

磁気超解像による高密度光磁気ディスクの研究

高 橋 小 弥 太
 森 谷 勲
 稲 生 俊 雄
 近 藤 昭 夫

Study of High Density Magneto-optical Disks using
 Magnetically Induced Superresolution

Koyata TAKAHASHI
 Isao MORITANI
 Toshio INASE
 Akio KONDO

The relationship between the magnetic properties of exchange-coupled multilayer (ECLM) films and readout characteristics of magnetically induced superresolution (MSR) disks has been studied. The dependences of the readout characteristics on the copying characteristics of domains are reported for MSR by the front aperture detection (FAD) and rear aperture detection (RAD). The controllability of the copying characteristics is discussed by estimating suitable wall energy balance of each layer in an ECML film. Optimization of the in-plane readout layer for MSR is also reported. Finally, the readout performances of MSR disks are compared by three different types of detection.

1. はじめに

CD-ROM を標準搭載したマルチメディアパソコンの普及などにより、光磁気 (MO) ディスクを代表とする書換型の可搬メディアにも 600 MByte 以上の記憶容量が要求されるようになってきている。3.5 インチ MO ディスクでは既に 5 倍容量 (5X:640 MByte) の標準化が精力的に進められ、1~2 年以内に商品化される見込みである。CD-ROM はさらに数年後には 2 倍以上に大容量化される可能性があり、ビデオ CD では 3 GByte 程度のもので商品化をめざして開発されている¹⁾。従って、MO ディスクもさらなる大容量化が期待されている。

Table 1 に 1X から 5X までの MO ディスクの規格の変化を示す。記録密度向上の要素技術を以下に示す。

- 1) 狭トラックピッチ化、線記録密度の向上：レーザーの短波長化や対物レンズの開口数 (NA) の増加
- 2) フォーマット：CAV から MCAV や ZCAV
- 3) 記録方式：マークポジション (PPM) 方式からマークエッジ (PWM) 方式への変更²⁾

10X 以降はおもに狭トラックピッチと線記録密度向上が必要である。以下に代表的な要素技術を示す。

- 1) レーザーの短波長化³⁾、対物レンズの NA の増加⁴⁾
- 2) 磁気超解像 (MSR)⁵⁾

Table 1 Standards of 90 mm magneto-optical disks from 1X to 5X. Here, planning values are shown for a 5X disk.

Version	Capacity (MB)	Track Pitch (μm)	Linear Density ($\mu\text{m}/\text{bit}$)	Linear Density ($\mu\text{m}/\text{mark}$)	Wavelength (nm)	NA	Format	Recording Method
1X	128	1.6	1.0	0.76	780	0.53	CAV	PPM
2X	230	1.39	0.87	0.65	780	0.55	MCAV	PPM
5X	640	1.10	0.49	0.65	680	0.55	ZCAV	PWM

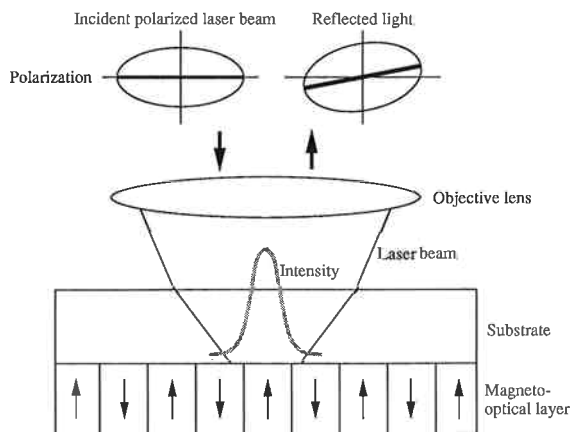


Fig. 1 The readout principle of a conventional magneto-optical disk.

3) PRML 方式⁶⁾による検出

4) ランドとグルーブに記録する方式⁷⁾

5) 2次元記録⁸⁾

10X の要素技術の最も有力な候補としては MSR があげられ、その他のいずれかの方式も組み合わせられる可能性がある。

従来 (5X まで) の MO ディスクの信号再生方法について Fig. 1 で説明する。偏光したレーザービームを対物レンズで絞り、透明基板 (PC、ガラスなど) を通して記録膜に照射し、反射光のカー効果による偏光角の変化 (カー回転角) を検出する。記録膜のスピンの方向により約 ± 1 度のカー回転角の変化が得られる。レーザー波長を λ 、対物レンズの開口数を NA とすると、記録膜上でのビーム径は、 $0.8 \times (\lambda/NA)$ で与えられて、この直径で $1/e^2$ になるように光強度がガウス分布している。このような MO ディスクに信号 (マーク) を記録して再生しようとする場合、Fig. 2 のようにマークピッチ (記録波長) をだんだん狭くして記録密度を高くすると、一つのビーム内に多数のマークが一度に検出されるために再生信号が弱くなる。理論的には回折限界 $\lambda/(2NA)$ 以下のピッチでは再生信号がゼロになる。さらにデジタル信号の検出には通常 45 dB 以上の C/N が必要とされるので、最短記録波長は λ/NA 程度に設定している。 $\lambda=780$ nm、 $NA=0.53$ の場合、ビーム径

は約 $1.2 \mu\text{m}$ 、回折限界のマークピッチは $0.74 \mu\text{m}$ 、回折限界のマーク長は $0.37 \mu\text{m}$ (1 : 1 のマーク) である。

磁気超解像 (MSR) ディスクの記録膜は、基本的には記録層と再生層から構成され、記録層の記録マークを再生層から読み出すときに、ビームスポット内の再生層の一部をマスクとし、残りの部分を開口部 (アパーチャ) とすることにより、レーザービームを絞り込んだのと等価的な作用をするものである。MSR ディスクの3種類の基本原理を Fig. 3 に示すが、記録層と再生層以外の層は再生層が温度の上昇にしたがって変化するように補助的な作用をする層である。

FAD 超解像ディスクの記録膜⁵⁾ は、Fig. 3a) に示すように記録層、スイッチ層、再生層から構成される。スイッチ層のキュリー温度が最も低いので再生パワーを適当に調整することにより、ビームスポット内でスイッチ層のキュリー温度を越えた部分の再生層の磁化が記録層との交換結合を断ち切られるために再生磁界の方向を向き、この部分が時間的に変化しないのでマスクとしての作用をする。ディスクが加熱されてから昇温するまでにある程度時間がかかるためにマスクがディスクの移動方向の後方に生じ、アパーチャが前方に来るために Front Aperture Detection (FAD) と呼ばれる。

RAD 超解像ディスクの記録膜⁵⁾ は、Fig. 3b) に示すように記録層、中間層、再生層から構成される。この方式ではディスクをあらかじめ初期化磁界 (4 kOe 程度) に通過させ再生層の磁化を一定方向に向ける (初期化)。中間層は室温での交換結合を適当に弱める働きをし、初期化状態がゼロ磁界でも安定になるようにする。ビームスポット内でも最初は再生層の初期化状態が保たれ (マスク部分)、ビーム加熱によりある温度で記録層から再生層に記録マークが転写され再生可能となる (アパーチャ部分)。この方式ではアパーチャが後方に来るために Rear Aperture Detection (RAD) と呼ばれる。再生層は初期化、転写という反対の性質が温度により十分変化するように通常、再生層/再生補助層の2層で構成される。

面内膜超解像ディスクの記録膜⁹⁾ は、Fig. 3c) に示すように記録層、再生層の2層で構成される。再生層は室

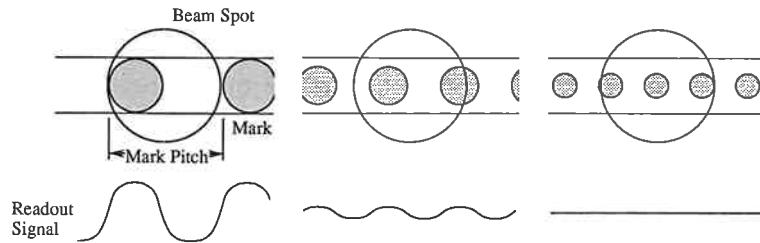


Fig. 2 Mark pitch versus signal amplitude.

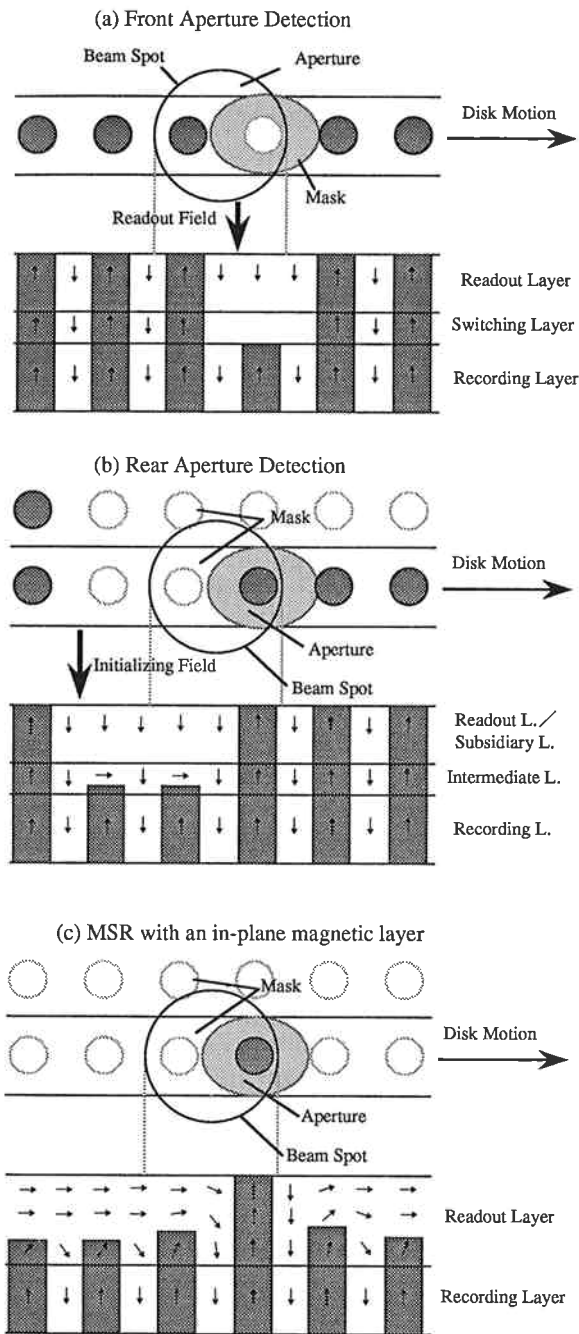


Fig. 3 Readout principles of various MSR disks: (a) Front Aperture Detection (FAD), (b) Rear Aperture Detection (RAD), (c) MSR with an in-plane magnetic layer.

温で面内膜、温度が上がると垂直膜になるような RE リッチの GdFeCo 膜が使われる。ビームスポット内でも最初は再生層の磁化が面内状態に保たれ (マスク部分)、ビーム加熱によりある温度で急激に再生層の磁化が面内から記録層とスピンの同じ方向に向いた垂直に変わり、再生可能となる (アパーチャ部分)。この方式はアパーチャが後方に来るために RAD の一種であるが、Fig. 3b) の RAD では加熱により一度転写された部分は初期化磁界を通過するまで転写されたままであるが、面内膜超解像ディスクでは温度が下がると同時に再生層の磁化が面内状態にもどる。

面内膜超解像と RAD 超解像はいずれもアパーチャの幅がトラック方向に狭くなっているので、狭トラックピッチでもクロストークの小さい再生が可能となる。

MSR の原理は以上説明したように巧妙で明快なものである。磁性多層膜の挙動が小林モデル¹⁰⁾ や 1 次元的な変分法¹¹⁾ で一意的に決まるならば MSR 多層膜の設計は比較的容易であろう。実際的にもある程度まで上記手法で設計可能であるが、我々は上記手法のみでは FAD、RAD 超解像ディスクについて多層膜の磁気特性と再生特性の関係が明確に説明できないという問題点につきあつた。このような問題はオーバーライト光磁気多層膜¹²⁾ でも指摘されており^{13,14)}、原因や挙動が論理的に説明されていないことは、多くの人々から多層膜の製造の再現性が不安視される原因ともなってきた。

我々はこの問題を解決してより現実に適した MSR 多層膜の設計指針を得るために、記録磁区の記録層から再生層への転写性と各層の磁気特性に注目した。本報告では、最初に FAD 超解像ディスクの転写性と電気特性の関連及び磁気特性が転写性に与える影響について述べる¹⁵⁾。さらに、RAD 超解像ディスクの転写性の制御及び電気特性の関連について述べる¹⁶⁾。最後に実用性を重視した面内膜磁気超解像ディスクの高性能化の現状について述べる¹⁷⁾。

2. FAD 磁気超解像ディスクの磁気特性と転写性、電気特性の関連

〔1〕 ディスク構造及び成膜方法

Fig. 4 に我々が実験を行った FAD 磁気超解像ディスクの構造を示す。磁性層は、 $Gd_{x1}(Fe_{0.87}Co_{0.13})_{1-x1}$ 再生層、 $(Tb_{x2}(Fe_{0.87}Co_{0.13})_{1-x2})_{1-y2}Si_{y2}$ スイッチ層、 $Tb_{x3}(Fe_{0.87}Co_{0.13})_{1-x3}$ 記録層からなる 3 層構造である。

Table 2 に実験で使用した各層の組成と磁気特性を示す。1.6 μm ピッチのポリカーボネート基板を真空槽に仕込み、到達真空度を 2×10^{-7} Torr 以下として、スパッタ法により成膜した。

〔2〕 FAD 磁気超解像ディスクの電気特性

Table 2 の Condition I でスイッチ層のキュリー温度が 170°C のディスク A について、ディスクの線速度 5.65 m/s でレーザーの変調周波数を 7.1 MHz として信号を記録し、再生実験を行った。比較のために現行の市販 (1X) の光磁気ディスク B (磁性膜は TbFeCo 単層) も同様の条件で実施した。電気特性評価装置の光学ヘッドは、 $\lambda=780$ nm、NA=0.53 である。

Fig. 5 に再生磁界 H_r を 300 Oe (消去方向) とした

PC or Glass Substrate
SiN: 80nm
Readout L. GdFeCo: 30nm
Switching L. TbFeCoSi: 10nm
Recording L. TbFeCo: 40nm
SiN: 80nm
Al: 20nm

Fig. 4 The schematic cross section of the FAD disk in this study.

Table 2 Properties of the FAD film in this study, which consists of the readout layer $Gd_{x1}(Fe_{0.87}Co_{0.13})_{1-x1}$, the switching layer $(Tb_{x2}(Fe_{0.87}Co_{0.13})_{1-x2})_{1-y2}Si_{y2}$, and the recording layer $Tb_{x3}(Fe_{0.87}Co_{0.13})_{1-x3}$.

Layer	Composition	Curie Temp. (°C)	M_s (emu/cm ³)	Coercivity (kOe)
Condition I				
Readout	$x1=0.26$	340	~0	~0.5
Switching	$x2=0.23 \sim 0.24, y2=0.09 \sim 0.14$	140~190	~20	≥5
Recording	$x3=0.22$	250	~0	>12
Condition II				
Readout	$x1=0.23$	350	100	0.2
Switching	$x2=0.23 \sim 0.24, y2=0.09 \sim 0.14$	140~190	~20	≥5
Recording	$x3=0.22$	250	~0	>12

ときの再生信号のキャリア (C) とノイズ (N) の再生パワー依存性を示す (ディスク B では $H_r=0$)。現行ディスク B では再生パワーの上昇に従って単調にキャリアが上昇し C/N が 30 dB 程度になったあと 2.7 mW 以上で記録マークが消え始めるために急激に低下する。FAD ディスク A でも低パワーでは同様に再生パワーの上昇に従って単調にキャリアが上昇するが 2 mW 以上で階段状にキャリアが増加し 2.1 から 2.8 mW の範囲で 47 dB 以上の C/N が得られ、超解像が確認された。ディスク B で低いキャリアしか得られなかったのは、記録条件から記録マークのマーク長は 0.4 μm (ピッチ 0.8 μm) でレーザービームの回折限界の 0.37 μm に近いためである。

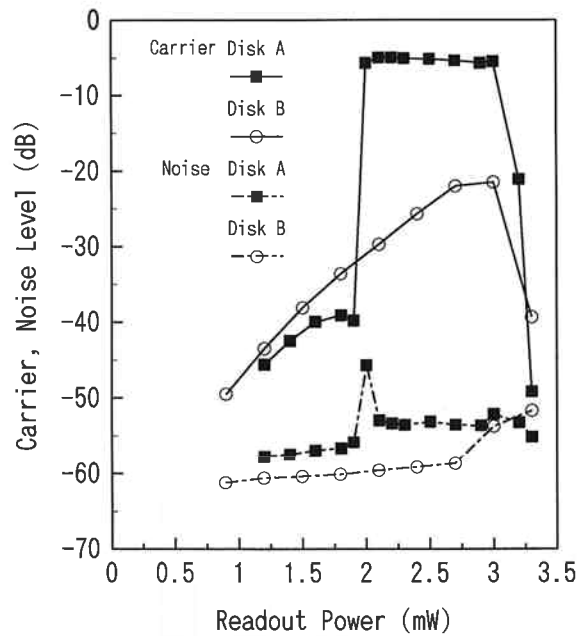


Fig. 5 The dependence of carrier and noise levels (domain size: 0.4 μm , pitch: 0.8 μm) on readout power for a FAD disk under condition I with T_{c2} of 170°C (disk A) and a conventional disk (disk B).

次にディスク A について 2.4 mW の再生パワーで再生磁界 H_r を変化させると Fig. 6 のように C、N が変化した。再生磁界が消去方向、記録方向でそれぞれキャリアの山があり、消去方向の山ではマスク部分で再生層の磁化が消去方向を向いた超解像が、記録方向の山ではマスク部分で再生層の磁化が記録方向を向いた超解像が起きている。

〔3〕 スイッチ層の Si 濃度と記録磁区の転写性、繰り返し再生の関連

スイッチ層のキュリー温度 (T_{c2}) を下げるとマスクが発生する温度が下がり、低い再生パワーで超解像を起こすことができ、再生パワーのマージンが大きくなるはずである。Fig. 7 のようにスイッチ層の Si 濃度を変化させることによりキュリー温度を変化させる実験でこのことは確認された。しかし、Fig. 8 のようにキュリー温度が 140°C 以下では良好な C/N が得られなかった。

T_{c2} が 140°C 以下での C/N の異常低下の原因を調べるために、ディスクと同バッチでガラス基板上に作製した薄膜に、小片試料書き込み装置で約 1.4 μm の磁区を 2.8 μm ピッチで多数書き込み、ガラス基板側からカー効果の測定を行った。Fig. 9 にカーループと各層のスピンの向きを模式的に示す。外部磁界の方向は正が電気特性評価装置の消去方向、負が記録方向に対応する。State I は記録磁区の内側も外側も各層のスピンの向きが平行な状態で、記録直後の状態である。State I から消去方向に外部磁界を増加させると H_{erase} の磁界で

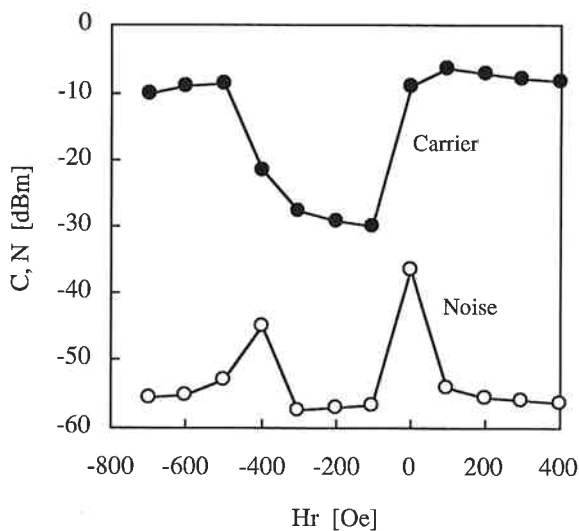


Fig. 6 The dependence of carrier and noise levels (domain size: 0.4 μm , pitch: 0.8 μm) on readout magnetic field H_r at P_r of 2.3 mW for a FAD disk under condition I with T_{c2} of 170°C (disk A).

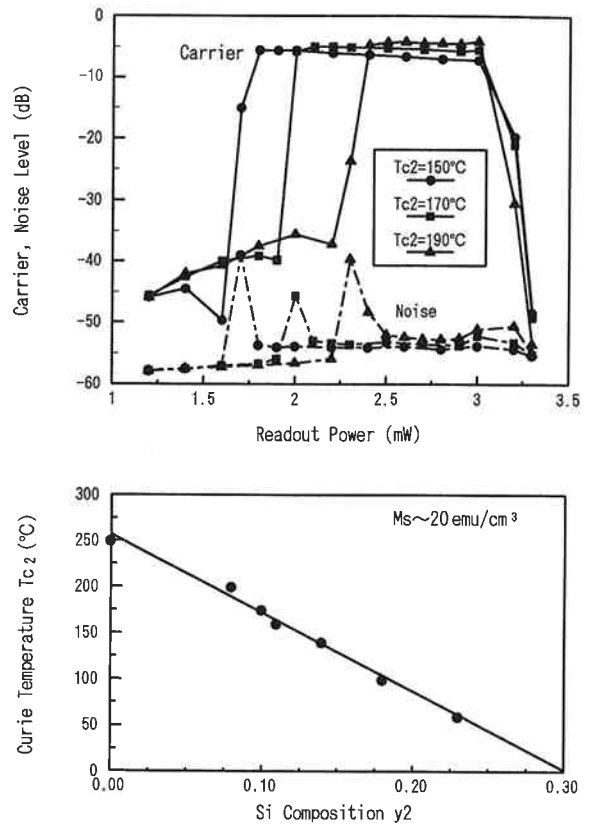


Fig. 7 Above: The dependence of carrier and noise levels (domain size: 0.4 μm , pitch: 0.8 μm) on readout power under condition I. Below: The dependence of Curie temperature on Si composition y_2 in the switching layer.

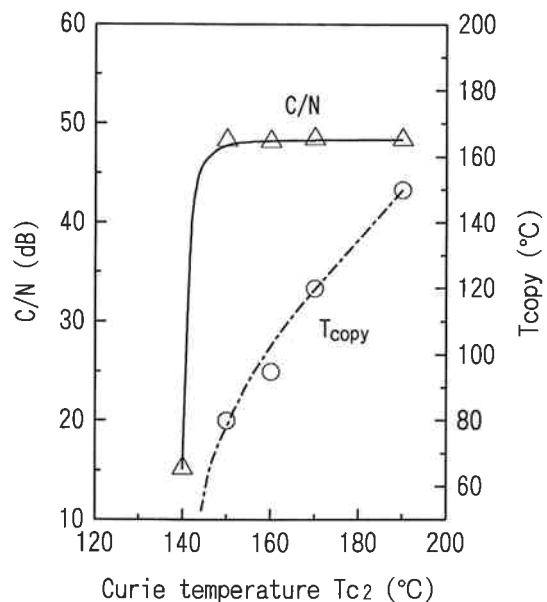


Fig. 8 The dependences of T_{copy} (domain size: 1.4 μm) and C/N (domain size: 0.4 μm , pitch: 0.8 μm) on Curie temperature of the switching layer, T_{c2} under condition I.

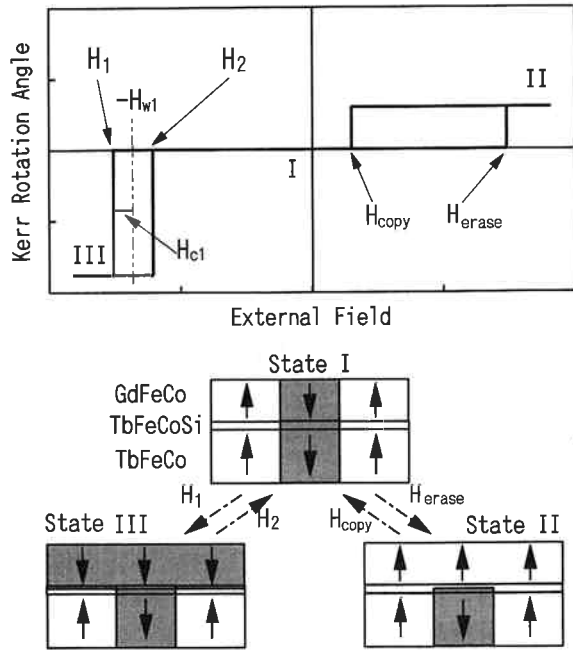


Fig. 9 The schematic illustration of a minor Kerr hysteresis loop of the GdFeCo readout layer with domain patterns.

GdFeCo 再生層の磁区内のスピンの反転して磁区が再生層内では消えてしまう (State II)。ただし、磁区は記録層に残っているので磁界を下げると H_{copy} の磁界で記録層の磁区が再生層に転写されて State I に戻る。次に、磁界を記録方向へ増加させると H_1 の磁界で GdFeCo 再生層の磁区外のスピンの反転して磁区が再生層内で消えてしまう (State III)。State III から磁界を減少させると H_2 の磁界で記録層の磁区外の状態が再生層に転写されて State I に戻る。

H_1 と H_2 の大きさは我々の実験では磁区がない場合と同じだった。従って、再生層の保磁力を H_{c1} 、記録層から再生層への交換結合有効磁界を H_{w1} とすると、

$$H_1 = -H_{w1} - H_{c1} \quad (1)$$

$$H_2 = -H_{w1} + H_{c1} \quad (2)$$

が成り立つ¹⁰⁾。

磁区がない場合、一定の再生パワーでの再生層の到達温度に対してマスクが発生する条件は小林モデルで容易に記述され⁹⁾、

$$-H_1 = H_{w1} + H_{c1} < H_r \quad (3)$$

となる。さらに降温時に記録層の状態が再生層に転写する場合の条件は

$$-H_2 = H_{w1} - H_{c1} > 0 \quad (4)$$

である。

磁区に対して同様の条件を考える。再生パワーでの再生層の到達温度に対してマスクが発生する (磁区が消え

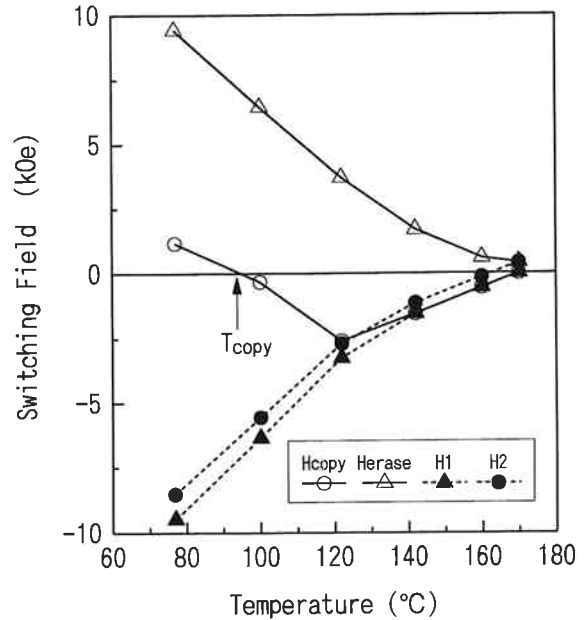


Fig. 10 The dependences of H_{erase} , H_{copy} , H_1 and H_2 on temperature for the sample with T_{c2} of 160°C under condition I (domain size: $1.4 \mu\text{m}$).

る) 条件は

$$H_{erase} < H_r \quad (5)$$

である。マスクを通過した後の降温時に記録層の磁区が再生層に転写する条件は、

$$H_{copy} > 0 \quad (6)$$

である。

後で述べるように H_1 と H_{erase} の絶対値は、ほとんど同じであり、式(3)と式(5)が等価と考えると、一定の再生パワーでの再生層の到達温度に対してマスクが発生する磁界は小林モデルにより容易に記述可能と考えられる。ところが、マスクを通過した後の降温時に記録層の磁区が再生層に転写する条件は、 H_{copy} と $-H_2$ がかなり異なるので、多層膜に磁区を書き込み、実験的に判定する必要がある。

Fig. 10 に Table 2 の Condition I で T_{c2} が 160°C の試料について各スイッチング磁界の温度変化を示す。 H_1 と H_{erase} の絶対値はどの温度でもほとんど同じである。これに対して、 H_{copy} は $-H_2$ に比べて大幅に負方向 (記録方向) にシフトしている。この試料では 90°C 以上で H_{copy} が負になり零磁界では転写しない (記録方向の磁界が転写に必要)。 H_{copy} が零になる温度を転写温度 T_{copy} とする。

Fig. 8 には T_{copy} と T_{c2} の関係を C/N と同時に示している。 T_{copy} は T_{c2} が下がるに従って小さくなった。 $T_{c2} = 140^\circ\text{C}$ の試料では T_{copy} は室温以下であった。従

って、 $T_{c2}=140^{\circ}\text{C}$ のときに C/N が急に小さくなったのは再生の時にマスク領域を通過したあと記録層の磁区が再生層に転写できなかったためと考えられる。 C/N の測定は1度記録した後、多数回再生を繰り返して平均しているのに繰り返し再生ができなければ良好な値は得られない。記録層に磁区が残っていることは、記録方向の磁界をかけながらの再生でキャリアが再出現する事で確認された。

(4) H_{copy} の室温での挙動

H_{copy} の室温での挙動を調べるために、Table 2 の Condition II のように GdFeCo 再生層の組成を TM リッチ方向へ変化させ、室温でのスイッチング磁界がカー効果測定装置の測定磁界以内となるようにした。

Fig. 11 に T_{c2} に対する室温でのスイッチング磁界の依存性を示す。記録層の磁区が再生層に転写する磁界 H_{copy} と、磁区の外側あるいは磁区がない場合に記録層の状態が再生層に転写する磁界 $-H_2 (=H_{w1} - H_{c1})$ の差は T_{c2} が高くなるに従って急激に小さくなった。 T_{c2}

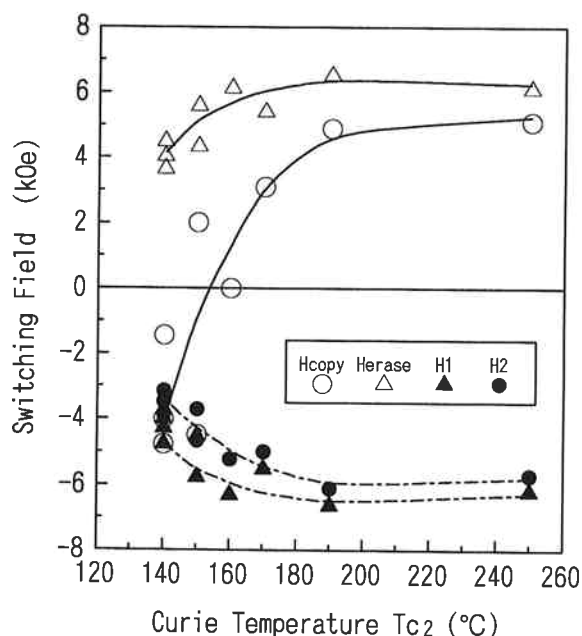


Fig. 11 The dependences of H_{erase} , H_{copy} , H_1 and H_2 at RT on Curie temperature of the switching layer, T_{c2} , under condition II (domain size: $1.4 \mu\text{m}$).

が 150°C 以下で $H_{\text{copy}} < 0$ となるために、 $-H_2 \gg 0$ であるにも関わらず記録層の磁区は再生層に転写しない。また、 T_{c2} が高くなるに従って H_{erase} や H_1 の絶対値が大きくなっているが、これは界面磁壁エネルギーが増加したためである。

GdFeCo 単層膜の $H_{c1}=0.2 \text{ kOe}$ であるが、3層膜では Fig. 12 のように T_{c2} が 150°C 以下で H_{c1} が急に大きくなっている。

(5) 各層の磁気特性が転写性に与える影響

オーバーライト光磁気多層膜に関して、金子らは1次元的な変分法を用いて、磁区がない場合の界面磁壁の計算を行った結果、界面磁壁は弱い磁界中で磁壁エネルギーの小さい方に移動すると報告している¹¹⁾。均質膜の場合、磁壁エネルギーは $4(AK)^{1/2}$ で表される。ただし、 A は交換スティッフネス定数、 K は有効垂直磁気異方性定数 ($K=K_u - 2\pi M_s^2$) である。

Table 3 の各層の磁気定数を使って、FAD 3層膜の界面磁壁の計算を行った。各層の K はトルクメータで測定し、スイッチ層に関しては Fig. 13 の T_{c2} と K_u

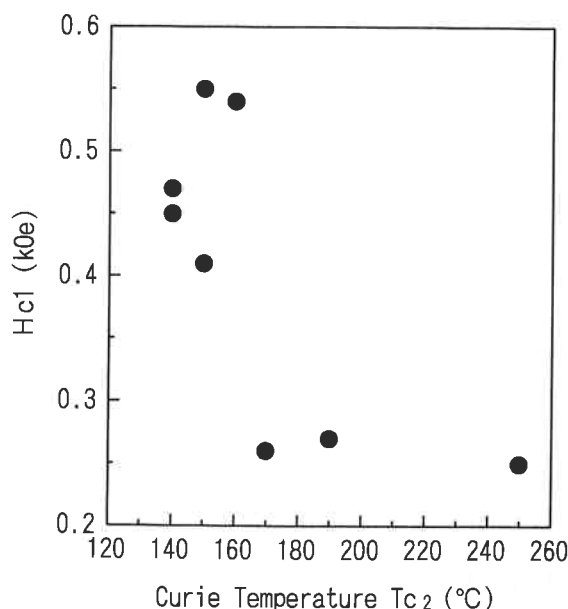


Fig. 12 The dependence of H_{c1} at RT on Curie temperature of the switching layer, T_{c2} , under condition II (domain size: $1.4 \mu\text{m}$).

Table 3 Magnetic parameters used for the calculation of the interface wall structure of the FAD film.

Layer	Parameter	M_s (emu/cm ³)	A (10^{-6} erg/cm)	K (10^6 erg/cm ³)
Readout		$M_{s1}=100$	$A_1=0.30$	$K_1=0.25$
Switching		$M_{s2}=20$	$A_2=A_3(0.26-y^2)/0.26$	$K_2=K_3(0.20-y^2)/0.20$
Recording		$M_{s3}=20$	$A_3=0.25$	$K_3=3.5$

の関係を使った。また A はキュリー温度と直線関係にあるものと仮定し、Mansuripur ら¹⁸⁾ の計算値を参考にした。Fig. 14 に計算結果の一例を示す。Fig. 14 の横軸はスイッチ層の中央部分を原点として薄膜の深さ方向の位置を示し、縦軸は膜面からのスピンの角度を示す。スイッチ層の Si 濃度が高くなって T_{c2} と K_u が小さくなるほど界面磁壁はスイッチ層の中で記録層側に移動する。ただし、界面磁壁の中心部分 ($\theta=0$ となる部分) はスイッチ層の中間より記録層側には動かない。

H_{c1} で表される保磁力は、多層膜では GdFeCo の上層部から界面磁壁の中心までの領域の保磁力の $M_s \times (\text{膜厚})$ による加重平均で近似される。従って、Fig. 12 で T_{c2} が 150°C 以下で急に大きくなっている理由は、Fig. 14 のように Si 濃度の変化で界面磁壁がスイッチ層の中で記録層側に移動したためといえる。

Fig. 14 だけでは、Fig. 11 の H_{copy} が $T_{c2}=150^\circ\text{C}$ 以下で負になった理由は説明されないが、Fig. 11、Fig. 12 を比較すると H_{c1} の急激な変化と H_{copy} の急激な変化が同時におこっていることがわかる。従って、界面磁壁がスイッチ層の中で再生層に寄っていればいるほど H_{copy} は正方向に移動し、 $H_{w1}-H_{c1}$ にも近くなる。逆に界面磁壁がスイッチ層の中で記録層に寄っていればいるほど H_{copy} は $H_{w1}-H_{c1}$ に比べて負方向に移動する。

H_{copy} が正にシフトした転写性が良好になる条件を各層の磁壁エネルギーで表すと、

$$A_1 \cdot K_1 \ll A_2 \cdot K_2 \leq A_3 \cdot K_3 \quad (7)$$

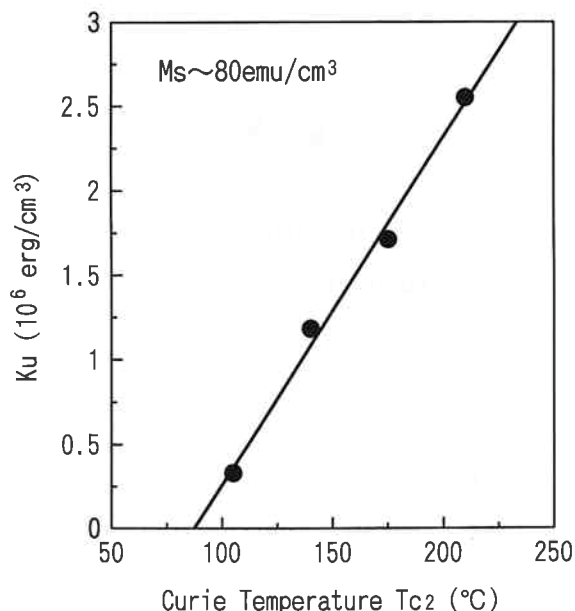


Fig. 13 The relationship between the perpendicular anisotropy constant K_u and Curie temperature of the switching layer.

である。従ってスイッチ層はキュリー温度が高く、垂直磁気異方性が大きいことが望ましい。再生マージンを大きくするにはキュリー温度を適当に低くして、垂直磁気異方性を大きくすることが必要である。また、再生層の垂直磁気異方性を下げることも考えられる。

Fig. 14 は磁区が無い状態での界面磁壁を表している。Fig. 15 に示すように、我々は磁区が界面磁壁に与える影響のモデルを提案した¹⁵⁾。つまり、磁区内の界面磁壁は磁区がない場合や磁区の外側の界面磁壁に比べて記録層方向に移動している。また、再生層とスイッチ層の磁壁エネルギーの差が小さくなるとこの傾向は助長される。

3. RAD 超解像ディスクの転写性の制御及び電気特性の関連

(1) ディスク構造及び実験方法

Fig. 16 に我々が実験を行った RAD 超解像ディスクの構造を示す。磁性膜は、 $\text{Gd}_{0.23}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_{0.77}$ 再生層、 $(\text{Tb}_{x1}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_{1-x1})_{1-y1}\text{Si}_{y1}$ 再生補助層、 $\text{Gd}_{0.19}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_{0.81}$ 中間層、 $\text{Tb}_{x2}(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.13})_{1-x2}$ 記録層の 4 層構造であり、特に断らない限りは $x2=0.19$ とする。基板は通常トラックピッチ $1.6 \mu\text{m}$ の PC 基板を用い、クロストークの測定のみトラックピッチ $1.2 \mu\text{m}$ の PC 基板を用いた。

電気特性評価条件は、 $\lambda=780 \text{ nm}$ 、 $\text{NA}=0.53$ 、線速度 $=7.54 \text{ m/s}$ 、初期化磁界 $H_{mi}=3.8 \text{ kOe}$ 、再生磁界 $H_r=0$ である。

(2) 磁区の転写性を考慮した初期化、転写条件

カー効果による転写性の評価は FAD 超解像ディスク

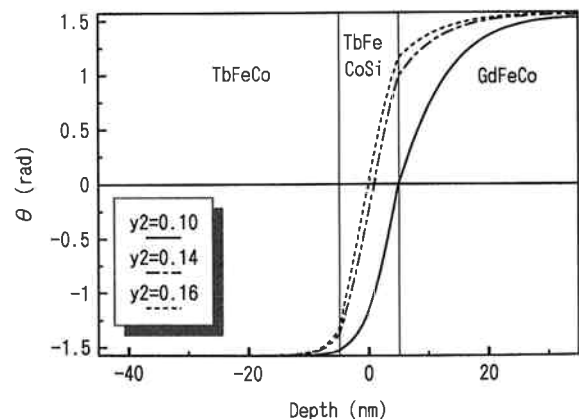


Fig. 14 The calculated results of the interface wall structure without domains at the external field of 6 kOe. The angle θ is that between the direction of the transition metal spin and the film plane. Parameters are described in Table 3.

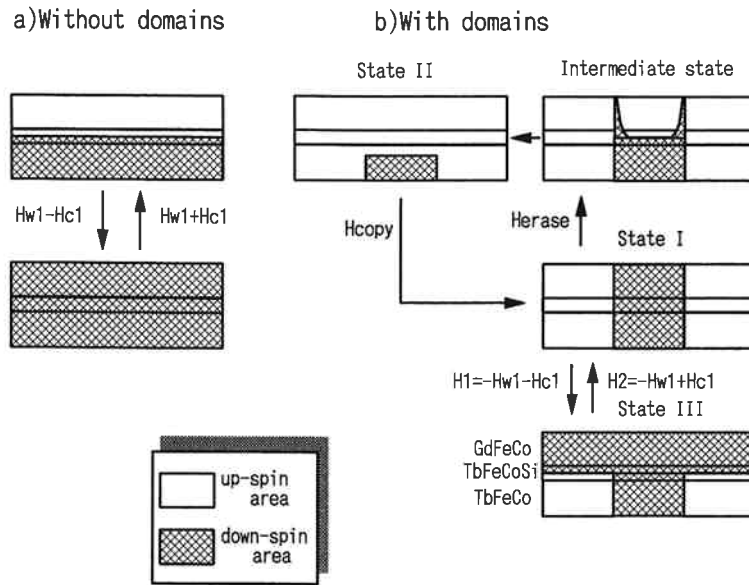


Fig. 15 The model of the wall position for each state. The case with domains is compared with the case without domains.

PC or Glass Substrate
SiN: 80nm
Readout L. GdFeCo: 30nm
Subsidiary L. TbFeCoSi: 20nm
Intermediate L. GdFeCo: 15nm
Recording L. TbFeCo: 40nm
SiN: 80nm
Al: 20nm

Fig. 16 The schematic cross section of the RAD disk in this study.

と同じように 1.4 μm の磁区について行った。スイッチング磁界の定義は Fig. 9 と同じであるが、RAD 超解像ディスクの場合は中間層の垂直磁気異方性が最も小さく、再生層と再生補助層が強く交換結合してカーループが一体化しているので、カーループは再生層と再生補助層を一体化して解釈する必要がある。従って、 H_{c1} は再生層と再生補助層の合成保磁力、 H_{w1} は記録層から再生層と再生補助層への中間層を介しての交換結合有効磁界とすると(1)、(2)式が成り立つ。

磁区がない場合の初期化条件は

$$-H_1 = H_{w1} + H_{c1} < H_{ini} \quad (8)$$

$$-H_2 = H_{w1} - H_{c1} < 0 \quad (9)$$

磁区がない場合のアーチャーが生成する温度での記録層

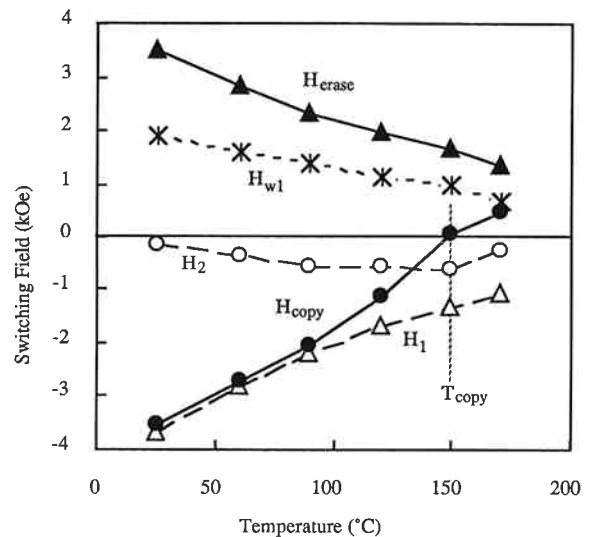


Fig. 17 The dependences of switching fields on temperature for $x_1=0.19$, $y_1=0.08$ and $x_2=0.19$.

状態の再生層への転写の条件は

$$H_1 < H_r < -H_2 \quad (10)$$

である⁵⁾。

Fig. 17 に再生補助層が $x_1=0.19, y_1=0.08$ (試料C) としたときのスイッチング磁界の温度依存性を示す。室温では FAD 3層膜のときと同様に $H_{copy} \ll -H_2$ であるが、RAD 4層膜では温度が上がるとその差は縮まり 150°C 以上で $H_{copy} \geq 0$ となった。磁区の転写性を考慮した初期化条件は

$$H_{erase} < H_{ini} \quad (11)$$

$$H_{copy} < 0 \quad (12)$$

アパーチャが生成する温度での記録層の磁区の再生層への転写の条件は

$$H_1 < H_r < H_{copy} \quad (13)$$

である。Fig. 17 では室温で $-H_2 > 0$ なので(9)式は満たさないが、(12)式は満たしている。 $H_{copy} = 0$ となる温度を T_{copy} とする。

試料CのC、N (マーク長 $0.4 \mu\text{m}$ 、ピッチ $0.8 \mu\text{m}$) の再生パワー P_r 依存性を Fig. 18 に示す。再生パワー 1.8 mW までCとNが同じで全くキャリアが現れず初期化状態が安定であり、 2 mW 以上で急激にCが高まり、約 4 mW で最高到達温度が記録層のキュリー温度を越えたためにC/Nが急激に下がった。C/Nは最大 46 dB 以上であり、MSRによる高密度記録での高いC/Nが確認された。

(3) 再生補助層の磁気特性の転写性、再生特性に与える影響

Table 4 に磁区の転写性と再生補助層の磁気特性を比較する。再生補助層の磁気特性は x_1, y_1 を変化させることで調整した。 $x_1 = 0.17$ のとき、Si濃度 y_1 を減らすことで K_u を増加させると、 H_{copy} は負方向(記録方

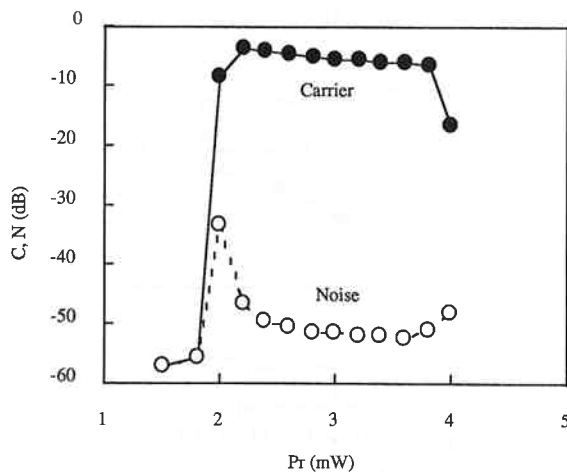


Fig. 18 Dependence of carrier and noise level (mark length $0.4 \mu\text{m}$, pitch $0.8 \mu\text{m}$) on readout power P_r for $x_1 = 0.19, y_1 = 0.08$ and $x_2 = 0.19$.

向)に移動し、 T_{copy} が高くなって初期化の安定性が高まる。 $y_1 = 0.08$ として、 T_b 濃度 x_1 を増やすことで M_s を減らしても同様である。また、いずれの試料も室温で $-H_2 > 0$ なので(9)式は満たさないが、(12)式は満たしている。つまり、初期化は磁区に対してのみ可能である。

さらに、Table 4には電気特性評価装置で評価した初期化の安定性、カーループの角型性、C/N (マーク長 $0.4 \mu\text{m}$ 、ピッチ $0.8 \mu\text{m}$)も同時に示している。 $y_1 = 0.14$ の時以外は電気特性でも初期化が確認され、MSRが発生した。 $y_1 = 0.14$ の時は $T_{copy} = 40^\circ\text{C}$ なので電気特性では初期化が確認されなかった。MSR再生でのC/Nは、 T_{copy} が高く、カーループの角型性が良いほど高い。つまりアパーチャの現れ方が急峻なほどC/Nが高いことが確認された。

C/Nに関してはさらに記録層の組成を $x_2 = 0.21$ とすることでマーク長 $0.4 \mu\text{m}$ で 47 dB が得られた。また、線速度が高くなるほどC/Nは高くなり、線速度 9.4 m/s で 48 dB となった。

(4) RADとD-RADの特性比較

再生補助層のキュリー温度をFADのスイッチ層程度に下げ、再生磁界をかけることにより、再生補助層のキュリー温度以上で再生層の磁化が再生磁界方向を向いたマスクが出現し、前方の初期化によるマスクとあわせて2つのマスクがビームスポット内に存在するDouble masked RAD (D-RAD)が可能である。D-RADではRADに比べて解像度が高いと報告されている⁵⁾。

Fig. 19に $x_1 = 0.19, y_1 = 0.08, x_2 = 0.21$ の試料で再生磁界 H_r を変えた場合のC、Nの P_r 依存性を示す。 $H_r = 0$ ではCの上昇は1段であるが、 $H_r = -400 \text{ Oe}$ では $P_r = 3.5 \text{ mW}$ で2段目のCの上昇が見られD-RADが確認された。ただし、最大のC/Nでは $H_r = 0$ のRADで 47.2 dB 、 $H_r = -400 \text{ Oe}$ のD-RADで 47.5 dB とほとんど同じである。各層の特性の十分な調整に

Table 4 Dependences of copying characteristics, stability of initialized state evaluated by the disk tester, squareness of a Kerr loop and C/N (mark length $0.4 \mu\text{m}$) on properties of the subsidiary layer.

Properties of the subsidiary layer		Copying characteristics			Initializing	Squareness	C/N ($0.4 \mu\text{m}$)			
x_1	y_1	K_u	M_s	T_c	by Disk tester	of Kerr loop				
		10^6 erg/cc	emu/cc	$^\circ\text{C}$	$H_{copy}(\text{RT})$	$-H_2(\text{RT})$	T_{copy}			
					kOe	kOe	$^\circ\text{C}$			
0.17	0.14	2.1	104	180	-0.39	0.81	40	×	○	27
0.17	0.10	3.8	151	210	-2.21	0.24	110	○	○	42
0.17	0.08	5.1	163	230	-2.85	0.20	135	○	○	44
0.15	0.08	5.2	215	240	-1.45	0.16	100	○	×	36
0.19	0.08	5.2	117	210	-3.55	0.13	150	○	⊙	46