磁性ガーネット薄膜の光熱磁気書込み特性

Thermomagnetic Writing Characteristics in Magnetic Garnet Films

井上文雄*・中川活二*・伊藤彰義・川西健次

日本大学理工学部電子工学科 (*同大学院理工学研究科), 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

F. Inoue,* K. Nakagawa,* A. Itoh and K. Kawanishi

Department of Electronic Engineering, College of Science and Technology,

Nihon University, (*Graduate Division of Nihon University),

24-1 Narashinodai 7-chome, Funabashi-city, Chiba 274.

The thermomagnetic writing was studied for $(\text{BiSmEr})_3(\text{GaFe})_5\text{O}_{12}$ films. Since the optical absorption coefficient (α) of this kind of films is relatively low, the writing threshold power (P_w) becomes larger than those of other materials.

In order to lower P_w , the effective optical-path length was enhanced by increasing the film thickness (h) and/or by coating them with reflecting layers. Firstly, P_w was minimized by choosing $h = 1/\alpha$ to $2/\alpha$; i.e. $P_w = 20$ mW at $h = 2.2 \mu\text{m}$, 13 mW at $2.2 \mu\text{m}$ and 12 mW at $1.0 \mu\text{m}$, for the laser irradiation with the duration of $10 \mu\text{s}$, a spot radius of $2.5 \mu\text{m}$, and with $\lambda = 514.5, 488.0$ and 457.9 nm, respectively. Analytical calculation of heat conduction for this system indicates that the optimum thickness for which the temperature elevation on the film-substrate boundary reaches maximum lies also between $1/\alpha$ and $2/\alpha$. Since, however, the selection of the film thickness is limited by restriction in the wall coercivity (H_w), some reflecting layers were put on these films. The preliminary results for a $0.55 \mu\text{m}$ thick film with a $0.12 \mu\text{m}$ thick Al reflector are $P_w = 26$ mW for $\lambda = 514.5$ nm, and 20 mW for 488.0 nm. These values of P_w were 52% and 69% of those without reflector, respectively.

1. ま え が き

近年, MnBi 多結晶膜や GdFe などの非晶質膜への光熱磁気記録の研究が盛んであるが, MnBi は高湿度雰囲気

に弱く¹⁾ 非晶質膜も安定性に問題があると思われる。筆者らは, 安定な酸化物磁性体である希土類-鉄-ガーネット (RIG) 膜を高保磁力化し, 光熱磁気書込みを可能にし^{2,3)}, 膜の光吸収係数 α の波長依存性による書込み特性の変化についても報告した^{4,5)}。

RIG 膜は非晶質膜などに比べ α が小さく, 書込み閾値パワー P_w は比較的大きい。これを低下することは重要である。膜の吸収エネルギーは, 膜厚 h を増加しても, 膜面に反射膜を積層し光の実効パスを増加しても増大できる。ここでは, 書込み特性の膜厚依存性の詳細な検討と反射膜による P_w の低減化について報告する。

2. 磁気・光学特性

実験には $(\text{BiSmEr})_3(\text{GaFe})_5\text{O}_{12}$ 膜を使用した。室温における磁気特性および光学特性を Table 1, Fig. 1 に示す。Sm と Er の組合せで一軸磁気異方性 (K_u) を増大し, また磁壁保磁力 H_w を増すため基板との格子定数のミスマッチ $\Delta a = a_s - a_f$ を約 $-0.04 \text{ \AA}$ とした⁵⁾。 α は波長 $\lambda \lesssim 500$ nm で急激に大きくなり, また Bi 置換により

Table 1 Magnetic properties at room temperature.

Sample	1	2	3	4
h [μm]	0.55	1.0	2.2	3.6
$4\pi M_s$ [G]	377	234	342	223
H_w [Oe]	43.2	37.9	36.5	107
H_N [Oe]	89	77	34	67
$K_u \times 10^{-4}$ [erg/cc]	1.95	3.62	5.38	6.28
T_c [$^{\circ}\text{C}$]	138	140	148	132
$d_c = \sigma_w/M_s H_w$ [μm]	1.8	4.6	4.1	2.2

Fig. 1 Faraday rotation and absorption spectrum at room temperature.

Fig. 2
Schematic illustration of the calculation model.

Fig. 3
Threshold power as a function of film thickness h .

ファラデー回転角 θ_F 、性能指数 $2\theta_F/\alpha$ は 1 桁大きくなっている。記録密度を決定する最小磁区を与える臨界直径 d_c は、 $d_c \approx \sigma_w/M_s \cdot H_w$ で与えられる。飽和磁化 M_s 、 H_w は実測値、磁壁エネルギー密度 σ_w はキュリー点 T_c から推定した交換定数 $A^{7)}$ と K_u の実測値から求めた値を用いたところ d_c として $1.8 \mu\text{m}$ が得られている。

3. 熱伝導解析

熱伝導解析は、**Fig. 2** のように基板を半無限と考え、また磁性層、基板共に熱容量 $c\rho$ 、温度拡散率 k がそれぞれ等しいと仮定し、磁性層表面 ($z=0$) は断熱として行なった。ガウス分布のレーザ光による熱源分布 $q [\text{W}/\text{cm}^2]$ は

$$q = q_0 e^{-(r/R)^2} (Ae^{-\alpha z} + Be^{\alpha z}) \quad (1)$$

$$\left(\text{ここで: } q_0 = \frac{\alpha}{\pi R^2} \cdot P_0 C \right)$$

となる。ここで、 R はスポット半径、 P_0 は照射パワーである。膜面からレーザ光を照射する場合 $A = C = 1$, $B = 0$ 、基板側から照射する場合 $z=0$ での反射率を ρ_r として $A = \rho_r$, $B = 1$, $C = e^{-\alpha h}$ である。 q と同じ分布の瞬間熱源 Q による t 秒後の温度分布 T_i は、

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{1}{c\rho} \frac{Q_0}{2} \frac{R^2}{4kt + R^2} \cdot e^{-r^2/(4kt + R^2)} \\ &\times \left[A \left\{ e^{\alpha^2 kt + \alpha z} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z + z}{2\sqrt{kt}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z + z + h}{2\sqrt{kt}} \right) \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + e^{\alpha^2 kt + \alpha z} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z - z}{2\sqrt{kt}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z - z + h}{2\sqrt{kt}} \right) \right) \right\} \right. \\ &\quad \left. - B \left\{ e^{\alpha^2 kt - \alpha z} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z + z}{2\sqrt{kt}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z + z - h}{2\sqrt{kt}} \right) \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + e^{\alpha^2 kt - \alpha z} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z - z}{2\sqrt{kt}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{2k\alpha z - z - h}{2\sqrt{kt}} \right) \right) \right\} \right] \\ &= Q_0 \cdot F(r, z, t) \quad (2) \end{aligned}$$

となり、レーザ照射開始 t 秒後の温度分布 T_c は式(3)で示される。

$$T_c = \int_0^t q_0 \cdot F(r, z, t-t') dt' \quad (3)$$

4. 書き込み特性の膜厚依存性

試料中最大の d_c は $4.6 \mu\text{m}$ であり、これに合わせレーザス

Fig. 4
Temperature distributions according to eqs. (2) and (3) using the writing threshold powers.

Fig. 5
Temperature elevation per unit power as a function of film thickness h ; $R = 2.5 \mu\text{m}$, $t = 10 \mu\text{s}$.

ット径 $2R$ を $5 \mu\text{m}$ とした。

Fig. 3 は、RIG 膜厚 h に対する書き込み閾値パワー P_w の実験結果である。 P_w は光特性長 $(1/\alpha)$ の $1 \sim 2$ 倍の膜厚で極小となる。この時の膜厚方向の温度分布の解析結果を **Fig. 4** に示す。 h の増加に伴い膜面 ($z=0$) と $z=h$ での温度差は大きくなるが、 $z=h$ での温度は h によらずほぼ一定である。**Fig. 5** に $z=0$ と $z=h$ での温度上昇を h の関数として示す。 $z=0$ の温度は h に対し単調に増加するが、 $z=h$ の温度は h が $1/\alpha \sim 2/\alpha$ のとき極大となる。試料全体が或る温度以上になるとき書込まれると考えられ、以上の結果と **Fig. 3** から書き込みの最適膜厚は $z=h$ での温度

上昇が極大になる膜厚で近似的に与えられる。

Fig. 6 は P_w のバイアス磁界 H_b 依存性を示す。 $h = 2.2 \mu\text{m}$ の試料では、ニュークリエーション磁界 H_N に近い H_b を加えた場合でも P_w の変化は数%にすぎないが、 $h = 3.6 \mu\text{m}$ の試料では、 $H_b \approx 0.7 H_N$ で50%以下に減少する。また α の大きい波長ほど H_b による P_w の低減効果大きい。これは、膜厚方向の温度分布に依存すると考えられる。 $h = 3.6 \mu\text{m}$ の時は、 $H_b \approx 0.5 H_N$ で P_w の変化に変曲点が存在する。この時、式(2)、(3)により $\lambda = 514.5 \text{ nm}$ における各 P_w に対する温度分布を求め、 M_s の温度特性から膜厚方向の磁化分布を求めた結果を **Fig. 7** に示す。

$H_b = 0$ のときの P_w では、膜厚の75%の範囲がパラ磁性の状態 (**Fig. 8** (a)) であり書き込みできる。これより照射パワーが低い場合は、 **Fig. 8** (b) のようにパラ磁性領域が狭くなり、書き込むために H_b が必要となる。また $H_b/H_N \approx 0.5$ で変曲点が生ずるのは、膜厚方向の磁化分布の違いにより反転機構が異なるためと思われる。厳密には膜厚方向の M_s 、 σ_w および H_w の分布を考慮し、Huth⁹⁾ のモデルを3次元に拡張し検討しなければならず複雑である。

Fig. 6 Threshold power as a function of bias field.

Magnetization distributions as a parameter of the irradiation power.

Fig. 8 Schematic illustration of magnetization distribution model for laser irradiation; $P_1 > P_2$.

Threshold power as a function of the reflector thickness h_M .

5. ガーネット・金属2層媒体の書き込み特性

P_w 低減化のための最適膜厚は $1/\alpha \sim 2/\alpha$ であるが、 H_w を増すには膜厚が薄い方が良く⁸⁾、 α の小さい長波長域では最適膜厚の実現が難しい。そこで RIG 膜に金属反射膜を積層し、光の実効パスを2倍にすることで、 P_w を低減化する方法を考察した。

Fig. 9 は、試料1に反射膜を真空蒸着により積層した時の反射膜の膜厚 h_M による P_w の変化を示す。Al 膜では $h_M = 0.12 \mu\text{m}$ の時、 $h_M = 0$ の場合に比べ P_w は $\lambda = 514.5 \text{ nm}$ で約52%、 $\lambda = 488.0 \text{ nm}$ では約69%に低下する。反射膜の光透過は無視し、反射のみが起こるとし、 $z = h$ での書き込み閾値温度となる P_w を式(2)、(3)より求め、 **Fig. 9** に破線 l で示す。反射率 ρ_r は Al を RIG 膜に積層した状態での実測値 $\rho_{r,514.5} = 0.77$ 、 $\rho_{r,488.0} = 0.56$ を用いた。実測の P_w は $h_M \approx 0.1 \mu\text{m}$ では計算結果より低くなる。これは反射による RIG 膜の温度上昇のほかに、この程度の h_M では反射膜の光吸収による反射膜自体の温度上昇が無視できず、これが RIG 膜へ拡散するためと考えられる。また、 h_M が増すと P_w は上昇する。これは反射膜がヒートシンクとして動作し、RIG 膜が

Fig. 7

Fig. 9

Fig. 10
Thickness dependence of the threshold power with reflector and without reflector.

ら Al 膜へ熱が拡散する効果が顕著になるためと考えられる。RIG 膜と Al 膜の間に $0.11 \mu\text{m}$ の SiO 膜を付けた場合、 P_w は上昇する。これは反射膜で吸収された熱の RIG 膜への拡散が、SiO 膜により妨げられたためと考えられる。また NiFe 膜を積層した場合は、 $\rho_{r,514.5} = 0.14$ と Al($\rho_{r,514.5} = 0.77$) に比べ小さいため、NiFe 膜の温度上昇は大きく P_w が低下すると考えられる。

反射膜の効果を明らかにするため、同一の h_M の下で h を変化した。Fig. 10 に $h_M \approx 0.13 \mu\text{m}$ の Al 膜を積層した場合の $\lambda = 514.5 \text{ nm}$ での P_w の膜依存性を、 $h_M = 0$ の場合と同時に示す。斜線の領域は、 $\rho_r = 0.6 \sim 1.0$ の反射膜がある場合について、 $h_M = 0$ のときの $z = h$ での温度に等しい温度を与える P_w を、式(2)、(3)より求めたものである。 h の増加と共に P_w は低下し、反射膜のない場合と同様な傾向を示すが、 h が増すと反射面での光強度は e^{-2h} に比例して低下し、反射膜による P_w 低下の効果が小さくなる。反射膜を積層した時の P_w の実測値は、 $h = 2.2 \mu\text{m}$ では反射膜の無い場合より大きい。これは上記の効果により反射膜の温度上昇は低く、RIG 膜から反射膜への熱拡散が大きくなるためと考えられる。

6. ま と め

ガーネット膜への光熱磁気書込みにおいて、最適膜厚

が光特性長 ($1/\alpha$) の 1 ~ 2 倍であり、 P_w は $\lambda = 514.5$, 488.0, 457.9 nm で各々 20 ($h = 2.2 \mu\text{m}$), 13 ($2.2 \mu\text{m}$), 12 mW ($1.0 \mu\text{m}$) であることを示した。また $H_b = 0$ での磁化反転は、膜厚方向全体が充分温度上昇する必要があることを、熱伝導解析により説明した。

反射膜をつけた場合、反射膜内での熱拡散の影響を避けるため、反射膜の膜厚を薄くする必要がある。また、反射膜での光吸収による P_w 低下の効果が、ガーネット膜の膜厚が薄い場合、あるいは α が小さい波長において、反射膜の効果が大きいことを示した。Al 反射膜 $h_M = 0.12 \mu\text{m}$ の時、 $\lambda = 514.5 \text{ nm}$, $t = 10 \mu\text{s}$, $R \approx 2.5 \mu\text{m}$, $h = 0.55 \mu\text{m}$ で、 $h_M = 0$ の場合に比べ P_w を 52% (26 mW) に低減することができた。

磁気・光学特性の測定に当たりお世話いただいた電総研磁性材料研究室の対馬室長、片山氏、腰塚氏、林氏、レーザパワーの測定などでお世話になった NHK 総研記録班の横山主任、野村氏、熱定数などのご助言などをお世話いただいた日電基盤研記憶研究部の日比谷氏に深謝いたします。本研究の一部は、赤井録音画技術研究助成金によって行なわれた。

〔参考文献〕

- 1) K. Chida *et al.*: IEEE Trans. Magn., **MAG-13**, 983 (1977).
- 2) 井上ほか：日本応用磁気学会第 1 回学術講演会概要集, 1aB-1 (1977).
- 3) F. Inoue *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **17**, 1279 (1978).
- 4) 井上ほか：日本応用磁気学会第 3 回学術講演会概要集, 25pB-3 (1979).
- 5) F. Inoue *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **19**, 2105 (1980).
- 6) B. G. Huth: IBM J. Res. & Dev., **18**, 100 (1974).
- 7) J. C. Slonczewski *et al.*: Appl. Phys. Lett., **24**, 396 (1974).