光変調オーバライト磁気超解像ディスクの ローパワー消去特性

徳永 隆志*¹・藤井 善夫*¹・辻本 浩章*²

(受理2002年12月24日, 掲載決定2003年4月5日)

Low Process Characteristics of Direct Overwrite Magneto-Optical Disk
with Magnetically Induced Super Resolution Readout Function

Takashi TOKUNAGA*¹, Yoshio FUJII*¹ and Hiroaki TSUJIMOTO*²

*¹Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661, Japan

*²Graduate School of Engineering, Osaka City University

3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan

(Received December 24, 2002, Accepted April 5, 2003)

The low process characteristics of light intensity modulation direct overwrite (LIMDOW) magneto-optical disk with magnetically induced super resolution (MSR) function, especially front aperture detection (FAD) type were investigated. To improve low power margin in FAD-LIMDOW disks, exchange coupling between memory and writing layers should be large on copy temperature. It was confirmed that RE (Rare Earth)-rich composition was suitable for FAD readout and memory layer, and that high recording density LIMDOW disk with wide power margin was obtained.

1. はじめに

コンピュータ用ストレージメディアである光磁気ディスクは下位互換性を維持しつつ, より大容量化しながら普及している. 大容量化とともに高速化も必要とされ, 特に高画質の動画データの記録には記録速度の高速化は重要である. 従って, マルチメディア記録媒体ではダイレクトオーバライトは必須の機能である. 光磁気ディスクにおいては, 1987年に交換結合2層膜媒体に初期化磁石を用いた光変調ダイレクトオーバライト (Light Intensity Modulation Direct Overwrite, LIMDOW) 方式が提案された¹⁾. さらに, 1989年に初期化磁石を不要にした交換結合4層膜媒体が提案され²⁾, 1995年に640

MByte/3.5インチおよび2.6 GByte/5.25インチがISO規格準拠として製品化されている³⁾. 我々は, LIMDOW光磁気ディスクのさらなる高記録密度化を実現するため, 磁気超解像 (MSR, Magnetically induced Super Resolution⁴⁾) 再生機能や磁区拡大再生機能を付加した高密度 LIMDOW 光磁気ディスクの検討を行ってきた⁵⁻⁷⁾.

LIMDOW 動作は新しいデータを記録するためのハイパワー (P_H) と古いデータを消去するためのローパワー (P_L) の2値のレーザ光強度を照射することにより実現される. 交換結合4層膜の各磁性層の磁化状態は昇温後の降温過程時における隣接磁性層間の交換結合力と記録磁界, 及び保磁力との関係により決まる^{8,9)}. MSR層を付加した磁気超解像 LIMDOW ディスクでは, 付加したMSR層により消去過程に相当するローパワープロセスでの転写特性が低下し, 消し残りによりオーバライト特性が劣化する問題が生じる. 本稿では, MSR層と

*¹ 三菱電機先端技術総合研究所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

*² 大阪市立大学大学院工学研究科 (〒559-8585 大阪市住吉区杉本町3-3-138)

<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 30px; margin: 0 auto; text-align: center; line-height: 30px;">Laser</div>		
PC substrate [Tp=1.6μm]	<Material>	<Thickness>
Enhanced	SiN _x	65 nm
FAD readout	GdFeCo+Gd _x	20 - 40 nm
FAD intermediate	Tb _{20.5} Dy _{0.9} Fe _{78.6}	10 - 20 nm
Memory	Tb _x (Fe ₉₃ Co ₇) _{100-x}	21 - 28.5 nm
DOW intermediate	Gd _{24.4} Fe _{52.7} Co _{22.9}	10 nm
Writing	Dy _{25.8} Fe _{51.2} Co _{23.2}	35 nm
Switching	Tb _{17.8} Fe _{78.1} Co _{4.1}	15 nm
Intializing	Tb _{25.3} Fe _{14.9} Co _{59.8}	40 nm
Protected	SiN _x	90 nm
UV resin	UV resin	

Fig. 1 Disk structure of FAD-LIMDOW disk.

ローパワープロセスとの関係について述べる。

2. FAD-LIMDOW ディスク

Fig. 1 に FAD (Front Aperture Detection)⁴⁾タイプの MSR 層を付加した FAD-LIMDOW ディスクの構成と各磁性層の組成、及び膜厚を示す。実験に用いた FAD-LIMDOW ディスクはトラックピッチ (Tp)=1.6 μm の PC 基板の上に DC マグネトロンスパッタ法により連続成膜することで作成した。SiN_x 保護層上に紫外線 (UV) 硬化型樹脂層を用いた UV 樹脂層を形成した後、1.2 MA/m の外部磁界により初期化層を一樣磁化させた。FAD-LIMDOW ディスクにおける MSR 層とローパワープロセスとの関係を調べるため、記録特性に寄与するダイレクトオーバーライト (DOW) 中間層から初期化層までの磁性層は全て同一条件で作成した。記録再生特性は波長 680 nm、開口数 0.55 の光ヘッドを有する光ディスク評価装置により Table 1 に示す評価条件で測定した。Fig. 2 に記録マーク長 ML=0.35 μm のキャリア対ノイズ比 (carrier to noise ratio, CNR) の再生パワー依存性を示す。1.9 mW 以上の再生パワー (P_R) で、一樣磁化状態となり再生信号に寄与しないマスク領域が形成され光学分解能の向上により磁気超解像再生が起こり始める。3.2 mW 以上の P_R ではローパワープロセスにより CNR の低下が生じ、P_R=3.7 mW で完全な消去が行われている。再生パワー依存性においてローパワープロセスにより CNR が 1 dB 低下するパワーを P_R マージンの上限値として最大再生パワー (P_{Rmax})、キャリアレベルが 40 dB 以上低下する DC パワーを LIMDOW 媒体において十分な消去パワーであるとして P_L マージンの下限値 (P_{Lmin}) を規定している。Fig. 2 には記録周波数 1 MHz、パルス幅 500 nsec、P_R = 1.5 mW で測定した

Table 1 Measurement conditions of read/write characteristics

LD wavelength, λ	680 nm
Numerical Aperture, N.A	0.55
Linear velocity, LV	8.39 m/sec
Frequency, f	12 MHz
Mark length, ML	0.35 μm
External field, H _{EX}	0~20 kA/m
MSR readout field, Hr	± 40 kA/m

Fig. 2 P_R dependences of CNR.

CNR の記録パワー依存性 (●) も示している。ここでの最小記録パワーがハイパワープロセスの記録閾値パワー (P_{Hth}) であるため、P_{Hth}-0.1 mW を P_L マージンの上限値 (P_{Lmax}) として評価している。

3. ローパワー消去特性

LIMDOW ディスクの P_{Lmin} は、DC レーザ光照射後に FAD 動作条件で再生したときのキャリアレベルの消去パワー依存性であるローパワー消去特性を以下の手順で測定することで評価できる。

〈ローパワー消去特性評価手順〉

- 〈1〉 外部磁界 H_{EX} を印加しながら消去パワー (P_e) の DC レーザ光を照射する
- 〈2〉 MSR 動作条件で再生したときのキャリアレベルを測定する
- 〈3〉 徐々に照射する P_e を増大させる

Fig. 3 Pe dependences of CNR.

Fig. 4 Schematic diagram of power margins on FAD-LIMDOW disk.

種々の膜構成の FAD-LIMDOW ディスクについて H_{EX} を印加した条件で P_{Lmin} の測定を行っている際に、Fig. 3 に示すように記録方向磁界で P_{Rmax} から P_{Lmin} までの遷移領域が広く、多くの P_e を必要とするディスクが見られた。Fig. 4 に示す FAD-LIMDOW ディスクのパワー-margin 特性の模式図からわかるように P_{Rmax} と P_{Lmin} 間の DC レーザパワーは P_R と P_L の各パワー-margin の遷移領域である。記録感度に相当する P_{Hth} が等しく P_{Lmin} により遷移領域のみが異なる Disk A と B の比較から、この遷移領域は可能な限り小さくすることがパワー設計、特に P_L margin 設計において望ましいことがわかる。

Fig. 3 は Table 1 に示す評価条件で測定した CNR の消去パワー依存性であり、図中の太線は再生パワー依存

Fig. 5 Low power process. Outer and inner arrows represent the net magnetization and the TM sublattice magnetization, respectively.

性 (Fig. 2) を示している。記録方向の $H_{EX} = 12 \text{ kA/m}$ での P_{Rmax} から P_{Lmin} までの遷移領域が拡大し、 P_{Lmin} は P_{Hth} を超えている。 $P_{Lmin} > P_{Hth}$ である LIMDOW ディスクには P_L margin が無く、LIMDOW 動作が期待できない。LIMDOW ディスクは記録方向の一定磁界、つまり永久磁石を用いた記録が可能であることが特長であり、12 kA/m 程度の磁界でのローパワー消去特性が劣化することは大きな問題である。

P_{Rmax} と P_{Lmin} 間の遷移領域の拡大はローパワープロセスでのメモリ層の転写特性のばらつきによる消し残りが原因である。ローパワープロセスでの記録層の磁化方向に揃う転写プロセスは Fig. 5 に示すように FAD 再生層からメモリ層の 3 つの磁性層が磁化反転する磁化遷移であり、記録層から初期化層までの 3 つの磁性層の磁化方向は変化しない。従って、ローパワー消去特性劣化の原因を解明するとともに特性の改善をはかるためには転写プロセスに関わる FAD 再生層、FAD 中間層、及びメモリ層の 3 つの磁性層について考えればよい。

3.1 メモリ層

まず、メモリ層とローパワー消去特性の関係について調べる。FAD-LIMDOW ディスクのメモリ層には垂直磁気異性が大きく高保磁力材料の TbFeCo を用い、Tb ターゲットと $\text{Fe}_{93}\text{Co}_7$ 組成の合金ターゲットを用いた 2 元同時 DC スパッタ法により成膜している。Tb ターゲットへの投入パワー $P_f(\text{Tb})$ を 70 W 一定として、FeCo ターゲットへの投入パワー $P_f(\text{FeCo})$ を 160 W ~ 240 W で変化させることでメモリ層組成の異なる FAD-LIMDOW ディスクを作成した。 $P_f(\text{FeCo}) = 200 \text{ W}$ ではほぼ補償組成である Tb23.5 at% の TbFeCo 膜が得られる。作成した FAD-LIMDOW ディスクに CNR が最大となる最適記録条件で記録した $\text{ML} = 0.35 \mu\text{m}$ 最密パターンでローパワー消去特性を測定した。

Fig. 6 Pe dependences of carrier levels on low power process.

Fig. 6 に $H_{EX} = 0, 8, 16$ kA/m でのローパワー消去特性, キャリアレベルの再生パワー依存性, 及び記録閾値 P_{Hth} 特性を示す. ローパワー消去特性での P_{Lmin} , 再生パワー依存性での P_{Rmax} , 及び P_{Hth} の $Pf(FeCo)$ 依存性を Fig. 7 に示す. メモリ層組成が遷移金属 (Transition Metal, TM) 磁化優勢である TM リッチ組成になるほ

Fig. 7 Dependences of P_{Lmin} , P_{Rmax} and P_{Hth} on Tb content of memory layer.

ど記録方向の H_{EX} の存在により多くの消去パワーが必要であった. P_{Rmax} と P_{Lmin} 間の遷移領域は H_{EX} の増加とともに拡大し, P_L マージンが狭くなっている. そして, $Pf(FeCo) = 240$ W の FAD-LIMDOW ディスク [Fig. 6(d)] は, $H_{EX} = 16$ kA/m のとき $P_{Lmin} = 5.8$ mW, $P_{Lmax} = 5.9$ mW ($P_{Hth} = 6.0$ mW) であり, P_L マージンは 0.1 mW にまで縮小している. つまり, 16 kA/m 以上では LIMDOW 動作に必要な P_L マージンがほとんどないディスクであることがわかる.

ローパワー消去動作条件は, 記録層からの交換結合力 H_w , メモリ層の反転磁界 H_c , 及び H_{EX} により次式で表される¹⁰⁾.

$$H_w > H_c + H_{EX} \quad (1)$$

$$H_w = \frac{\sigma_w}{\sum M_{s_i} \cdot t_i} \quad (2)$$

ここで, σ_w はメモリ層と記録層間の界面磁壁エネルギー, $\sum M_{s_i} \cdot t_i$ は FAD 再生層, FAD 中間層, メモリ層の飽和磁化と膜厚の積の総和である. 式(1)より, H_w が大きいほど転写動作における H_{EX} の影響を受けにくくなる. メモリ層組成は異なるものの同じ DOW 中間層を用いているので検討したディスクの σ_w は等しく, ローパワー消去特性の違いは $\sum M_{s_i} \cdot t_i$ により生じている. メモリ層が TM リッチ組成になるほど P_{Lmin} が増大した要因は転写温度での大きな M_s による H_w の減少である. 従って, 転写温度近傍で補償温度となる希土類金属 (Rare Earth, RE) 磁化優勢である RE リッチ組成で良好なローパワー消去特性が得られている.

比較検討したメモリ層成膜時の FeCo ターゲットへの投入パワー $Pf(FeCo) = 160$ W ~ 240 W [Tb20.4 ~ 27.7 at

％]で記録閾値 P_{Hth} に差はなかったが、 P_{Rmax} は RE リッチ組成ほど低下し P_R マージンが減少している。記録層のキュリー温度 (T_c) 近傍まで昇温させるハイパワープロセスがメモリ層の T_c 以上での動作であるため、 P_{Hth} はメモリ層組成には依存しなかった。 P_L マージンが広い場合にはメモリ層と記録層間の交換結合力を DOW 中間層により下げることによって P_{Rmax} の低下を補うことができる¹¹⁾。

3.2 FAD 再生層

メモリ層成膜時の $Pf(FeCo) = 240$ W の FAD-LIM-DOW ディスク [Fig. 6(d)] はローパワー消去特性の劣化が著しく、 P_L マージンのほとんど無い特性であった。転写特性には FAD 再生層、FAD 中間層、及びメモリ層の 3 つの磁性層が関与すると考えられ、遷移領域が広い $Pf(FeCo) = 200$ W のメモリ層組成のディスクについて FAD 再生層の寄与について調べた。

FAD 再生層は組成 $Gd_{20.6}Fe_{53.8}Co_{24.2}$ の GdFeCo 合金ターゲットを用いて成膜し、FAD 再生層の Gd 量は 6 インチ径のターゲット上に添付する 10 mm 角の Gd チップ枚数により制御している。FAD 再生層の Gd 組成が 22.6 at％、23.5 at％、及び 24.4 at％である FAD-LIM-DOW ディスクのローパワー消去特性から得られた P_{Lmin} 、及び P_{Rmax} の FAD 再生層の Gd 組成依存性を Fig. 8 に示す。

Gd23.5 at％の補償組成に対して、FAD 再生層が RE リッチ組成の Gd24.4 at％では $H_{EX} = 16$ kA/m で P_{Rmax} と P_{Lmin} の差であるローパワー消去遷移領域が 0.5 mW と良好な特性が得られた。しかし、TM リッチ組成の Gd22.6 at％ディスクでは急激に遷移領域が増大している。 P_{Hth} は FAD 再生層の Gd 量の増加とともに上昇、つまり Gd リッチ組成ほど記録感度が低下している。これは、GdFeCo/TbFeCo 2 層膜の記録特性に見られるよ

うに、GdFeCo 層が TM リッチ組成の場合には、記録時に浮遊磁界が磁化反転をアシストする方向に作用するとともに、高 T_c の GdFeCo 層からの転写モードの影響も考えられる。

FAD 再生層のローパワー消去特性の Gd 量依存性より、FAD 再生層組成もメモリ層と同様に RE リッチ組成が適していることがわかった。また、TM リッチ組成ほど浮遊磁界の効果により低記録磁界で記録しやすく、つまり消去には不利に作用することがわかった。

3.3 FAD 中間層

最後に、FAD 中間層とローパワー消去特性の関係について調べる。FAD 中間層には TbFe 膜、または TbDyFe 膜を用い、組成は TbFe 合金ターゲット上に添付する Tb と Dy の希土類金属チップ枚数により制御して成膜した。FAD 再生層の Gd 組成 24.4 at％、メモリ層には $Pf(FeCo) = 200$ W の組成を用いた。FAD 中間層の Dy 量を変化させた FAD-LIM-DOW ディスクを作成し、ローパワー消去特性の評価より得られた P_{Lmin} 、 P_{Rmax} 、及び P_{Hth} の FAD 中間層の RE (Tb, Dy) 組成依存性を Fig. 9 に示す。検討を行った RE 量 17.9～21.1 at％の範囲ではローパワー消去特性に大きな違いは認められない。また、 P_{Rmax} と P_{Lmin} 間のローパワー消去遷移領域は何れのディスクも 0.5 mW 程度と小さく、良好なローパワー消去特性であった。

実験を行った FAD-LIM-DOW ディスクの FAD 中間層には低 T_c で補償組成近傍、つまり M_s の小さい材料・組成を用いている。検討した FAD-LIM-DOW ディスクでのローパワープロセス動作温度は 120～140℃程度である FAD 中間層の T_c 近傍、もしくは T_c 以上であるため、FAD 中間層のローパワー消去特性に関する $\Sigma M_s \cdot t_i$ への寄与がほとんど無い。また、 M_s も小さい組成であるため記録特性、磁界特性への影響も無く動作したと

Fig. 8 Dependences of P_{Lmin} , P_{Rmax} and P_{Hth} on Gd content of FAD readout layer.

Fig. 9 Dependences of P_{Lmin} , P_{Rmax} and P_{Hth} on RE content of FAD intermediate layer.

考えられる。

MSR 中間層に面内磁気異方性の磁性膜を用いる RAD (Rear Aperture Detection)¹²⁾ タイプの場合には、MSR 中間層の T_c はローパワープロセス動作温度より高く、 M_s が大きいのでローパワー消去特性への影響を考慮する必要がある。

4. ま と め

FAD タイプの MSR 層を有する磁気超解像 LIM-DOW ディスクのローパワー消去特性を調べ以下の結論を得た。

〈1〉メモリ層と FAD 再生層には転写温度近傍で補償温度となる RE リッチ組成が最適である。転写温度での小さな飽和磁化により交換結合力が増大し、 P_L マージンの広い良好なローパワー消去特性が得られる。

〈2〉ローパワー消去特性は FAD 中間層に依存しない。FAD 中間層の T_c は転写温度と同程度と低いいため、転写時の飽和磁化が小さく交換結合力に係わる $\Sigma M_{s_i} \cdot t_i$ への寄与は小さい。

MSR 再生特性は主にリアマスクの形状と形成位置に依存すると考えられる。FAD タイプの MSR のリアマスク形成は FAD 再生層の磁気特性にも依存するが FAD 中間層の T_c の寄与するところが大きい。本稿で実験に用いた FAD-LIMDOW ディスクでは FAD 中間層の T_c 、及び垂直磁気異方性が同程度であるため、FAD 動作開始パワー、キャリアレベルに大きな違いは見られなかった。

FAD-LIMDOW ディスクでのローパワープロセス特性と $\Sigma M_{s_i} \cdot t_i$ に関する結果は、さらに高密度化が期待できるダブルマスク RAD タイプ¹³⁾や磁区拡大再生 LIMDOW ディスクの媒体設計にも適用できると考えられる。しかし、リアマスクやアパーチャーの形成に交換結

合力による転写特性を利用している FAD タイプ以外の MSR 方式では MSR 層の組成により MSR 再生特性が変化するため、ローパワープロセス特性とともに再生特性についても評価する必要がある。

〔文 献〕

- 1) 佐藤正聡, 斎藤旬, 松本広行, 赤坂秀機: 第34回日本応用物理学会春季予稿集, 28p-ZL-3 (1987) 721.
- 2) 中木義幸, 深見達也, 徳永隆志, 田口元久, 堤和彦: 第13回日本応用磁気学会学術講演概要集, 23aC-4 (1989) 192.
- 3) ISO/IEC15041, ISO/IEC14517
- 4) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko and K. Watanabe: *Proc. SPIE* **1499**, Optical Data Storage Topical Meeting (Colorado Springs, 1991) 209.
- 5) Y. Fujii, Y. Nakaki, T. Tokunaga and K. Tsutsumi: *Proc. MORIS '92*, J. Magn. Soc. Jpn., **Vol. 17**, Suppl. No. S1 (1993) 167.
- 6) Y. Fujii and T. Tokunaga: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 520.
- 7) T. Tokunaga, Y. Fujii and K. Yamada: *Proc. MORIS '99*, J. Magn. Soc. Jpn., **Vol. 23**, Suppl. No. S1 (1999) 169.
- 8) T. Fukami, Y. Nakaki, T. Tokunaga, M. Taguchi and K. Tsutsumi: *J. Appl. Phys.*, **67** (1990) 4415.
- 9) 堤和彦: 日本応用磁気学会誌, **Vol. 15**, No. 5 (1991) 831.
- 10) T. Kobayashi, H. Tsuji, S. Tsunashima and S. Uchiyama: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) 2089.
- 11) T. Tokunaga, Y. Nakaki, T. Fukami and K. Tsutsumi: *Proc. MORIS '92*, J. Magn. Soc. Jpn., **Vol. 17**, Suppl., No. S1 (1993) 357.
- 12) M. Ohta, A. Fukumoto, K. Aratani, M. Kaneko and K. Watanabe: *Proc. MORIS '91*, J. Magn. Soc. Jpn., **Vol. 15**, Suppl. No. S1 (1991) 319.
- 13) 玉野井健, 松本幸二, 庄野敬二: 第19回日本応用磁気学会学術講演会, 26pE, (1995) 480.