

# 平滑な下地膜を有する光磁気記録媒体における記録ノイズ低減とその磁気特性

Recording Noise Suppression and Magnetic Properties in Magneto-optical Recording Media with a Smoothed Underlayer Surface

牛山純子・栗野博之\*・宮本治一・安藤圭吉・助田裕史・高橋正彦

(株)日立製作所中央研究所, 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280 (☎185-8601)

\*日立マクセル(株)情報メディア開発研究所, 茨城県筑波郡谷和原村絹の台 6-20-1 (☎300-2496)

J. Ushiyama, H. Awano,\* H. Miyamoto, K. Andoh, H. Sukeda, and M. Takahashi

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601

\*Information Media Research Laboratory, Hitachi-Maxwell, Ltd., 6-20-1 Kinunodai, Yawara-mura, Tsukuba-gun, Ibaraki 300-2496

A smoothed underlayer surface produces a low level of disk noise in unrecorded disks and a high level of recording noise generated by recording marks. To achieve high S/N disks, the recording noise must be suppressed. By investigating the domain wall motion, we examined the origin of the high recording noise and studied ways of reducing it. When a flat underlayer was used, we found that the high recording noise was caused by irregular domain shapes that resulted from the decrease in the number of domain-wall-pinning sites. A possible cause of the irregular domain shapes is the smaller coercivity of Fe-rich disks and the larger contracting force acting on the domain wall in Tb-rich disks. When we deposited an improved TbFeCo film at a higher Ar pressure in order to create more wall-pinning sites, the recording noise was suppressed at about 4 dB in TM-rich disks, while the disk noise remained low.

**Key words:** magneto-optical disk, recording noise, domain-wall-pinning sites, flat underlayer, contracting force, domain-wall energy

## 1. はじめに

現在の光磁気ディスク(MO)にとっての最重要課題は大容量化(高密度化)である。今後、さらに容量が必要とされる動画やマルチメディアへのアプリケーションに対応するためにも、同じ面積にさらに多くの情報を記録しなければならない。高密度技術である磁気超解像や、記録層に記録した磁区を拡大層に転写拡大して再生する方式は、小さな磁区の信号をいかにして読み出すかという再生技術である。一方、良好な微小磁区記録はこれらの技術に共通する本質的な課題である。磁区形状の乱れは記録ノイズ(磁区を記録することにより発生するノイズ)増大につながり、結果としてS/Nを低下させる。

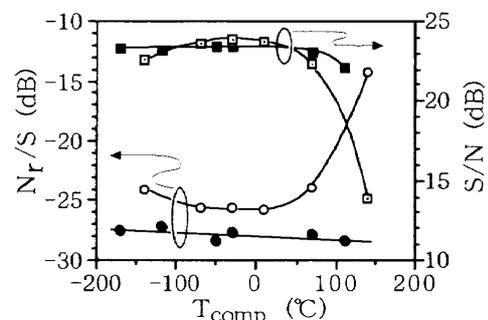
我々は、MOの媒体ノイズ(磁区を記録していなくても媒体から発生するノイズ)低減および記録ノイズ低減によるS/N向上を目的として、SiN下地膜の表面粗さとノイズ、信号、および磁気特性の関係について調べてきた。これまで、下地膜表面を平滑化したディスク(Flat-disk; F-disk)では、記録膜であるTbFeCo膜のカー回転角のばらつきが抑えられ媒体ノイズは低減する<sup>1),2)</sup>が、磁壁の pinning site 減少に起因すると推定

される磁区形状の乱れが生じ、その結果記録ノイズが増大することがわかっている<sup>3)</sup>。また、Fig. 1に示すように、TbFeCo組成を変えた場合、SiN下地膜を平滑化していないディスク(Rough-disk; R-disk)ではTb-richになる(補償温度が高くなる)に従って記録ノイズは減少するが、F-diskでは $-70^{\circ}\text{C} \leq$ 補償温度( $T_{\text{comp}}$ ) $\leq 10^{\circ}\text{C}$ に最小値を示す<sup>4)</sup>。つまり、R-diskの場合、高温領域での保磁力 $H_c$ の温度変化が急峻であるほど記録ノイズは低いという研究<sup>5)</sup>を支持する結果を得たが、F-diskの場合、記録ノイズの組成依存性は $H_c$ の温度変化のみでは説明できなかった。

$H_c$ は磁区あるいは磁壁のない状態から磁化を反転させるのに必要な磁界である。記録ノイズに影響するのは記録時の磁壁の挙動が大であることから、我々は、F-diskにおいて記録時の磁壁に作用する力について検討するとともに、記録ノイズの組成依存性についても調べた。また、記録膜を製膜プロセスの観点から検討し、媒体ノイズ、記録ノイズ共に低いMO媒体を得たので詳細を報告する。

## 2. 実験方法

記録膜はマグネトロンスパッタ装置を用いて作製した。作製したディスクは基板上にSiN下地膜85 nm/記録膜25 nm/SiN 20 nm/Al合金50 nmを積層した4層構造であり、SiN



**Fig. 1** Recording noise ( $N_r$ ) normalized by the signal and S/N for various TbFeCo compositions.  $N_r$  is integrated within a frequency range of 0 to 5 MHz. Open symbols denote  $N_r/S$  and S/N in F-disks and closed symbols denote those in R-disks.

下地膜表面はスパッタエッチング処理を行い平滑化した。原子間力顕微鏡により SiN 下地膜の表面形状を観察したところ、中心線平均粗さ  $R_a^{6)}$  は 0.28 nm (エッチング処理をしていないディスクの  $R_a$  は 0.47 nm) であった。

TbFeCo 膜は  $T_{\text{comp}} = -170^\circ\text{C}$  の Fe-rich 膜から  $T_{\text{comp}} = 140^\circ\text{C}$  の Tb-rich 膜まで Tb 量および Fe 量を変化させて作製した。本論文では、TbFeCo 組成の変化を補償温度を用いて表した。 $T_{\text{comp}}$  が低いほど Fe 量の多い (Fe-rich) 膜であることを示し、 $T_{\text{comp}}$  が高いほど Tb 量の多い (Tb-rich) 膜であることを示す。さらに、Fe-rich 組成の記録膜を、Ar スパッタガス圧、投入パワーを変えて形成した。記録膜のスパッタ条件の詳細については本文中に記載した。磁気特性は、振動試料型磁力計、カー効果測定装置、およびトルクメータを用いて測定した。

磁壁を拡大あるいは収縮させるのに必要な臨界磁界 ( $H_{\text{exp}}$  と  $H_{\text{cnt}}$ ) は以下のようにして求めた。まず、ディスクに 3 種類の大きさの磁区 (磁区長は約  $0.62\ \mu\text{m}$ ,  $0.82\ \mu\text{m}$ ,  $1.1\ \mu\text{m}$ ) を三つのエリアに分けてそれぞれ記録した。記録条件は後述のとおりである。記録後、同じ磁区サイズが記録されているエリア毎にディスクを切り出して、カー効果測定装置にセットし磁界を印加した。Fig. 2 にカーヒステリシス曲線の一例を示す。図中に示したような方法で  $H_{\text{exp}}$ ,  $H_{\text{cnt}}$  を求めた。

作製したディスクの記録再生特性の測定には、波長 830 nm の半導体レーザーを搭載した光磁気ディスクドライブを用いた。レンズの NA は 0.55 である。記録は線速度 4.2 m/s, 記録周波数 2.5 MHz, 記録パワー 4.5~6 mW の条件にて光変調記録を行い、再生パワーは 1 mW とした。また、S/N の評価の際、ノイズは媒体ノイズが装置ノイズより大きい 0 MHz から 5 MHz の周波数帯域を積算した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 F-disk における磁壁エネルギーと TbFeCo 組成

この節では、記録時の磁壁に作用する力を、Huth の式<sup>7)</sup>を用いて計算し、F-disk の記録ノイズが Fig. 1 のような組成依存性をもつメカニズムについて調べた。

磁区が形成される際、磁壁の位置は反磁界  $H_d$  や外部磁界  $H_{\text{ext}}$  などから受ける力のバランスによって決まり、次式で表される。

$$-H_{J1} - H_{J2} + H_d + H_{\text{ext}} \leq H_c \quad (1)$$

$$H_{J1} = \sigma_w / 2rM_s \quad (2)$$

$$H_{J2} = (1/2 M_s) \cdot (\partial\sigma_w / \partial T) r \cdot (\partial T / \partial r) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_w$  は磁壁エネルギー、 $r$  は磁区の半径、 $M_s$  は飽和磁化である。また、 $H_{J1}$ ,  $H_{J2}$  は磁壁エネルギーに関する項であり、 $H_{J1}$  は磁壁が曲率をもつことにより縮まろうとする磁界、 $H_{J2}$  は磁性膜が温度分布をもつことにより、半径方向に磁壁エネルギーの勾配が生じるために発生する磁界である。(1) 式中、“-” は磁区を shrink させる方向、“+” は磁区を expand させる方向に働くことを意味している。本論文では  $\sigma_w$  と磁壁抗磁力  $H_w$  を次式により算出した<sup>8), 9)</sup>。

$$\sigma_w = M_s \cdot 2r \{ (H_{\text{exp}} - H_{\text{cnt}}) / 2 - M_s / (1 + 3r/2t) \} \quad (4)$$

$$H_w = (H_{\text{exp}} + H_{\text{cnt}}) / 2 \quad (5)$$

ここで、 $t$  は TbFeCo 膜の厚さ、 $H_{\text{exp}}$ ,  $H_{\text{cnt}}$  は記録磁区の磁壁

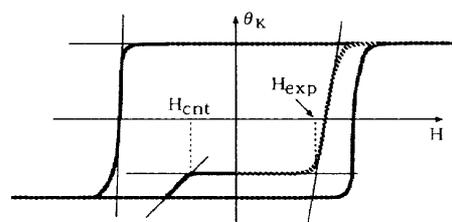


Fig. 2 An example of Kerr hysteresis loops.

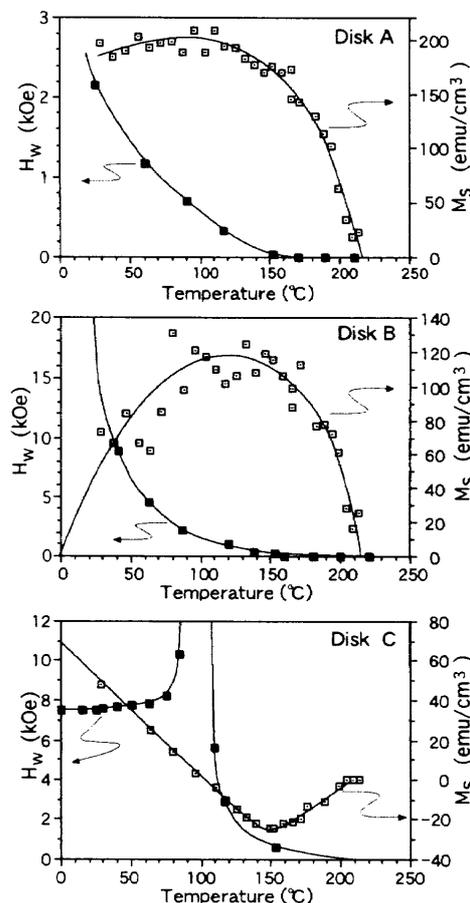


Fig. 3 Temperature dependence of  $H_w$  and  $M_s$  in F-disks.

を拡大あるいは収縮させるのに必要な臨界磁界であり、3 種類の大きさの磁区 (磁区長は約  $0.62$ ,  $0.82$ ,  $1.1\ \mu\text{m}$ ) について  $\sigma_w$  を調べた。用いた F-disk は Fe-rich 膜 ( $T_{\text{comp}} = -170^\circ\text{C}$ ; Disk A),  $T_{\text{comp}} = 0^\circ\text{C}$  の膜 (Disk B), Tb-rich 膜 ( $T_{\text{comp}} = 100^\circ\text{C}$ ; Disk C) の 3 種類である。

まず、Disk A, B, C の TbFeCo 膜の飽和磁化  $M_s$  の温度依存性と、 $0.62\ \mu\text{m}$  の磁区長で測定した  $H_{\text{exp}}$  と  $H_{\text{cnt}}$ <sup>4)</sup> を用いて求めた  $H_w$  の温度変化を Fig. 3 に示す。さらに、磁区長が  $0.62$  と  $0.82$ ,  $1.1\ \mu\text{m}$  における  $\sigma_w$  の温度変化の計算結果を Fig. 4 に示す。 $\sigma_w$  は Klahn らの計算結果<sup>8)</sup> および Satoh らの計算結果<sup>9)</sup> と同様、温度が上がるに従って単調に減少する。上述したように、F-disk の  $\sigma_w$  を、3 種類の大きさの磁区の  $H_{\text{exp}}$  と  $H_{\text{cnt}}$  を用いて求めたが、同じ組成のディスクでは、磁区の数に関係なくほぼ一定であった。Disk A の  $\sigma_w$  は Satoh らの算出した Fe-rich 膜と、値、温度依存性共に類似している。

Fig. 5 には、R-disk の磁区長  $0.62\ \mu\text{m}$  における  $H_{\text{cnt}}$ ,  $H_{\text{exp}}$  を

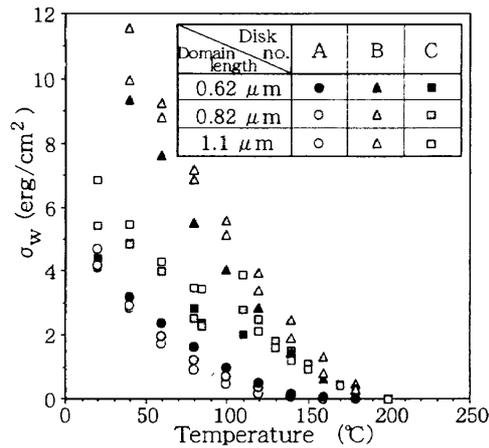


Fig. 4 Temperature dependence of  $\sigma_w$  in F-disks.

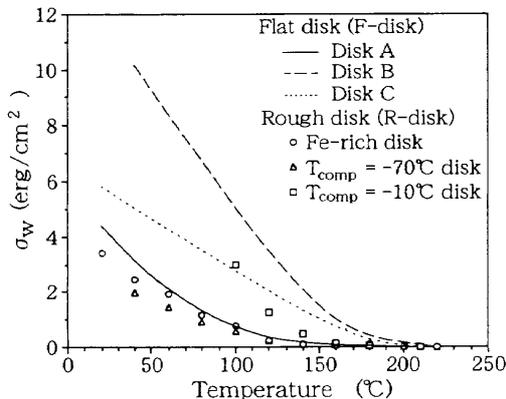


Fig. 5 Temperature dependence of  $\sigma_w$  in F- and R-disks.

用いて算出した  $\sigma_w$  と F-disk の  $\sigma_w$  の平均を示した。R-disk の  $\sigma_w$  は  $160^\circ\text{C}$  以上で大きな違いはなかった。一方、F-disk の  $\sigma_w$  は Disk A, Disk C, Disk B の順に大きくなる。Disk B の  $\sigma_w$  は室温付近で約  $10 \text{ erg/cm}^2$  と大きく、 $160^\circ\text{C}$  の温度では R-disk および Disk A より約 10 倍大きい。これは下地膜表面をスパッタエッチング処理したためであると考えられる。 $\sigma_w$  を組成の近い Disk B と  $T_{\text{comp}} = -10^\circ\text{C}$  の R-disk (図中□で表示) で比較すると、前者の方が大きい。また、Fe-rich 膜では、Disk A ( $T_{\text{comp}} = -170^\circ\text{C}$ ) の  $\sigma_w$  は、わずかではあるが R-disk の Fe-rich 膜 ( $T_{\text{comp}} \approx -250^\circ\text{C}$ , 図中○で表示) と  $T_{\text{comp}} = -70^\circ\text{C}$  の disk (図中△で表示) より大きい。スパッタエッチング処理による  $\sigma_w$  の増大は高桑らの実験結果と一致する<sup>10)</sup>。

### 3.2 F-disk における磁壁に作用する力と記録ノイズ

前節で求めた  $\sigma_w$ ,  $M_s$  などの磁気特性の測定結果および記録時の温度分布の熱シミュレーション結果を用いて、F-disk について熱磁気記録時の磁壁に働く力を計算した (光照射開始から終了までの過程は省略)。ディスク構造は実験で用いたディスクと同一とした。計算に用いた各層の熱定数を Table 1 に示す。熱シミュレーションの計算条件は、レーザ波長  $685 \text{ nm}$ ,  $NA 0.55$ , 線速  $5.0 \text{ m/s}$ , 記録パワー  $4.3 \text{ mW}$  で、 $40 \text{ ns}$  のパルス光照射直後における TbFeCo 膜内の半径方向の温度分布を計算した。Fig. 6 が熱シミュレーションの計算結果である。横軸はピーク温度が最大となる位置からの距離を表す。

Table 1 Thermal parameters used for the calculation

	Specific heat (J/kg · K)	Heat conductivity (W/m · K)
SiN	740	10
TbFeCo	320	15
Al alloy	890	40

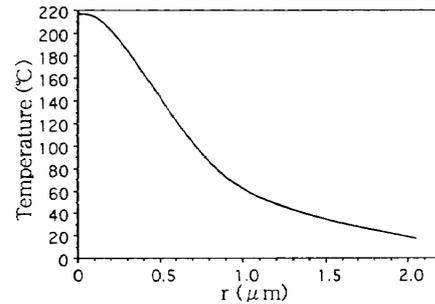


Fig. 6 Calculated temperature distribution of the magnetic layers at the end of the light irradiation.

Fig. 7 に  $H_{J1}$  および  $H_{J2}$  の、Fig. 8 に反磁界  $H_d$  の計算結果をそれぞれ示す。磁壁エネルギーと飽和磁化に関する項である  $H_{J1}$  と  $H_{J2}$  は、どちらも Disk A, B, C の順に大きくなり、shrink 力は  $T_{\text{comp}}$  が高くなる (Tb-rich 膜になる) に従って増大すると予想される。この計算結果は、 $H_{\text{exp}}$  および  $H_{\text{cnt}}$  の測定で得られた「Tb-rich 膜は shrink 力が大きい」という実験結果<sup>4)</sup>と定性的に一致する。ただし、計算で求めた Disk C の  $H_{J2}$  は極度に大きい。Disk B における  $H_{J1}, H_{J2}$  は Disk A のそれより 1 桁、Disk C では 2 桁大きく、Disk C における磁壁に働く  $H_{J2}$  は数十 kOe という結果になった。 $H_{J1}, H_{J2}$  が大きな値をとるのは、実験から求めた  $\sigma_w$  が大きいことが原因であると考えられる (高橋らが行った磁区形成シミュレーションでは、 $\sigma_w$  を室温で  $1 \text{ erg/cm}^2$  とし、キュリー温度まで単調に減少するとして計算している<sup>5)</sup>)。また、Fig. 8 に示したように、磁壁に expand 力として働く  $H_d$  は、飽和磁化の大きさを反映して Disk C, B, A の順に大きくなった。反磁界による expand 力は  $T_{\text{comp}}$  が高くなるに従って小さくなる。

以上より、Fig. 1 に示した F-disk における記録ノイズの組成依存性について以下のように考えた。磁壁位置は expand 力、shrink 力および  $H_c$  のバランスにより決定される。F-disk の  $-70^\circ\text{C} \leq T_{\text{comp}} \leq 10^\circ\text{C}$  において記録ノイズが最も低くなるのは、この組成領域において、磁壁に作用する expand 力と shrink 力のバランスがある程度保たれ、さらに  $H_c$  の温度変化が磁壁固定温度近傍で急峻であるためであると考えられる。また、Fe-rich 膜では expand 力と shrink 力のバランスは良いが、 $H_c$  の温度勾配が緩やかすぎる (一般的に  $H_w$  あるいは  $H_c$  の磁区半径内での温度勾配が緩やかになると、磁壁が移動しやすく、記録磁区の大きさが不均一になりやすいといわれている)。一方、Tb-rich 膜では  $H_c$  の温度勾配は問題ないが、磁壁に働く shrink 力が大きすぎることで記録ノイズの増大に関与

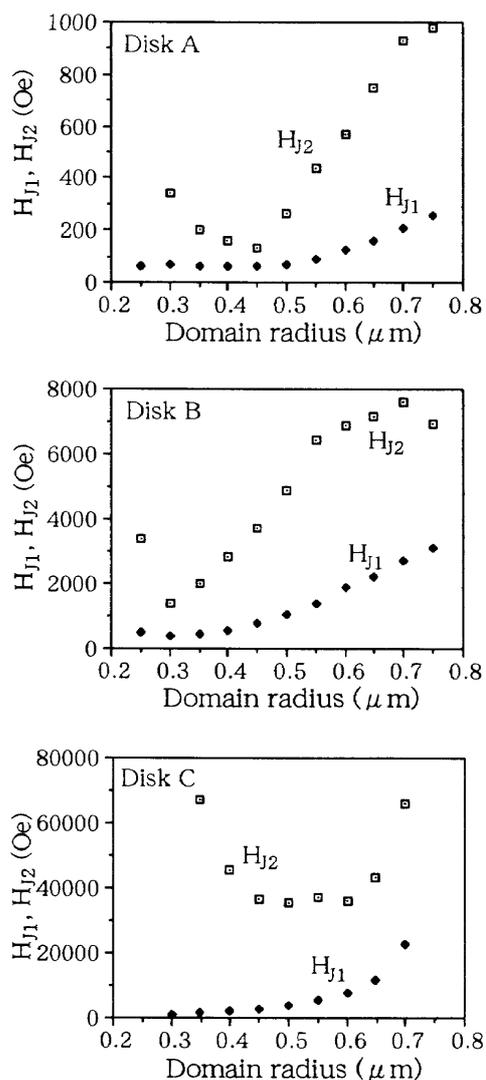


Fig. 7 Contracting field acting on the domain wall in the F-disks at the end of the light irradiation.

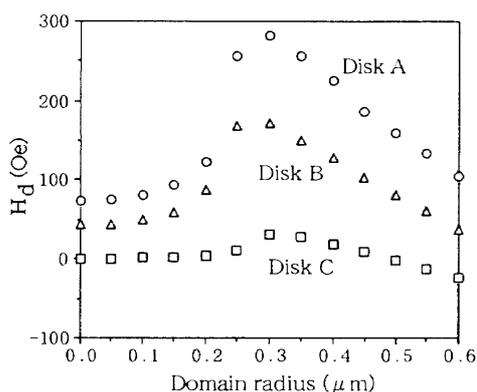


Fig. 8 Demagnetization field in the F-disks at the end of the light irradiation.

していると考えられる。

### 3.3 TbFeCo 膜の製膜条件と記録ノイズ

我々は、下地膜平滑化による記録ノイズの上昇は、pinning site の減少が影響していると考えている<sup>3)</sup>。そこで、平滑化した下地膜を用いながら pinning site を増やし、記録ノイズを減少させるため、TbFeCo 膜の内部に pinning site を意図的につく

Table 2 Recording noise ( $N_r$ ) normalized by the signal for various sputtering conditions in F-disks

Ar gas pressure	Applied power		
	250 W	500 W	1000 W
0.85 mTorr		-23.0 dB	-18.6 dB
3 mTorr	-24.1 dB	-24.1 dB (conventional F-disk)	-18.6 dB
5.4 mTorr		-26.6 dB (disk D)	-24.2 dB

ることを試みた。具体的には、TbFeCo 膜の製膜条件 (Ar スパッタガス圧: 0.85~5.4 mTorr, 投入パワー: 250~1000 W) を変えてディスクを作製し、その磁気特性および記録再生特性について調べた。本実験で作製したディスクは Fe-rich 膜で 6 種類である。前節まで用いていたスパッタ条件はスパッタガス圧: 3 mTorr, 投入パワー: 500 W であり、この条件で作製した F-disk の補償温度は約  $-140^{\circ}\text{C}$ 、その他のディスクのそれは約  $-170^{\circ}\text{C}$  である。

製膜条件を変えて作製したこれらのディスクの記録ノイズ ( $N_r/S$ ) を Table 2 に示す。Table 2 からわかるように、平滑化された下地膜を用いてもスパッタガス圧を上げることにより記録ノイズが低減した。Mansuripur らは、直径数十 nm の周囲と異なる磁気特性をもった領域 "defect" が磁化反転の際の核となり、また、磁壁移動の際の pinning site となることを、シミュレーションにより示唆している<sup>11)</sup>。今回、高ガス圧で製膜することにより Ar ガスが TbFeCo 中に取り込まれ、記録膜中に垂直磁気異方性エネルギーの低い領域が散在し、これが磁壁の pinning site となっていると推測される。本実験では、Disk D (スパッタガス圧 5.4 mTorr, 投入パワー 500 W) が最も記録ノイズが低くなった。Disk D の  $T_{\text{comp}}$  は約  $-170^{\circ}\text{C}$  である。同じ  $T_{\text{comp}}$  で記録ノイズを比較すると従来のスパッタ条件 (スパッタガス圧: 3 mTorr, 投入パワー: 500 W) で  $T_{\text{comp}} = -170^{\circ}\text{C}$  の膜を製膜した場合、Fig. 1 から記録ノイズ ( $N_r/S$ ) は  $-22 \sim -23$  dB になると予想される。このことから推測すると、同じ  $T_{\text{comp}}$  ( $-170^{\circ}\text{C}$ ) の TbFeCo 膜では、スパッタガス圧を上げることで、約 4 dB の記録ノイズが低減したことになる。記録ノイズの低減が S/N に反映し、Disk D では、Fig. 1 で最も S/N の高かった F-disk ( $T_{\text{comp}} = -30^{\circ}\text{C}$ ) より約 1 dB 高い S/N が得られた。

R-disk, 従来の F-disk および Disk D の外部磁界依存性を Fig. 9 に示す。Disk D では、外部磁界  $-200$  Oe で Carrier level は 0 となり、磁界感度の良好な従来 F-disk と比較しても約 50 Oe の磁界感度の低下にとどまった。従来のスパッタ条件 (スパッタガス圧 3 mTorr, 投入パワー 500 W) で TbFeCo 膜を作製した場合、下地膜の表面を平滑化することで、装置ノイズと同程度まで媒体ノイズが低減し<sup>2)</sup>、また磁界感度が向上したが、記録ノイズは増大した。しかしながら、TbFeCo 膜のスパッタ条件を変えることにより、磁界感度が良好で媒体ノイズが低いという下地膜平滑化の利点はそのままで、記録ノイズが

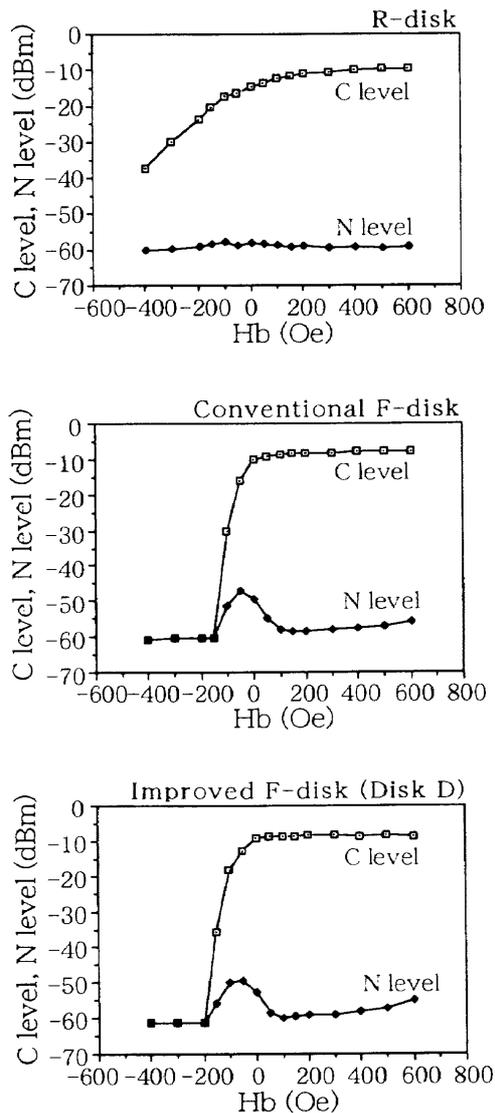


Fig. 9 External field dependence of carrier level and noise level for R-, F-, and improved F-disks.

約4 dB低いディスク (Disk D) を得ることができた。

Fig. 10 には、R-disk ( $T_{\text{comp}} = -30^{\circ}\text{C}$ ) と F-disk ( $T_{\text{comp}} = 0^{\circ}\text{C}$ )、および Disk D における TbFeCo 膜のトルクカーブを示した。外部磁界は 16 kOe である。R-disk 以外は下地膜の表面をスパッタエッチングしてあり、これにより 160°C 付近の温度でのトルクカーブに違いが現れると考えられる。R-disk では、反転開始から終了までの角度 ( $\alpha$ ) が大きい。これは、膜中に、ミクロな磁気特性 (垂直磁気異方性エネルギーなど) のばらつきが数多く存在するため、磁化反転に必要なトルクの大きさが異なるためと推測される。この磁気特性のばらつきが磁壁の pinning site となっていると考えられる。一方、F-disk では、磁化反転が一斉に起こっていることから、磁気特性が均一で、pinning site が少ないと考えられる。さらに Fe-rich 膜から Tb-rich 膜まで組成の異なる R-disk と F-disk についてトルクを測定したが、保磁力の大小に関係なく、R-disk では  $\alpha$  が大きく、F-disk では  $\alpha$  が小さいという結果が得られている。

Disk D のトルクカーブは、pinning site が多いと推測されるにもかかわらず、従来の F-disk のそれに類似して、磁気特性

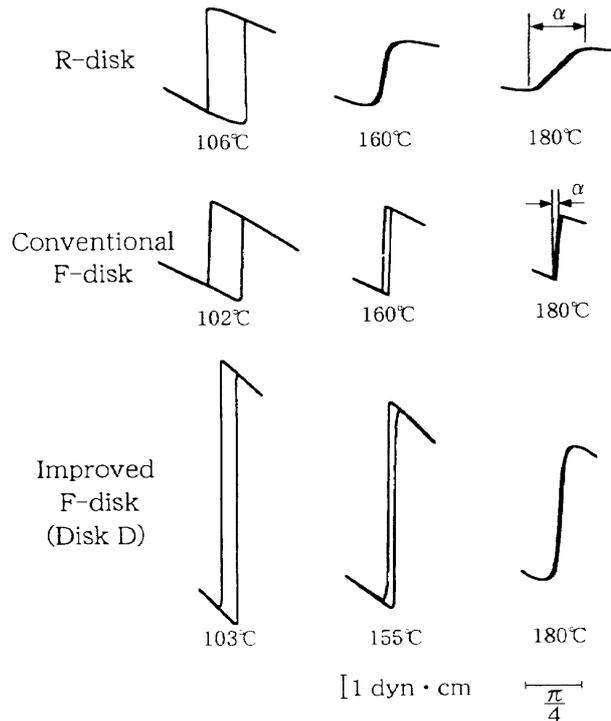


Fig. 10 Torque curves for various temperatures in R-, F-, and improved F-disks.

が均一であることがわかった。そこで、今までの実験結果を合わせて考え、R-disk と従来の F-disk、記録ノイズを抑えた F-disk である Disk D の 3 種類の TbFeCo 膜の磁気特性の違いについて推察し、それを模式図で表現した (Fig. 11)。三角の部分は磁壁の pinning site を示す。R-disk では、下地膜の凹凸に起因した磁気特性の不規則なばらつきによる pinning site が多数存在する。F-disk ではスパッタエッチング処理により下地膜が平滑化され、その上の磁性膜の磁気特性も均一化されて媒体ノイズは下がったが、その反面、磁気特性のばらつきに起因する pinning site が減少したことで、記録ノイズが増大したと考えられる。Disk D では、スパッタガス圧を上げることで磁性膜中にガスが多く入り込み、これが磁気的な pinning site を生成し記録ノイズが下がったと考えられる。この高ガス圧化によって生成した pinning site は下地膜の凹凸に起因するそれと比較した場合、より均一に分布しているために、トルク、磁界感度などに対する磁化の挙動は従来の F-disk のそれに近いと思われる。

#### 4. ま と め

媒体ノイズ低減のために平滑な下地膜を用いた TbFeCo ディスクにおいて、記録ノイズを低減し高 S/N を得ることを目的として、以下のことについて調べた。

- 平滑な下地膜を用いたときの TbFeCo 膜の磁壁エネルギーの算出と記録ノイズが TbFeCo 組成依存性を有する原因
  - スパッタ条件改良による記録ノイズ低減の可能性
- その結果得られた知見を以下に示す。

1. 下地膜表面の粗い TbFeCo ディスクの場合、Tb-rich になるに従い記録ノイズは低くなるが、平滑化されたディスクで

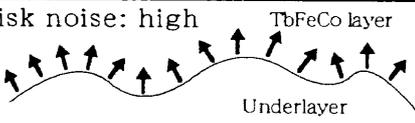
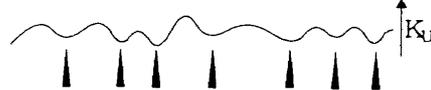
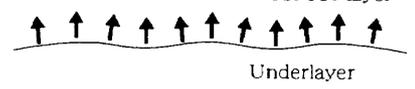
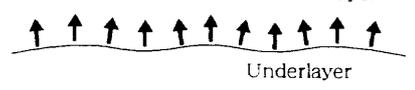
	Relationship between the surface roughness and the magnetization direction	Relationship between the magnetic property (ex. $K_u$ ) and the domain-wall-pinning sites in the TbFeCo layer
R-disk	Disk noise: high 	Recording noise: low 
Conventional F-disk	Disk noise: low 	Recording noise: high 
Improved F-disk (Disk D)	Disk noise: low 	Recording noise: low 

Fig. 11 Relationship between underlayer surface roughness and disk noise, and the relationship between the magnetic property and recording noise. Arrows ( $\uparrow$ ) denote the magnetization direction and triangles ( $\blacktriangle$ ) denote domain-wall-pinning sites.

は補償温度が  $-70^{\circ}\text{C}$  から  $10^{\circ}\text{C}$  の間で最も低くなる。この組成領域で記録ノイズが極小となるのは、磁壁に働く shrink 力と expand 力のバランスがある程度保たれ、さらに保磁力の温度勾配が急峻であるためと推測される。Fe-rich 膜では shrink 力と expand 力のバランスは良いが保磁力の温度変化が緩やか、Tb-rich 膜では shrink 力が大きすぎる。

2. 平滑な下地膜を有するディスクの場合、 $H_{\text{exp}}$  および  $H_{\text{crit}}$  から求めた磁壁エネルギー  $\sigma_w$  は TbFeCo 組成によって大きく異なり、 $\sigma_w$  は  $T_{\text{comp}}=0^{\circ}\text{C}$  膜 ( $40^{\circ}\text{C}$  で  $\sigma_w=10 \text{ erg/cm}^2$ ) > Tb-rich 膜 > Fe-rich 膜 ( $20^{\circ}\text{C}$  で  $\sigma_w=4 \text{ erg/cm}^2$ ) となった。この  $\sigma_w$  を用い、磁壁に shrink 力として働く磁界を計算した結果、この磁界は Tb-rich になるに従って大きくなるという結果が得られ、実験結果と一致した。

3. 高スパッタガス圧 ( $5.4 \text{ mTorr}$ , 通常  $3 \text{ mTorr}$ ) で TbFeCo 膜を製膜することにより記録ノイズは低減し、同じ組成の通常膜と比べ  $4 \text{ dB}$  の記録ノイズの低減となった。その結果 S/N は  $24.6 \text{ dB}$  となり、下地膜平滑化なしのディスクの最高 S/N と比較すると約  $2 \text{ dB}$ 、従来スパッタガス圧 (平滑化あり) で製膜した場合の最高 S/N ( $T_{\text{comp}}=-30^{\circ}\text{C}$  のディスクで、 $23.7 \text{ dB}$ ) より約  $1 \text{ dB}$  向上した。

4. 改良ディスクはその記録ノイズの低さから、記録時に磁区形状を良好に保つのに必要なだけの pinning site が存在していると推定され、下地膜の凹凸に起因する pinning site と比較すると磁氣的に均一であると考えられる。

謝辞 熱シミュレーションを行って頂いた、(株)日立製作所中央研究所の嵯峨秀樹氏、ならびに、ご助言いただきました日立マクセル(株)の萬雄彦博士に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 刈屋田英嗣, 島田 稔, 安達忠史, 深見栄三, 土岐 薫, 森本昭男: 日本応用磁気学会誌, **18**, 177 (1994).
- 2) J. Ushiyama *et al.*: Technical Dig. Int. Symp. on Optical Memory, Kanazawa, 1995, p. 133 (The Japan Society of Applied Physics and The Magnetics Society of Japan, 1995).
- 3) T. Kohashi *et al.*: Proc. Magneto-Optical Recording Int. Symp., Noordwijkerhout, 1996, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20** (Suppl. No. S1), 303 (1996).
- 4) J. Ushiyama *et al.*: Proc. Magneto-Optical Recording Int. Symp., Yamagata, 1997, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**(Suppl. No. S2), 125 (1998).
- 5) M. Takahashi *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **64**, 262 (1988).
- 6) 例えば, 日本工業規格, JIS B0601.
- 7) B. G. Huth: *IBM J. Res. Dev.*, **18**, 100 (1974).
- 8) T. Satoh *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 5115 (1991).
- 9) S. Klahn and D. Raasch: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 1918 (1990).
- 10) 高桑敦司, 川瀬健夫, 根橋 聡, 下田達也: 第 16 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 名古屋, 1992, p. 557 (1992) (日本応用磁気学会, 東京, 1992).
- 11) Giles and M. Mansuripur: *Comput. Phys.*, MAR/APR, 204 (1991).

1998 年 4 月 4 日受理, 1998 年 7 月 10 日採録