(YTmRBi)₃(FeGa)₅O₁₂ ガーネット (110) 膜のオルソ ロムビック磁気異方性 (R=Gd, Sm, Eu, La)

Orthorhombic Magnetic Anisotropy in (YTmRBi)₃(FeGa)₅O₁₂ Garnet (110) Films (R=Gd, Sm, Eu and La)

菊川信吾・磯村 悟・岩田 聡・塩見 繁・内山 晋

名古屋大学工学部, 名古屋市千種区不老町 (〒464)

S. Kikukawa, S. Isomura, S. Iwata, S. Shiomi, and S. Uchiyama

Faculty of Engng., Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464

New bubble garnet films with orthorhombic anisotropy, (YTmGdBi)₃(FeGa)₅O₁₂, (YTmEuBi)₃(FeGa)₅O₁₂, (YTmSmBi)₃(FeGa)₅O₁₂ and (YTmLaBi)₃(FeGa)₅O₁₂, have been epitaxially grown on (110) GGG substrates. Although a large in-plane anisotropy K_p of $2\sim4\times10^4$ erg/cm³ is induced in YTmEu and YTmSm films, the uniaxial anisotropy K_u obtained is not large enough to be used for bubble materials. In YTmGd and YTmLa films, K_u is of almost the same magnitude as K_p with a value of $1.0\sim1.5\times10^4$ erg/cm³. The wall dynamics has been investigated by stripe domain transport method. For YTmLa films, the wall mobility μ is ~22 m/sOe, the peak velocity V_p is ~120 m/s and the coercive force H_c is ~0.7 Oe. These characteristics may be useful for current access devices.

1. ま え が き

バブル膜において面内磁気異方性は、磁壁動特性の向上に有効であることが理論的に示されている¹⁾。実験的には (110) GGG 基板上に LPE 成長によって得られたガーネット膜がオルソロムビック磁気異方性を有し、(111) ガーネット膜よりすぐれた磁壁動特性を示すことが報告されている^{2)~4)}。このような (110) ガーネット膜の磁気異方性は、歪誘導によるもの³⁾と成長誘導によるもの⁴⁾があるが、実用的には成長誘導によるものの方が望ましい。

最近、Bi を含んだ (YBi)₃(FeGa)₅O₁₂ 及び (YTmBi)₃(FeGa)₅O₁₂ という組成の膜において、主に成長誘導によりオルソロムビック磁気異方性が生じることが報告されている⁴⁾。筆者らは、(YTmBi)₃(FeGa)₅O₁₂ 膜の LPE 成長を試みたが、過冷却の小さい場合には格子定数のミスマッチによるクラックが入りやすく、鏡面の膜を得るためには過冷却温度を大きくとらなければならなかった。しかし、過冷却温度を大きくすると、膜に析出物が付着しやすくなり抗磁力も大きくなるなど、良好なバブル膜を得るためには好ましくない。そこで筆者らは、格子定数のミスマッチを防ぎ、過冷却温度の小さいところで鏡面の膜を得られるようにするため、Y³⁺ イオンよりもイオン半径の大きい Gd³⁺, Eu³⁺, Sm³⁺ 及び La³⁺ を

加えた膜を作成し、その磁気異方性や磁壁動特性を調べた。

2. 実験方法

膜の成長は、通常の LPE 法によった。基板は水平にディップし、100 rpm で回転させ、更に 3 sec おきに回転させた。

まず初めに (YTmBi)₃(FeGa)₅O₁₂ 膜とこれに Gd, Eu, Sm 及び La を少量加えた膜を作成した。このときのメルトの組成を示す R_1 , R_3 及び R_4 パラメータは、それぞれ 17.5, 5.0 及び 0.12 と一定の値とし、 R_2 パラメータは YTm, YTmGd, YTmEu, YTmSm 及び YTmLa 膜の場合それぞれ 6.8, 8.0, 7.25, 6.8 及び 6.8 とした。また Y₂O₃: Tm₂O₃: R₂O₃ (R は Gd, Eu, Sm 及び La) の比は 1:1:0.3 とし、YTm 膜の場合は、Y₂O₃: Tm₂O₃=1:1 とした。なお $R_1\sim R_4$ パラメータは次式で定義した。

$$\begin{aligned} R_1 &= \text{Fe}_2\text{O}_3 \div (\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Tm}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O}_3) \\ R_2 &= \text{Fe}_2\text{O}_3 \div \text{Ga}_2\text{O}_3, \quad R_3 = \text{PbO} \div \text{Bi}_2\text{O}_3 \\ R_4 &= (\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Tm}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3) \\ &\quad \div (\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Tm}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 \\ &\quad + \text{PbO} + \text{Bi}_2\text{O}_3) \end{aligned}$$

作成した膜の材料パラメータは、次の方法により求めた。特性長 l は Fowles-Copeland 法、飽和磁化 $4\pi M_s$

Fig. 1 Surface condition for $(\text{YTmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, $(\text{YTmGdBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, $(\text{YTmEuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, $(\text{YTmSmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ and $(\text{YTmLaBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ films as a function of growth temperature T_g .

Fig. 2 Uniaxial and in-plane anisotropy constants K_u and K_p for YTm, YTmGd, YTmEu, YTmSm and YTmLa films as a function of growth temperature T_g .

は振動試料型磁力計，異方性エネルギー定数 K_u 及び K_p はトルク磁力計，Gilbert のダイピング定数 α 及びジャイロ磁気定数 γ は強磁性共鳴によりそれぞれ求めた。

3. 実験結果

Fig. 1 は，膜の成長温度 T_g を変数として，作成した膜の状態を示したものである。YTm 膜の場合には，過冷却が小さいと膜にクラックが入るため，鏡面の膜を得るためには過冷却温度を 120°C と大きくとらなければならない。これに対し，Gd, Eu, Sm 及び La を加えた場合には，鏡面の膜を得るのに必要な過冷却温度は $40\sim 70^\circ\text{C}$ まで低下している。

鏡面の膜のうち成長温度が最も高い試料についての

Fig. 3 Gyorgy's parameters A and B for YTm, YTmGd, YTmEu, YTmSm and YTmLa films.

Table 1 Material parameters of YTm, YTmGd, YTmEu, YTmSm and YTmLa films both with flat surface and with the highest growth temperature.

Com-position	YTm	YTmGd	YTmEu	YTmSm	YTmLa
$h(\mu\text{m})$	3.3	4.9	3.2	11	3.9
$l(\mu\text{m})$	0.96	1.3	0.67	0.51	0.87
$4\pi M_s(\text{Gauss})$	162	132	128	137	180
$K_u(\times 10^4 \text{ erg/cm}^3)$	1.4	1.0	0.31	0.21	1.1
$K_p(\times 10^4 \text{ erg/cm}^3)$	1.5	1.2	2.2	3.3	1.3
$Q_1(=K_u/2\pi M_s^2)$	13	14	4.8	2.8	8.5
$Q_2(=K_p/2\pi M_s^2)$	14	17	34	44	10
$\gamma(\times 10^7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1})$	1.2	1.0	0.95	1.0	1.2
α	0.023	0.021	0.030	0.096	0.023

材料パラメータを Table 1 に示す。ここで K_p は (001) 軸を正方向としたときの面内異方性エネルギー定数である。

Fig. 2 は，膜の成長温度 T_g と異方性エネルギー定数 K_u 及び K_p の関係を示している。Gd あるいは La を加えた膜では，YTm 膜に比べて K_u がいくらか減少しているが， K_p はほとんど変化していない。一方，Sm あるいは Eu を加えた膜では， K_p は 2 倍程度に増加しているが， K_u は著しく減少している。この傾向は Sm を加えた膜で特に顕著である。 K_p の増大は，磁壁動特性の改善に有効であるが， K_u の減少はバブル材料としては好ましくない。ただし，ここでは結晶磁気異方性定数 $K_1=0$ として， K_u , K_p を算出したが，YTmEu 系

Fig. 4 Surface condition for YTmLa films as a function of growth temperature T_g and $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$ ratio in melt.

Fig. 5 Gyorgy's parameters A and B for YTmLa films with $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$ ratio as a parameter.

Fig. 6 Apparent velocity V of single stripe domain as a function of drive field ΔH . The direction of velocity V is perpendicular to the easy axis of in-plane anisotropy.

などでは、今後、 K_1 も含めて磁気異方性の決定を行なう必要がある。

次に K_u , K_p から次式により求めた Gyorgy⁶⁾ の異方性パラメータ A 及び B を Fig. 3 に示す。

Fig. 7 Peak velocity V_p , wall mobility μ , uniaxial and in-plane anisotropy constants K_u and K_p , coercive force H_c and supercooling temperature ΔT for YTmLa films both with flat surface and with the highest growth temperature as a function of $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$ ratio in melt.

$$A = -K_u + K_p$$

$$B = -2(K_u + K_p)$$

Gd あるいは La を加えた膜では、YTm 膜に対して B の絶対値 $|B|$ がいくらか減少している程度で大きな変化はみられない。これに対して、Eu あるいは Sm を加えた膜では、 A , $|B|$ ともに増加して $B = -2A$ の線に近づいている。このように Eu 及び Sm は磁気異方性に大きな影響を与えているが、Eu 及び Sm が特に大きい成長誘導磁気異方性を与えることは、希土類鉄ガーネットの単結晶の研究により従来から知られている⁶⁾。本実験では、磁気異方性に対する歪誘導の寄与を分離していないが、Eu 及び Sm を加えた膜で異方性パラメータ A , $|B|$ が増大するのは、成長誘導異方性による寄与が大きいものと考えられる。

以上得られた膜のうち YTmSm 膜は、Table 1 に示したようにダンピング定数 α が 0.096 と大きく、高速バブル材料としては好ましいとは言えない。YTmEu 膜は、 K_p が大きいので大きい磁壁ピーク速度が期待される。しかし、Table 1 からわかるように K_u が小さいため、128 Gauss の $4\pi M_s$ に対して Q_1 が 4.8 と比較的小さく、バブル径を微小化するために $4\pi M_s$ を増加させると、ますます Q_1 が小さくなり実用上問題がある。YTmGd 膜と YTmLa 膜は、 α も小さく、 K_u も十分大きい。この二つの組成の膜は、比較的良好な性質を示しているが、ここでは La を含んだ膜についてより詳しく調べた。

Fig. 4 は、メルト中の Y_2O_3 に対する La_2O_3 の比と

成長温度 T_g を変数としたときの膜の状態を示したものである。ただし、 Y_2O_3 と Tm_2O_3 の比は、すべて 1:1 とし、 $R_1 \sim R_4$ パラメータはそれぞれ 17.5, 6.8, 5.0 及び 0.12 とした。メルト中の La_2O_3 の比が増えるに従って飽和温度は緩やかに減少してゆくのにに対し、膜にクラックが入る境界温度は上昇してゆく。しかし、過冷却温度が低くなるとヒロックが発生するようになるため、鏡面の膜を得るためには過冷却温度を $50^\circ C$ 以上にとる必要がある。

作成した膜について Gyorgy のパラメータ A と B の関係を Fig. 5 に示す。 A 及び B は、 La_2O_3/Y_2O_3 が 0.3 までは $|B|$ がいくらか減少する程度で大きな変化を示さないが、 La_2O_3/Y_2O_3 が 0.5, 0.7 と増加するに伴い、 $|B|$ が急激に減少してゆき、 A の成長温度依存性が顕著になっている。

4. 磁壁動特性の測定及び検討

鏡面でかつ成長温度の最も高い試料について YTm 膜と YTmLa 膜の磁壁動特性をストライプ磁区転送法^{7,8)}により測定した。ストライプ磁区の転送方向は、面内異方性の容易軸の垂直方向とした。Fig. 6 は、 La_2O_3 と Y_2O_3 の比が 0, 0.3, 0.7 の試料について、ストライプ磁区の見掛けの転送速度 V と駆動磁界 ΔH の関係を示したものである。ここで ΔH は、磁界勾配とストライプ幅の積の 2 分の 1 である。転送速度 V は、駆動磁界 ΔH を増すとともに増加してゆくが、 ΔH のある値でピーク値に達した後、逆に減少している。 La_2O_3 の比が大きくなるにつれてピーク速度及びモビリティはいくらか増加し、抗磁力 H_c はかなり顕著に減少している。

磁壁動特性を測定した膜の K_u , K_p , モビリティ μ , ピーク速度 V_p , 過冷却温度 ΔT 及び抗磁力 H_c と La_2O_3 と Y_2O_3 の比の関係を Fig. 7 に示す。 K_u , K_p は $La_2O_3/Y_2O_3=0.3$ までは緩やかに減少し、その後、急激に減少している。これに対し H_c は、 La_2O_3 の比が 0.3 までに 1.50e から 0.70e まで減少し、その後、緩やかに減少している。抗磁力 H_c は、膜を成長させたときの過冷却温度 ΔT にほぼ比例して減少しており、 ΔT を小さくすることが、 H_c を下げるためには重要であることがわかる。一方、モビリティ μ とピーク速度 V_p は La_2O_3 の比が大きくなるといくらか増加しており、La を加えることは、磁壁動特性の上からも好ましいといえる。

5. ま と め

本研究では、従来の $(YTmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ 膜に Y^{3+} よりイオン半径の大きい Gd^{3+} , Eu^{3+} , Sm^{3+} 及び La^{3+} を加えた (110) ガーネット膜を作成した。その結果、基板と膜の格子定数のミスマッチによるクラックが入りにくくなり、過冷却の小さいところで鏡面の膜が得られるようになった。このうち、Sm を含んだ膜はダンピングが大きく高速バブル材料としては適切でなく、Eu を含んだ膜は大きな面内異方性をもち磁壁動特性の上からは好ましいが、一軸異方性が低いためバブル材料としては今後の検討が必要である。

Gd あるいは La を含んだ膜はよく似た特性を示したが、このうち La を含んだ膜について詳しく調べた。その結果、YTm 膜に La を加えることにより、抗磁力が半減し、モビリティやピーク速度もいくらか向上することがわかった。La は多く加えすぎると K_u , K_p の低下を招くため、メルト中で $Y_2O_3 : Tm_2O_3 : La_2O_3$ が 1:1:0.3 程度が適切と考えられる。

本研究を進めるにあたり有益な助言をいただいた綱島滋助教授、転送パターンを提供していただいた富士通研究所の折原尚武氏に深く感謝いたします。また本研究は武田科学振興財団の研究助成を受けて行われたものである。

文 献

- 1) E. Schlömann: *J. Appl. Phys.*, **47**, 1142 (1976).
- 2) W. T. Stacy, A. B. Voermans, and H. Logmans: *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 817 (1976).
- 3) D. J. Breed, W. T. Stacy, A. B. Voermans, H. Logmans, and A. M. J. van der Heijden: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-13**, 1087 (1977).
- 4) T. Hibiya, H. Makino, and S. Konishi: *J. Appl. Phys.*, **52**, 7347 (1981).
- 5) E. M. Gyorgy, A. Rosencwaig, E. I. Blount, W. J. Tabor, and M. E. Lines: *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 479 (1971).
- 6) E. M. Gyorgy, M. D. Sturge, L. G. Van Uitert, E. J. Heilner, and W. H. Grodkiewicz: *J. Appl. Phys.*, **44**, 438 (1973).
- 7) S. Iwata, S. Shiomi, and S. Uchiyama: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 197 (1979).
- 8) S. Iwata, S. Shiomi, and S. Uchiyama: *J. Appl. Phys.*, **50**, 7859 (1979).

1982 年 12 月 20 日受理, 1983 年 2 月 17 日採録