磁気転写光磁気読出しに適したガーネット膜の磁気諸量

Magnetic Properties of Garnet Film Suitable for Magneto-optic Transfer Readout from Magnetic Tape

正会員 野村 龍男^{†1}, 正会員 岸田 雅彦^{†2}, 正会員 林 直人^{†2},
岩崎 勝博^{†3}, 梅澤 浩光^{†3}Tatsuo Nomura^{†1}, Masahiko Kishida^{†2}, Naoto Hayashi^{†2}, Katsuhiko Iwasaki^{†3} and Hiromitsu Umezawa^{†3}

Abstract We used a magnetic transfer to magnetic garnet film to develop a system that can read out signals recorded in D-VTR magnetic tape. A key point to this system is developing garnet film that enables signal transfer with a minimum bit length (= 0.385 μ m). The garnet film must also have a Faraday effect large enough to produce the C/N (carrier-to-noise ratio) necessary for the system. We discuss the desirable magnetic properties of garnet film based on the analytical transfer model we developed. Ideal garnet films have a thickness of 0.3~0.5 μ m, a Faraday coefficient of 7.5 deg/ μ m or more and optical absorption of around 0.5/ μ m. We also discuss the required C/N for a given tape speed to keep a bit error rate of 10^{-4} or less and the experimentally obtained C/N .

キーワード：磁気転写，ガーネット膜，光磁気読出し

1. ま え が き

磁性ガーネット膜（以下，ガーネット膜）は比較的小さな磁界で磁区の構造が変わる．この現象を利用して各種磁気材料から生じる磁束や漏れ磁界の分布を2次元的に観察することができ，磁気イメージングとして活発に研究されている¹⁾．また，信号の記録された磁気記録媒体をガーネット膜に近接させれば，媒体からの漏れ磁界によってガーネット膜中の磁区構造が変化する，すなわち信号が転写される．この転写を利用して磁気テープあるいは磁気ディスクに記録された信号の読出しが行われている²⁾³⁾．

われわれはVTRによって，デジタル信号の記録された磁気テープをガーネット膜に接触させ，転写される複数のトラックの信号を光学的に同時に読出すシステム⁴⁾の開発を進めている．このシステムによるこれまでの研究では，面内磁化をもつガーネット膜によってビット長が0.385 μ mの信号の転写が可能であり，これをガーネット膜のファラデー効果を用いて読出せることを確認している⁵⁾．このシ

ステムの実用化に対しては，転写された信号が適切な大きさの信号対雑音で読出せること，複数トラックの同時読出しを可能とする信号検出系を開発することなどが重要な検討課題となる．この論文では前者に関連して，これまではあまり明確でなかったガーネット膜のもつべき磁気諸量を解析的に検討した結果を述べる．

2. 転 写 機 構

信号の読出しに使用したガーネット膜は，LPE（液相エピタキシャル）法によって作製されたBi置換ガーネット膜（基本組成：(YGdBi)₃(FeGa)₅O₁₂）で，磁化容易方向はほぼ膜面内にある．ガーネット膜上に薄い反射膜を形成し，これを介して磁気テープに密着させると，磁気テープからの漏れ磁界によってガーネット膜中のスピンの面内から膜面垂直方向に θ だけ傾く．ガーネット膜の磁化容易方向は面内にあると仮定し，その飽和磁化 M_s ，膜厚 t ，飽和磁界などの磁気諸量と磁気テープの残留磁化，磁性層厚などの諸量を考慮して転写の解析モデルを作成した⁶⁾．

実際のガーネット膜ではその作製条件にもよるが，磁化容易方向は膜面から角度 α_g だけ傾いているもの，また，保磁力 H_c も数Oe以上あるものが多い．上記モデルを拡張しこれらの点も考慮できるようにした．

3. 転写特性と磁気諸量

測定可能な磁気諸量については測定値を，また測定困難な量については代表値を用い，上記解析モデルによって θ を求めた．この計算に用いた磁気諸量を表1に示す．転写

2010年2月23日受付，2010年4月27日再受付，2010年5月7日採録

†1 静岡理科大学

(〒437-8555 袋井市豊沢2200-2, TEL 0538-45-0144)

†2 NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3232)

†3 FDK株式会社

(〒431-0495 湖西市鷺津2281, TEL 053-575-2514)

†1 Shizuoka Institute of Science and Technology

(2200-2, Toyosawa, Fukuroi, Shizuoka 437-8555, Japan)

†2 Science & Technical Research Laboratories, NHK

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, Japan)

†3 FDK Corp.

(2281, Washizu, Kosaishi, Japan)

表1 転写モデルに用いた磁気諸量 (代表値)
Magnetic properties used for transfer model (typical values).

磁性ガーネット膜	磁気テープ
飽和磁化: 0.03Wb/m^2	残留磁化: 0.018Wb/m^2
飽和磁界: 28kA/m	保磁力: 142kA/m
異方性の傾き: 5°	磁性層厚: $3.1\text{ }\mu\text{m}$
膜厚: $0.5\text{ }\mu\text{m}$

図1 ガーネット膜の α_g , H_c と転写磁区
Transferred magnetic domain in garnet film.
(α_g : inclination of anisotropy, H_c : coercive force).

された信号は対物レンズで絞ったレーザ光で読出される。ゆえに、光読出し系のMTF (Modulation Transfer Function) を考慮してビット長 b と読出し信号振幅との関係を求めた。この結果は実験結果とよく一致した⁶⁾。そこで、このモデルをもとにガーネット膜の磁気諸量と各種転写特性との関係を調べた。

磁化容易方向が α_g 、膜面垂直方向の保磁力が H_c である場合の転写可能な最短ビット長 $b_{\min}$ を求めた。 $b_{\min} < 0.4\text{ }\mu\text{m}$ の転写が生じるためには、 M_s , t のほか H_c や α_g の値も重要であり、 $H_c \leq 10\text{ Oe}$, $\alpha_g \leq 8^\circ$ が望ましいことがわかった⁷⁾。偏光顕微鏡 (対物レンズの開口数: 0.7) を用いて磁気テープに記録された $b = 0.385\text{ }\mu\text{m}$ の信号を、 H_c および α_g が異なるガーネット膜に転写した時に観察された転写磁区の例を図1に示す。転写は磁気テープからの漏れ磁界によって生じるわけであるから、一般には H_c が小さいほど転写は生じ易いと考えられる。しかし、図1より短ビット長信号の転写が生じるには、 H_c よりむしろ α_g の方が影響が大きいことがわかる。このように、磁気諸量が適切であれば磁気テープの磁化パターンが明瞭に転写されることがわかる。

転写が生じてガーネット膜の磁化が θ だけ傾いた場合、光磁気読出しに利用できる実効的なファラデー回転角 ϕ は、ガーネット膜のファラデー回転係数を F 、膜厚を t とすると、読出し光が膜内を往復することを考えて次式で表せる。

$$\phi = 2F t \sin \theta \quad (1)$$

ところで θ は、磁気テープに記録された信号のビット長 b に強く依存する。 $t = 0.5\text{ }\mu\text{m}$, $M_s = 200\text{ G}$ とし、三つの F に対して ϕ の b 依存性を求めた。結果を図2に示す。 ϕ は b の減少とともにほぼ直線的に小さくなる。光磁気読出しにお

図2 実効ファラデー回転角のビット長依存性
Dependence of effective Faraday rotation on transferred bit length.

ける ϕ の大きさの目安を 0.5° とする⁸⁾と、磁気テープに記録された $b_{\min}$ ($= 0.385\text{ }\mu\text{m}$) の信号を読出すためには、 $F = 7.5\text{ deg}/\mu\text{m}$ あるいはそれ以上が望ましいことがわかる。

膜厚 t を厚くすれば、積 Ft は大きくなるが、ガーネット膜の光吸収によって光検出器に入射する光パワが減少し、かつ θ の減少も招く。光磁気読出し信号振幅は ϕ と光検出器に入射する光パワとの積 Φ に比例する。この Φ を、ここでは有効ファラデー回転角 (Valid Faraday Rotation) と呼ぶこととする。したがって、ガーネット膜の光吸収係数を α とすると、 Φ は次式で表せる。

$$\Phi = 2F t e^{-\alpha t} \sin \theta \quad (2)$$

$F = 10\text{ deg}/\mu\text{m}$, $\alpha = 0.5/\mu\text{m}$ とし、各 t に対する θ を計算し、式(2)より三つの b について Φ と t との関係を求めた。結果を図3に示す。 t が $0.2\text{ }\mu\text{m} \sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$ の範囲では、 $b = 1.16\text{ }\mu\text{m}$, $1.54\text{ }\mu\text{m}$ の場合、 Φ は膜厚とともに大きくなる。しかし、 $b_{\min} = 0.385\text{ }\mu\text{m}$ の場合、最大となる t が存在する。 $b_{\min}$ の信号レベルを大きくすることが重要であるから、図3よりガーネット膜厚は $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 前後が適当であることがわかる。

ガーネット膜の磁気的あるいは磁気光学的な諸量を調整するために組成を変えると α も変わる。転写読出し用として適切な α の大きさを知ることが重要である。そこで、 $b = 0.385\text{ }\mu\text{m}$ の場合、 $F = 10\text{ deg}/\mu\text{m}$ とし、 Φ を最大にするガーネット膜の厚さ t と α との関係を、三つの飽和磁化 M_s について求めた。結果を図4に示す。図4より、光吸収係数が小さくなるにしたがい最適膜厚は厚くなること、また、 M_s が小さいと最適膜厚は薄くなる傾向にあることなどがわかる。図4中の黒丸(●)は読出し実験に用いたガーネット膜の値を示す。この膜の M_s はほぼ 300 G であり、信号読出し

図3 有効ファラデー回転角とガーネット膜厚との関係
Relations between valid Faraday rotation and thickness of garnet film.

図4 ガーネット膜の光吸収係数と最適膜厚
Optimum thickness vs. optical absorption of garnet film.

の点からは最適に近い諸量をもつガーネット膜であることがわかる。

4. 転写読出し実験

前述のガーネット膜を用いて転写読出しを行った。実験装置の構成を図5に示す⁹⁾。開発目標のシステムではVTRのテープ走行速度を10倍 ($\approx 0.84\text{m/s}$) に上げ、転写読出しを行う。しかし、この研究では装置の都合上、磁気テープ(D3規格)の走行速度 v を $0.033\sim 0.367\text{m/s}$ の範囲で変え、固定したガーネット膜に磁気テープを接触させて読出し実験を行った。対物レンズの開口数NAは0.7、レーザー光の波長

図5 転写読出し実験装置の構成図
Schematic diagram of experimental setup for transfer readout.

図6 転写読出しスペクトル ($b = 1.35\mu\text{m}$)
Spectrum of read out signal for $b = 1.35\mu\text{m}$.

は530nm、対物レンズへの入射光パワは1mWであり、ガーネット膜上に形成した反射・保護膜の厚さは70nmである。磁気光学読出し系は差動構成とした。

$v = 0.033\text{m/s}$ とした時に得られた $b = 1.35\mu\text{m}$ (7T信号)の読出し信号のスペクトル(分解能帯域幅RBW: 1kHz)を図6に示す。7T信号では45dB程度の C/N が得られる。しかし、 $b_{\min}$ の信号では C/N は30dBまで低下する。一方、雑音スペクトルは低域ほどレベルが大きくなる傾向を示している。ガーネット膜には磁気テープの粒状性による磁化の揺らぎも転写される。VTR磁気ヘッドで再生する場合、そのトラック幅は $20\mu\text{m}$ であり、粒状性による雑音は小さいが、転写による読出しの場合、光スポット径は約 $0.8\mu\text{m}$ と小さいため、粒状性雑音が顕著に表れた結果と考えている¹⁰⁾。また、雑音スペクトルの周波数依存性は対物レンズのMTFをほぼ反映した形になっている。

図7は C/N の転写ビット長依存性を示す。 C/N はビット長が短くなるとともに低下する。これは、転写ビットが短

図7 C/N のビット長依存性
Dependence of C/N on transferred bit length.

図8 要求される C/N とテープ走行速度
Required C/N for tape speed.

くなると磁気テープから受ける磁界の大きさが減少し、ガーネット膜の磁化の傾きが小さくなること、対物レンズのMTFによって信号振幅が低下することの両者によると考えている。

次に、読出しに必要な C/N （すなわち、狭帯域での信号対雑音比，dB, rms/rms）について考える．読出し時のビットレートを R_b (Mbps)，雑音の等価帯域幅を $R_b/2$ (MHz)とし，雑音測定時のスペクトラムアナライザの分解能帯域幅を B_r (kHz)，最小転写ビット長を $b_{\min}$ (μm)，テープの走行速度を v (m/s) とすると， $R_b = v/b_{\min}$ である．必要な信号対雑音比を $(S/N)_s$ (dB, rms/rms) とする．また，信号レベルの変動や符号間干渉などによる妨害を考慮した識別余裕を M とする．ここで，雑音は帯域幅の平方根に比例することを考えると，スペクトラムアナライザの測定で得られるべき C/N は， $(S/N)_s$ に，次式すなわち帯域幅が異なることによる変換係数

$$20 \log \sqrt{(R_b/2)(10^3/B_r)}$$

と M を加えて次の関係を得る．

$$\frac{C}{N} = 10 \log R_b - 10 \log B_r + \left(\frac{S}{N} \right)_s + M + 27 \quad (3)$$

読出し時に確保すべきビット誤り率を 10^{-4} とする¹¹⁾と， $(S/N)_s \approx 8.5\text{dB}$ となる．また， $M \approx 7\text{dB}$ とする．

図7からわかるように C/N は $b_{\min}$ において最も小さくなるから，このビット長 ($=0.358\mu\text{m}$) に対して求められる C/N の大きさとテープ走行速度 v との関係を式 (3) から求めた．結果を図8に実線と破線で示す．両者の違いはスペクトルアナライザの分解能帯域幅である．●，■印は実験結果を示す．図より，使用したガーネット膜と読出し系で得られる C/N は誤り率 10^{-4} を確保できる限界に近いことがわか

る．したがって，実用化のためには C/N をさらに3～5dB向上させる必要がある．

C/N の改善には，ガーネット膜の組成をさらに最適化しファラデー回転係数を大きくする，粒状性雑音を低減するために読出し光のスポットをトラック幅方向に2～3倍に伸ばした楕円形状にする¹⁰⁾などが有効と考える．

5. む す び

磁気テープに記録された信号をガーネット膜に写して光学的に読出すシステムにおいて，これに適したガーネット膜の磁氣的，あるいは磁気光学的諸量を検討した．これらの諸量を適切に選べば磁気テープの信号を実用に近いレベルの C/N で読出せる可能性のあることがわかった．ガーネット膜や光磁気読出し光学系にもまだ改善すべき点があるが，これらは大きな問題とは考えていない．磁気テープ上に記録された数100トラックの信号をガーネット膜にうまく転写し，これを光学的に読出すシステムをいかに構成するかが今後の主要な課題である．

〔文 献〕

- 1) S. Tkachuk, et al.: "Imaging Capabilities of Bismuth Iron Garnet Films with Low Growth-Induced Uniaxial Anisotropy", IEEE Trans. Magn., 45, 10, pp.4238-4241 (2009)
- 2) T. Nomura: "A New Magneto-optic Readout Head Using Bi-substituted Magnetic Garnet Film", IEEE Trans. Magn., MAG-21, 5, pp.1545-1547 (1985)
- 3) T. Terada, et al.: "A Novel Flying Magnetic Readout Head Based on Magneto-optic Transfer", IEEE Trans. Magn., 34, 4, pp.2006-2008 (1998)
- 4) 岸田ほか: "レーザを用いた磁気テープ高速再生のための基礎検討", 2006年映像学冬季大, 3-1 (2006)
- 5) M. Kishida, et al.: "Optical Reading from Videotapes Using Magnetic Garnet Film", IEEE Trans. Magn., 44, 11, pp.3289-3292 (2008)

- 6) 野村ほか：“磁性ガーネット膜への磁化パタンの転写に関するシミュレーション”，信学技報，MR2008-63（2009）
- 7) 野村ほか：“ガーネット膜の保磁力，異方性の傾きが転写分解能に与える影響”，第33回磁気学術講演，14pE-8（2009）
- 8) 野村ほか：“動画メモリー用光磁気記録媒体の基礎特性”，信学技報，MR85-2（1985）
- 9) 岸田ほか：“磁気転写膜を用いた磁気テープの光再生実験”，信学技報，MR2008-52（2009）
- 10) T. Nomura, et al.: "Carrier-to-Noise Ratio in Magneto-Optic Transfer Readout Using Magnetic Garnet Film", J. Magn. Soc. Jpn., 33, pp.477-480（2009）
- 11) 林ほか：“高密度磁気記録技術の研究動向”，NHK R&D, pp.4-11, 113（2009）

野村 龍男 のむら たつお 1967年，広島大学大学院工学研究科修了。同年，NHK入局。1970年より，放送技術研究所にて，主に光磁気記録，磁気光学読出しの研究に従事。1992年より，静岡理科大学電気電子工学科教授，正会員。

岸田 雅彦 かしだ まさひこ 1995年，慶応義塾大学理工学研究科修士課程修了。同年，NHK入局。名古屋放送局を経て，1997年より，放送技術研究所にて，光ディスクの信号処理，磁気テープ再生の研究に従事。現在，放送技術研究所撮像・記録デバイス研究部専任研究員，正会員。

林 直人 はやし なおと 1983年，金沢大学工学部卒業。同年，NHK入局。放送技術研究所にて，主に，ハイビジョンVTR用磁気ヘッド，垂直磁気記録の研究に従事。現在，放送技術研究所撮像・記録デバイス研究部主任研究員，正会員。

岩崎 勝博 いわさき かつひろ 2001年，北海道大学大学院地球環境科学研究科博士前期課程修了。同年，FDK（株）入社，研究開発本部（現：技術開発本部）に配属。磁気光学単結晶などの光材料開発およびその光デバイス応用の開発に従事。

梅澤 浩光 うめざわ ひろみつ 1984年，千葉大学工学部合成科学科卒業。同年，富士電気化学（株）（現FDK（株））に入社，技術開発本部Sプロジェクトリーダー。磁性ガーネットを中心とした光学単結晶の開発およびMOSLM，光通信デバイスなど光デバイス開発に従事，正会員。