回転角の Ga置換量依存性については、実験データにばらつきがあるものの予想と傾向が合っていることがわかる。

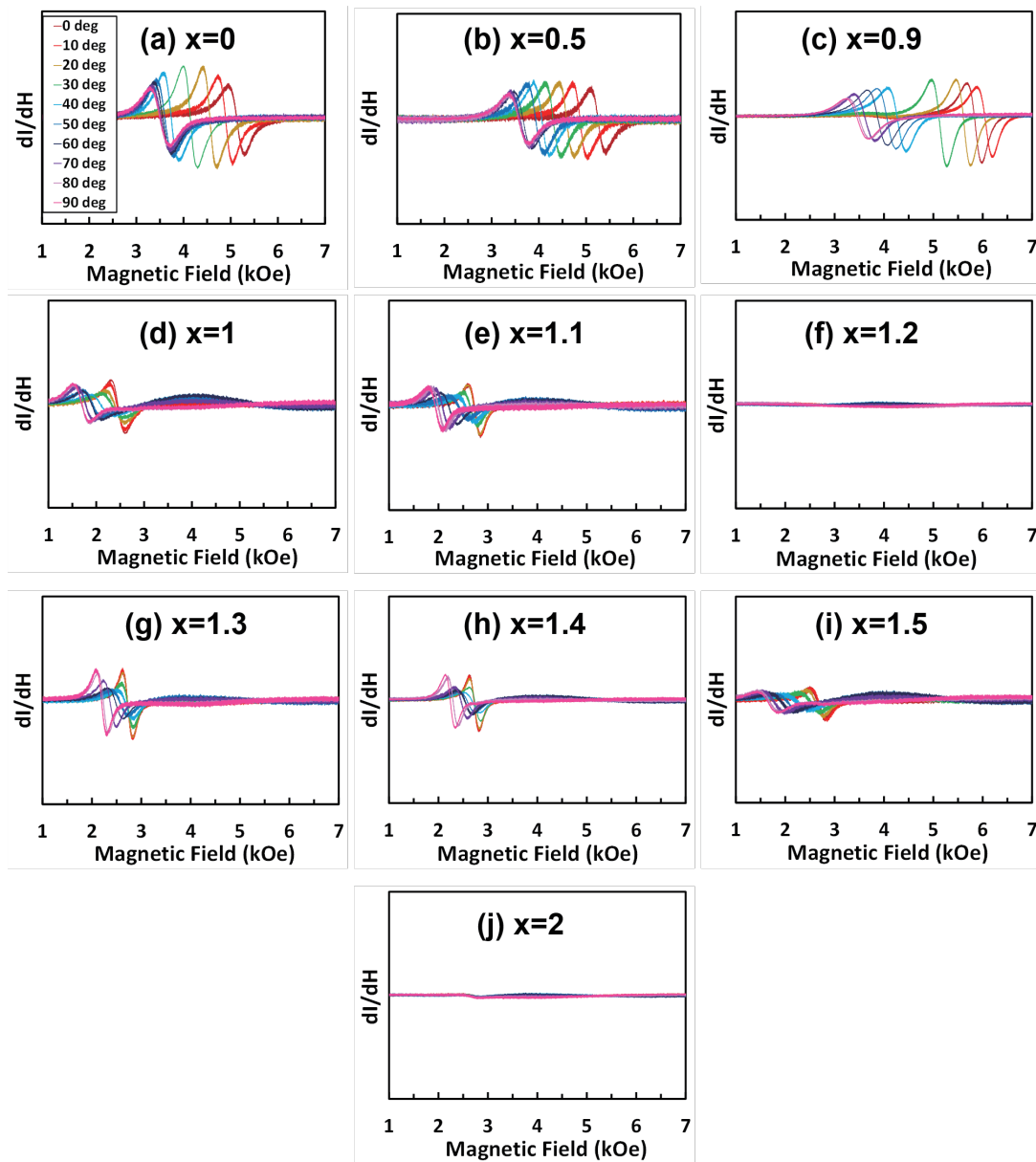


Fig. 6 FMR spectra of (a) $x=0$, (b) $x=0.5$, (c) $x=0.9$, (d) $x=1$, (e) $x=1.1$, (f) $x=1.2$, (g) $x=1.3$, (h) $x=1.4$, (i) $x=1.5$, and (j) $x=2$ of $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ thin films prepared on GGG (100) substrates.

4.3 FMR 測定結果

作製した試料の FMR の測定結果を Fig. 6 に、 H_{res} の値を β に対してプロットしたものを Fig. 7 に示す。 H_{res} の実験値は FMR スペクトルを積分して得られたマイクロ波の吸収の値が最大となる磁場の値とした。 Ga 置換量 0~1.5 の時は、 H_{res} は $\beta=90^\circ$ で対称であったため、 $\beta=100-180^\circ$ のスペクトルは省略した。 また、各スペクトルに重畳した GGG 基板由来の信号を差し引いた。 GGG 基板の電子スピン共鳴の吸収は Gd^{3+} などに起因する常磁性共鳴によるものであると考えられる⁵⁾。

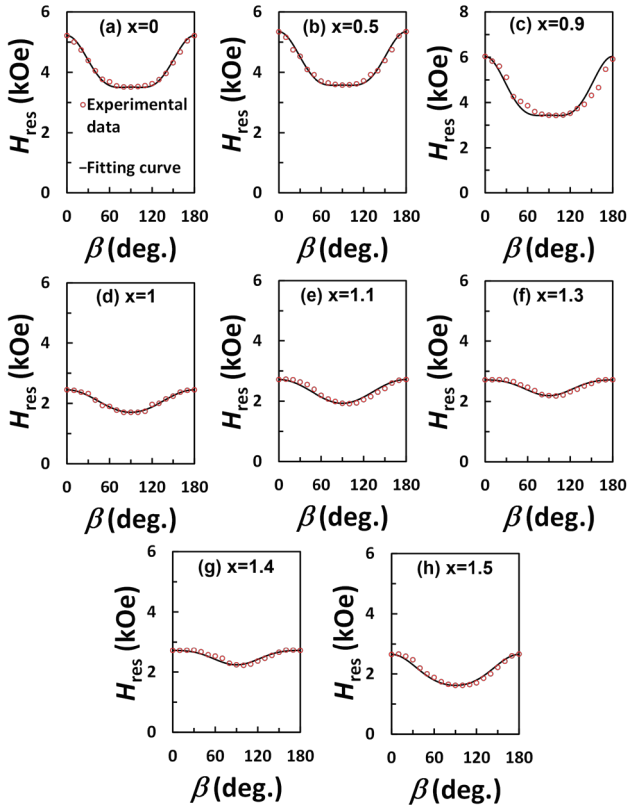


Fig. 7 The angle of magnetic field application β dependence of resonance magnetic field H_{res} of (a) $x=0$, (b) $x=0.5$, (c) $x=0.9$, (d) $x=1$, (e) $x=1.1$, (f) $x=1.3$, (g) $x=1.4$, and (h) $x=1.5$ of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films prepared on GGG (100) substrates.

Table 1 K_1 , K_u , K_{eff} and γ of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films deduced from FMR analysis.

Ga content	K_1 ($\times 10^3$ erg/cm ³)	K_u ($\times 10^3$ erg/cm ³)	K_{eff} ($\times 10^3$ erg/cm ³)	γ (MHz/Oe)
0	-25.9	20.6	-96.1	2.51
0.5	-14.8	-12.2	-55.7	2.46
0.9	-8.49	-17.7	-29.6	2.60
1	-0.0941	-2.18	-3.23	4.72
1.1	-0.00717	-0.350	-0.368	4.19
1.2	—	—	—	—
1.3	0.695	-0.958	-2.95	3.74
1.4	1.36	1.20	-3.76	3.67
1.5	-2.15	-3.61	-17.2	4.95
2	—	—	—	—

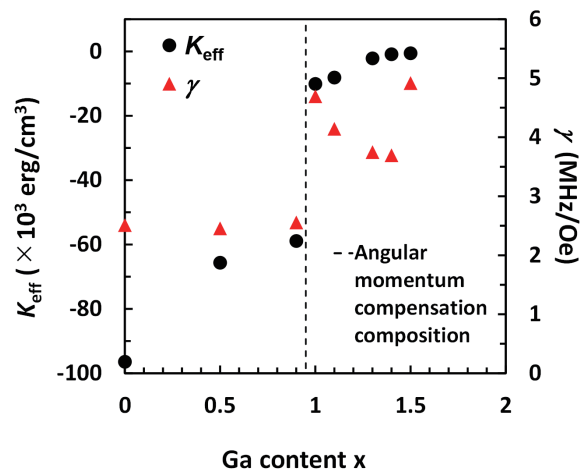


Fig. 8 Effective magnetic anisotropy constant K_{eff} and gyromagnetic ratio γ of $EuBi_2Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ thin films.

Ga 置換量 1.2, 2 の時は、 FMR スペクトルのピークが他のものとは非常に小さく H_{res} の確認が出来なかった。 Ga 置換量 0~1.5 の時は、 H_{res} が $\beta=90^\circ$ で最小値となり、 $\beta=0^\circ, 180^\circ$ で最大値となっていることから、面内方向に磁化容易軸を持つことがわかる。 また、 $\beta=0^\circ$ の H_{res} が Ga 置換量 0.9 で約 6 kOe だったのに対し、 Ga 置換量 1 で約 2.5 kOe と約 0.4 倍に減少した。 共鳴磁場が減少したことによって、磁気回転比 γ の値が大きくなると予想される。

5.4 FMR 測定解析結果

今回は、飽和磁化として文献値を用いて算出し解析した。条件としては、格子定数を 1.260 nm、温度を 295 K、 Bi^{3+} の磁気モーメントは 0、 Ga^{3+} は Fe^{3+} の四面体サイトに 90% 置換する¹⁶⁾こととした。 $Y_3Fe_5O_{12}$ の磁気モーメント¹⁷⁾から室温の Fe^{3+} の磁気モーメントを、 $Eu_3Fe_5O_{12}$ の磁気モーメント¹⁸⁾から室温の Eu^{3+} の磁気モーメントを算出した。 これらを用いて飽和磁化を算出した結果は、 Ga 置換量 0, 0.5, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2 でそれぞれ 120.8, 66.5, 23.1, 12.2, 1.3, 9.5, 20.4, 31.3, 42.1, 96.4 emu/cm³であった。

式(7)を用いたフィッティングにより求めた異方性定数 K_1 , K_u , K_{eff} および磁気回転比 γ を Table 1 に示す。 また、 K_{eff} と γ の Ga 置換量依存性を Fig. 8 に示す。 およびは、 Ga 置換量を増加することによって減少する傾向が見られた。 しかし、 K_u については、負の値を示した。 このことは、正の磁歪定数をもつ希土類 (Y, Nd) を用いたビスマス置換磁性ガーネットと反対の結果であり、この材料が負の磁歪定数を持つことを示している。最終的に K_{eff} が負の値を持ったことから、Eu を用いることで、Ga 置換量を 1.5 まで増加させても負の値となり、磁気光学イメージング材料として必要な面内磁気異方性を示した。さらに、 γ は Ga 置換量を 0.9 から 1 に増加させたところで、約 4.7 MHz/Oe と他のものとは比べて約 1.9 倍に増加した。このことから、Ga 置換量 0.9~1 で角運動量補償組成があると考えられる。

6. 結論

MOD 法を用いて GGG(100)基板上に(100)配向した $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.5, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2$) 薄膜を作製した。磁気光学測定の結果、全ての薄膜において、520 nm 付近にピークを有する典型的な高濃度 Bi 置換希土類鉄ガーネットのファラデー回転スペクトルが得られた。また、ファラデースペクトルの正負が逆転したことから、Ga 置換量 1~1.1 の間に正味の磁化が消失する磁化補償組成が存在すると考えられる。FMR 測定の解析結果から、Ga 置換量 0.9~1 で角運動量補償組成が存在すると考えられる。また、Ga 置換量を 0.9 から 1 に増やしたところで、 γ が約 4.7 MHz/Oe と他のものと比べて約 1.9 倍に増加した。

今回、Bi 置換量が 2.0 と高い Bi 置換磁性ガーネット薄膜において、室温で磁化補償組成および角運動量補償組成が得られることを初めて示すことができた。さらに、角運動量補償組成付近で γ の増大が観察され、Bi 置換磁性ガーネットの高周波特性向上の可能性が示された。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 二国間交流事業(JPJSBP-120208805)、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。

References

- 1) L. E. Helseth, R. W. Hansen, E. I. Il'yashenko, M. Baziljevich, and T. H. Johansen: *Phys. Rev. B*, **64**, 174406 (2001).
- 2) S. Wittekoek, T. J. A. Poprna, J. M. Robertson, and P. F. Bongers: *Phys. Rev. B*, **12**, 2777 (1975).
- 3) M. Gomi, K. Satoh, and M. Abe: *J. Appl. Phys.*, **63**, 3642 (1988).
- 4) R. Urakawa, W. Asano, M. Nishikawa, M. Kawahara, T. Nishi, D. Oshima, T. Kato, and T. Ishibashi: *AIP. Adv.*, **12**, 095322 (2022).
- 5) K. Ohta: *Jikikogaku no Kiso 2* (in Japanese), p. 341 (Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 2017).
- 6) R. C. LeCraw, J. P. Remeika, and H. Matthews: *J. Appl. Phys.*, **36**, 901 (1965).
- 7) H. Makino, and H. Yasuharu: *Mat. Res. Bull.*, **16**, 957 (1981).
- 8) P. Hansen, and J. P. Krumme: *Thin Solid Films*, **114**, 69 (1984).
- 9) V. J. Fratello, S. J. Licht, C. D. Brabde, H. M. O'Bryan, and F. A. Baiocchi: *J. Cryst. Growth*, **142**, 93 (1994).
- 10) S. Wang, H. Onoda, J. Harbovsky, H. Yanagihara, J. Inoue, M. Veis, and T. Ishibashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **47**, 137 (2023).
- 11) H. Sakaguchi, S. Isogami, M. Niimi, and T. Ishibashi: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **56**, 365002 (2023).
- 12) N. Adachi, V. P. Denysenkov, S. I. Khartsev, A. M. Grishin, and T. Okuda: *J. Appl. Phys.*, **88**, 2734 (2000).
- 13) N. Bloembergen: *Proc. IRE*, **44**, 1259 (1956).
- 14) R. D. Shannon: *Acta Crystallogr.*, **A32**, 751 (1976).
- 15) T. Ishibashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **44**, 108 (2020).
- 16) L. E. Helseth, R. W. Hansen, E. I. Il'yashenko, M. Baziljevich, and T. H. Johansen: *Phys. Rev. B*, **64**, 174406 (2001).
- 17) P. Hansen, and J. P. Krumme: *J. Appl. Phys.*, **45**, 2728 (1974).
- 18) L. G. Van Uitert, E. M. Gyorgy, W. A. Bonner, W. H. Grodkiewicz, E. J. Heilner, and G. J. Zyzdik: *Res. Bull.*, **6**, 1185 (1971).

2023 年 12 月 20 日受理, 2024 年 4 月 26 日採録