

トピックス

磁気超解像を用いた光変調ダイレクトオーバーライト技術

Magnetically Induced Super Resolution Light Intensity Modulation Direct Overwrite Technology

藤井善夫・徳永隆志 三菱電機(株), 先端技術総合研究所

Y. Fujii and T. Tokunaga, Mitsubishi Electric Corp., Advanced Technology R & D Center

Light intensity modulation direct overwrite (LIMDOW) and magnetically induced super resolution (MSR) readout are effective means of increasing the write transfer rate and the storage capacity of magneto-optical disks, respectively. LIMDOW layers and MSR readout layers were combined by exchange coupling and both of these advantages were realized in a single magneto-optical disk. This paper describes how threshold temperatures of LIMDOW-MSR disks were designed to maximize the read power margin and the erase power margin and to narrow the track pitches. It also describes the write and read characteristics of LIMDOW-MSR disks using front aperture detection type and rear aperture detection type MSR and land/groove recording schemes. LIMDOW-MSR disks have a potential areal density of more than 3.5 Gbit/inch², and are expected to be used as multi-media data storage media.

Key words: magneto-optical disk, magnetically induced super resolution (MSR), front aperture detection (FAD), rear aperture detection (RAD), light intensity modulation direct overwriting (LIMDOW), land and groove recording

1. はじめに

コンピュータ用ストレージメディアは大容量化の一途を辿っている。その背景には画像データに象徴されるようなサイズの大きなデータファイルをコンピュータで扱うことの一般化がある。光磁気ディスクにおいても下位互換性を維持しつつ、より大容量なものへと世代交代を続けながら普及が進んできた。次世代以降の大容量化技術としては1991年に提案された磁気超解像 (MSR: Magnetically Induced Super Resolution) 方式^{1), 2)}が媒体のみによって高密度化を可能にする方式として多くの研究グループにより検討^{3)~7)}されている。

一方、大容量化に伴い高速性も必要とされている。これは個々のファイル容量が大きくなっても読み書きする時間は従来とあまり変わらないことが望まれるという使い勝手の面以外に、動画をリアルタイムで記録するような場合には記録速度が速いことが高画質のための条件となるからで

ある。したがって高性能マルチメディア記録媒体においては、情報を1パスで重ね書きするダイレクトオーバーライトが必須の機能と言えよう。光磁気ディスクにおいてオーバーライトを実現する方法には磁界変調記録方式^{8), 9)}と光変調記録方式^{10)~12)}がある。前者はMD, HSディスクとして製品化されている。また後者は1987年に交換結合2層膜を用いた光変調オーバーライト (LIMDOW: Light Intensity Modulation Direct Overwrite) 記録膜¹⁰⁾が提案され、さらに1989年に初期化磁石を不要にした交換結合4層LIMDOW記録膜¹¹⁾が提案された。LIMDOW光磁気ディスクはコンピュータ用記録媒体として1995年に製品化された。

我々は、LIMDOW記録膜とFAD (Front Aperture Detection) 方式MSR膜¹⁾とをFig. 1に示すように情報を保持する層 (メモリー層) を介して接合することによって、オーバーライト機能と磁気超解像再生機能を一つのディスクで実現できることを検証し^{13), 14)}、その高密度記録再生の可能性を検討してきた¹⁵⁾。本稿では、LIMDOW-MSRディスクの動作温度設計について述べ、またランド/グルーブ記録方式^{16), 17)}を適用した場合の記録再生特性の一例を紹介し、さらにMSRとしてダブルマスクRAD (Rear Aperture Detection) 方式²⁾を適用した場合についても触れる。

2. LIMDOW-MSR膜の動作と動作温度設計

LIMDOWとMSRを組み合わせる場合、留意すべきポイントは、1) LIMDOW動作とMSR再生動作の干渉がな

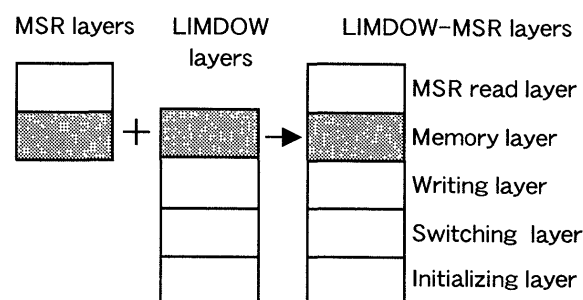


Fig. 1 Concept of combining MSR and LIMDOW.

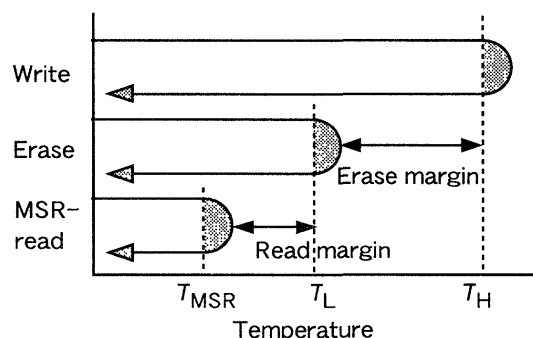


Fig. 2 Threshold temperatures during the writing, erasing, and MSR reading of a LIMDOW-MSR disk.

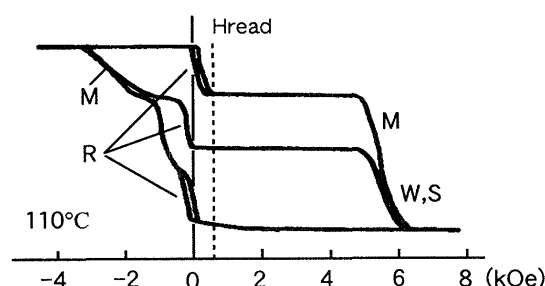


Fig. 3 Hall hysteresis loops of a LIMDOW-FAD disk at the MSR readout temperature. R, M, W, S denote readout, memory, writing, and switching layers, respectively. The initializing layer was not reversed within the swept field range.

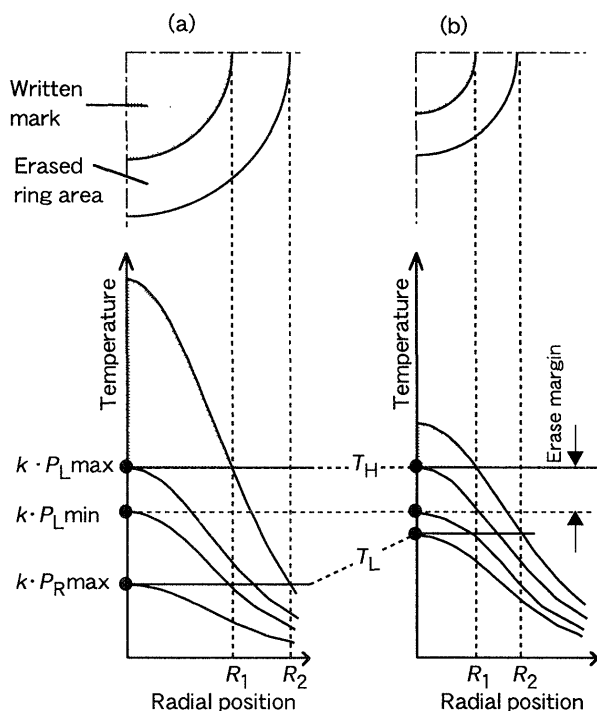


Fig. 4 Mark shapes and temperature profiles. The mark size in (b) is a half of that in (a).

いこと、2) 再生/消去パワーマージンが確保できること、3) 記録時に隣接トラックを消去してしまうこと(クロスイレース¹⁸⁾)なく狭トラックピッチ化できること、の3点である。以下、これらを満足させるための動作温度設計指針を述べる。

2.1 LIMDOW-MSR 膜の動作温度

Fig. 2 に LIMDOW-MSR 膜のオーバーライト、磁気超解像再生の動作温度の概念図を示す。記録、消去、再生の動作は、それぞれ記録しきい温度、消去しきい温度、再生しきい温度を超えることによって行われる。LIMDOW の動作温度としてはこれら以外に記録層の磁化方向が初期化層の方向に揃う初期化温度^{19), 20)}が存在する。しかし MSR との組み合わせにおいては再生時には記録層はすでに初期化された状態にあるので初期化温度と再生しきい温度との干渉は考えなくとも良い。一方、LIMDOW 消去と MSR 再生の干渉を防ぐことは再生温度を消去しきい温度以下にすることによって可能である。Fig. 3 にこのことを磁気特性上から検証したものと再生温度付近における LIMDOW-FAD 膜のホールヒステリシスループを示す¹⁴⁾。数百 Oe の再生磁界 H_{read} によって FAD 再生層(図中“R”)の磁化のみが反転し、その反転領域が MSR 再生におけるリアマスクとなる。このとき、メモリー層(図中“M”)の反転磁界は再生磁界に比べ十分大きいのでメモリー層に保持された情報を消去することなく MSR 再生が可能である。

2.2 動作温度とパワーマージン

Fig 4(a) に記録膜の温度分布と形成される記録マークの形状を示す。記録マークの消去を行うには記録マーク半径 R_1 の領域の記録膜温度を消去しきい温度 T_L 以上に昇温すればよいから P_{Lmin} (図中、 k は光パワーと媒体温度の比例定数とする²¹⁾) 以上の消去パワーのレーザーを、また消去中に記録が起こらないためには記録膜温度が記録しきい温度 T_H を超えない消去パワー P_{Lmax} 以下のレーザーを照射すればよい。つまり消去パワー P_L は P_{Lmin} から P_{Lmax} までのマージンを有する。また再生パワーの上限 P_{Rmax} は媒体最高到達温度が T_L となる再生パワーである。

LIMDOW-MSR においては再生温度が比較的高温であるため P_{Rmax} をなるべく高く設定し、かつ消去パワーマージンを確保することが必要である。このことは高密度記録において記録マークが小さくなるほど容易に達成できるようになる。Fig. 4(b) は記録マーク径が Fig. 4(a) の 1/2 になった場合を示しており、消去しきい温度 T_L を高くしても Fig. 4(a) と同じ消去パワーによって消去が可能である様子が表されている。すなわち消去パワーマージンを減少させることなく最大再生パワーを向上させることができるのである。温度がガウス分布に従うと仮定しマーク半径を $1/e$ 半径で正規化すると最大再生パワーは、

$$P_{Rmax} = P_{Lmin} \cdot \exp(R_1^2/k) \quad (1)$$

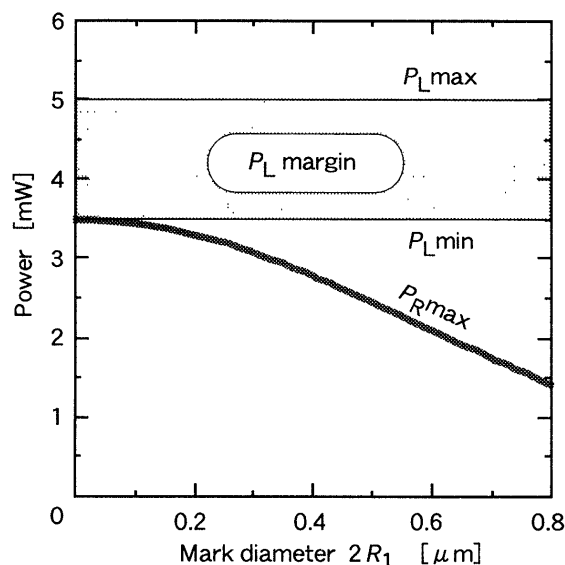


Fig. 5 Calculated power margins of the erase power P_L and maximum read power $P_{R\max}$.

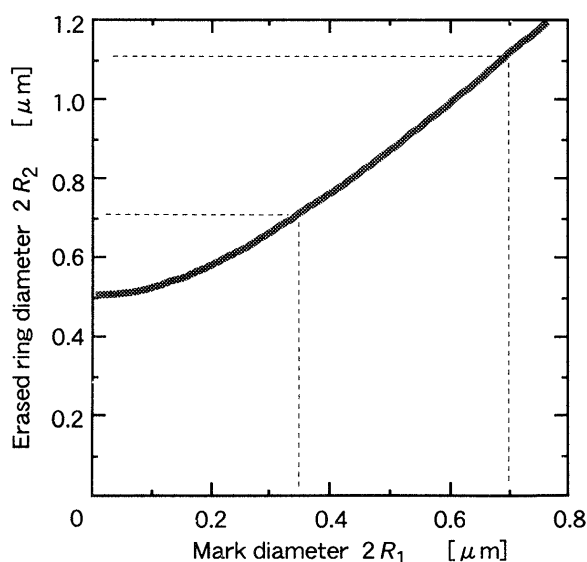


Fig. 6 Calculated mark diameter dependence of the diameter of the erased ring area.

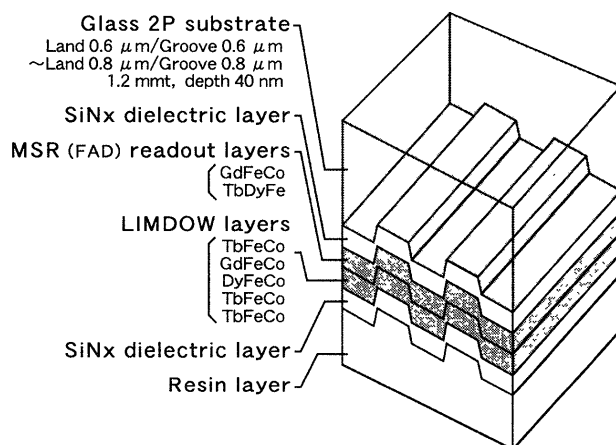


Fig. 7 Configuration of a LIMDOW-FAD disk sample.

で表される。Fig. 5 に消去パワーマージンが一定になるように消去しきい温度を設定したとき、記録マークの変化とともに最大再生パワーがどのように変化するかを計算した結果の一例を示す。記録マークが小さくなるとともに最大再生パワーが増大し、また最大再生パワーと消去パワー下限値との間の使わないパワー領域が低減できることが示されている。

2.3 動作温度と狭トラックピッチ化

Fig. 4 に示されているように記録マークの周縁には温度が記録しきい温度 T_H と消去しきい温度 T_L に挟まれた消去リング領域²²⁾が形成される。トラックピッチを狭めて高密度化を図る際には、この消去領域によって隣接トラックの情報が消去されないようにしなければならない。Fig. 4 の (a) と (b) を比較すると、記録マークが小さく消去しきい温度 T_L を高めた場合、 T_H と T_L の間隔が狭くなることによって消去リング領域の幅 ($R_2 - R_1$) が狭くなることが分かる。式 (1) と同様にガウス型温度分布を仮定するとマーク半径 R_1 と消去領域の外周の半径 R_2 の関係式が以下のように導かれる。

$$R_2^2 = 2R_1^2 + \ln(P_{L\max}/P_{L\min}) \quad (12)$$

Fig. 6 にガウス分布の半値全幅が $0.7 \mu\text{m}$ である場合の消去幅の計算結果を示す。この図からマーク径が $0.7 \mu\text{m}$ の場合、消去幅は約 $1.1 \mu\text{m}$ であるが、マーク径がその半分の $0.35 \mu\text{m}$ になると消去幅は約 $0.7 \mu\text{m}$ まで低減されることが分かる。

以上の結果から、マーク径が小さくなると、消去しきい温度を高く設計することにより、消去パワーマージンを犠牲にすることなく最大再生パワーを向上でき、また消去幅を狭くしてトラックピッチを狭めることができると言える。

3. ディスク構成と評価条件

FAD タイプの MSR 再生層と LIMDOW 記録膜を結合した LIMDOW-FAD ディスクを用いて、マーク長 $0.35 \mu\text{m}$ 、トラックピッチ $0.7 \mu\text{m}$ (面記録密度 3.5 Gbit/inch^2) における CNR、再生・消去のパワーマージン、およびトラックピッチを変化させたときのクロスイレーズの変化を評価した。Fig. 7 に LIMDOW-FAD ディスク試料の構成を示す。また同様の構成で、MSR 再生のための初期化磁石を不要としたダブルマスク RAD タイプの MSR 再生層⁴⁾を用いた LIMDOW-RAD ディスク試料も作成し、RAD 化によるクロストーク低減の効果、ダブルマスク化による分解能向上の効果を評価した。いずれの場合においても基板としてトラックピッチ (ランド幅、グループ幅) $0.6 \mu\text{m}$ から $0.8 \mu\text{m}$ 、グループ深さ 40 nm のガラス 2P ランド/グループ基板を用いた。

記録再生特性の評価には、波長 690 nm 、開口数 0.55 の光ヘッドを有する光磁気ディスク評価装置を用いた。

Table 1 Measurement conditions

Wavelength	690 nm
N.A.	0.55
Linear velocity (LV)	8.4–9.7 m/sec
Mark length (ML)	0.35 μm
Track pitch (T_p)	0.6–0.8 μm
Write pulse duty	30%
Hb	+250 Oe
Hread	+500 Oe (LIMDOW-RAD) -100 Oe (LIMDOW-FAD)

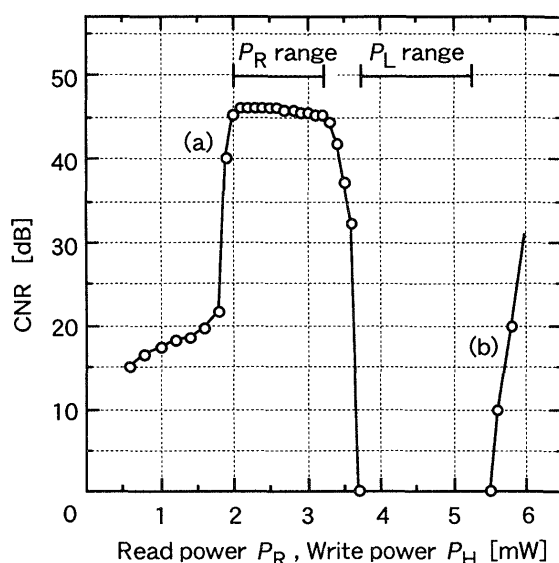


Fig. 8 (a) Read power dependence of CNR at $ML = 0.35 \mu\text{m}$, $T_p = 0.7 \mu\text{m}$, $P_H/P_L = 12.1/1 \text{ mW}$, $LV = 8.4 \text{ m/s}$. (b) Write power dependence of the CNR at 1 MHz, showing a threshold write power of 5.5 mW.

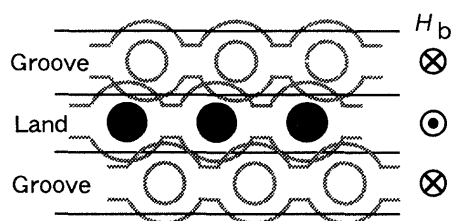


Fig. 9 Configuration for measurement of the cross-erase characteristics.

Table 1 に評価条件を示す。

4. LIMDOW-MSR ディスクの特性

4.1 再生・消去パワーマージン

Fig. 8(a) に LIMDOW-FAD ディスクの CNR の再生パワー依存性を示す。磁気超解像再生は再生パワー 1.8 mW 以上で起こり始め、また再生パワーが 3.7 mW 以上において完全な消去が行われている。CNR は 0.35 μm のマーク長に対し 45 dB 以上の実用レベルの値が得られ、その再生

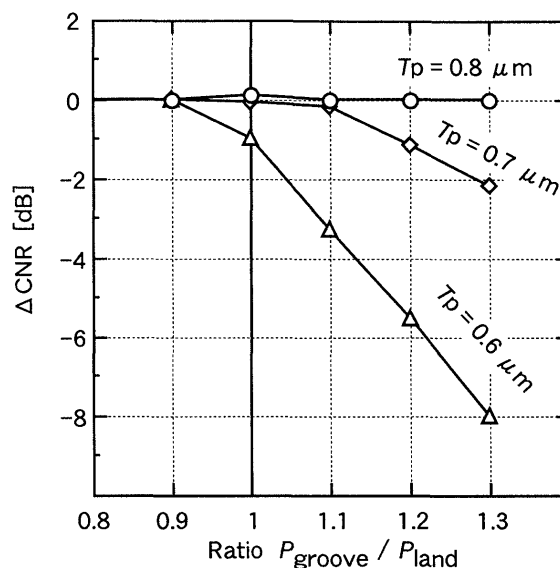


Fig. 10 Cross-erase characteristics of a LIMDOW-FAD disk. ΔCNR is the degradation of the CNR caused by cross-erase ($ML = 0.35 \mu\text{m}$, $LV = 8.4 \text{ m/s}$).

パワーの範囲は 2.0 mW から 3.2 mW でありマージンとして $\pm 23\%$ が得られている。

Fig. 8(b) は、DC 照射に近い長マークの記録パワー依存性であり、記録しきいパワーが 5.5 mW であることが示されている。したがって消去パワーの範囲は 3.7 mW 以上、5.5 mW 未満となりマージンとして $\pm 20\%$ が確保されている。以上からこのディスクは適正なしきい温度設定がなされていることが確認される。

4.2 クロスイレーズ

次に隣接トラック情報の信号を劣化させずに記録できるトラックピッチの限界を調べるためにトラックピッチを変化させてクロスイレーズを評価した。Fig. 9 に評価方法を説明する図を示す。まずランドトラックにマーク長 0.35 μm のモノトーン信号を最適パワー（最大 CNR を与える記録パワー）で記録して CNR を測定した。次に両側のグルーブトラックに各 1000 回、ランドトラックと同等のパルス波形のレーザー照射を行った。ただしこの際、レーザーパワーはランドトラックでの最適パワーを中心にして変化させた。またクロストークによって評価に支障が生じないように外部磁界方向は消去方向にしてマーク自体は形成されないようにした。その後、ランドトラックの CNR を再測定してその変化を調べた。マルチパルス記録方式^{21), 23)}によりすべての長さのマークの幅を最短マークの幅と同一にできる場合には、この評価方法のように最短マークのみを用いる評価方法でクロスイレーズを十分に評価できていると考えられる。

Fig. 10 にトラックピッチ 0.6 μm から 0.8 μm までの場合の LIMDOW-FAD ディスクのクロスイレーズ測定結果を示す。トラックピッチ 0.8 μm と 0.7 μm では、グルーブトラックへの記録パワーが最適パワーのそれぞれ 1.3 倍、

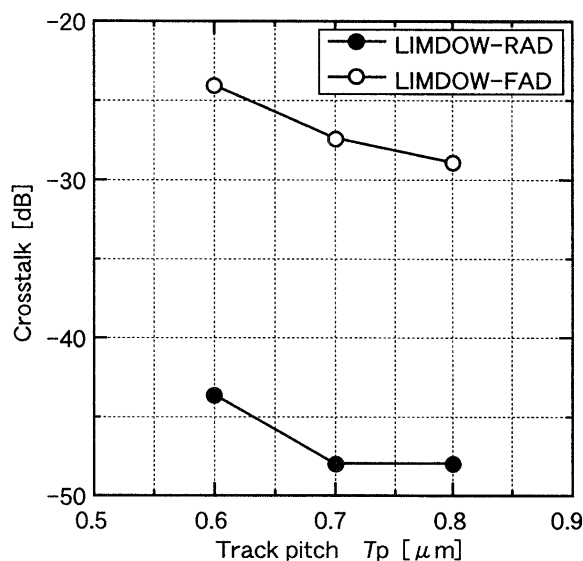


Fig. 11 Track pitch dependence of the crosstalk in a LIMDOW-RAD disk and a LIMDOW-FAD disk ($ML=0.35\ \mu\text{m}$, $LV=9.7\ \text{m/s}$).

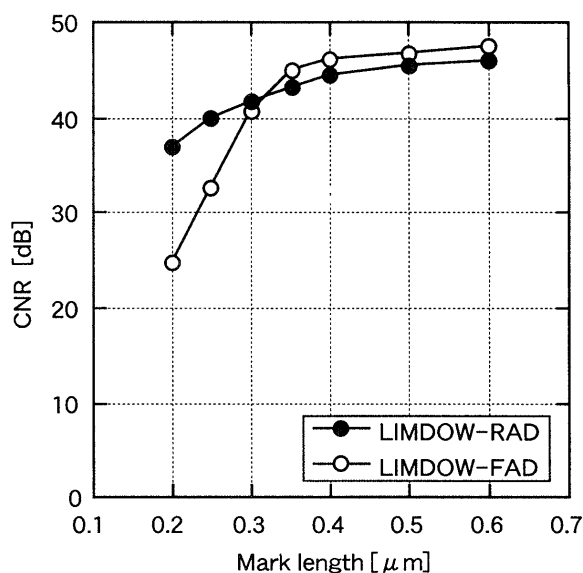


Fig. 12 Mark length dependence of the CNR in a LIMDOW-RAD disk and a LIMDOW-FAD disk ($T_p=0.7\ \mu\text{m}$, $LV=9.7\ \text{m/s}$).

1.1 倍までクロスイレズは生じていない。一方、トラックピッチ $0.6\ \mu\text{m}$ では、最適パワーにおいてもクロスイレズが生じている。したがって、この場合のトラックピッチの下限値は $0.7\ \mu\text{m}$ 前後であると言える。また以上はマーク長 $0.35\ \mu\text{m}$ の場合の結果であるが、2 章で述べたように、マーク長がこれより短くなれば、クロスイレズが低減されさらに狭トラックピッチ化が可能になると考えられる。また森田らによればグループが深くなるほどクロスイレズは低減される²⁴⁾。本評価で使用したグループ深さは $40\ \text{nm}$ と比較的浅く、深溝化することにより、さらなるクロスイレズ低減、狭トラックピッチ化が期待される。

4.3 ダブルマスク RAD 再生層の採用

前節までの結果から LIMDOW-FAD ディスクはマーク長 $0.35\ \mu\text{m}$ 、トラックピッチ $0.7\ \mu\text{m}$ 、面記録密度 $3.5\ \text{Gbit/inch}^2$ のポテンシャルを有することが分かった。以下ではさらなる高密度化を目指してダブルマスク RAD 再生層と LIMDOW 記録層を結合した LIMDOW-RAD ディスクについて最近の検討結果を紹介する。

Fig. 11 に LIMDOW-FAD ディスクと LIMDOW-RAD ディスクのクロストークのトラックピッチ依存性を比較した結果を示す。図中示したクロストークは、CNR が最大となる記録再生条件にて測定した値である。いずれのディスクにおいてもトラックピッチ減少とともにクロストークは増大するが、LIMDOW-RAD ディスクのクロストークは LIMDOW-FAD ディスクに比べて非常に低い値を示し、クロストーク信号はほとんど見られなかった。このことから RAD 再生層のフロント磁化マスクによる隣接トラック記録マークの遮蔽が良好に動作していると言える。

Fig. 12 に LIMDOW-FAD ディスクと LIMDOW-RAD ディスクの CNR のマーク長依存性を比較した結果を示す。LIMDOW-FAD ディスクではマーク長が $0.35\ \mu\text{m}$ 以下での CNR が急激に減少するのに対して LIMDOW-RAD ディスクにおいては CNR はマーク長 $0.2\ \mu\text{m}$ までなら減少した。このことはマスクが再生ビームの前後にできて磁気的なアパーチャが狭まり、空間分解能が向上するダブルマスク化の効果が顕著に現れているものと考えられる。

以上の結果から、LIMDOW-MSR ディスクにダブルマスク RAD 再生層を採用することによってトラック密度、線密度共にさらなる向上が期待される。

6. 結 び

他の情報記録方式と比較した場合、磁性層間に働く結合力を利用したさまざまな機能強化は光磁気記録方式のユニークな特質と思われる。光変調オーバーライトも磁気超解像再生もその特質を活用した方式であると言えよう。本稿では、さらにこの両者を交換結合した LIMDOW-MSR ディスクについて、その動作温度設計の基本的な考え方を述べた。特にマークサイズの微小化、トラックピッチの狭小化に対しては、消去しきい温度の設計が重要となることを示した。また高密度記録特性としては、ランド/グループ記録方式と組み合わせることで $3.5\ \text{Gbit/inch}^2$ 以上の面記録密度のポテンシャルを有することを示した。今後、さらなる高密度化を達成するには、レーザー波長、光学系の工夫による記録レーザースポットの微小化や、ビタビ復号など他の高密度化技術との適合性を検証していくことが課題となろう。

参考文献

- 1) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko, and K. Watanabe: Proc. SPIE 1499, Optical Data Storage Topical Meeting, p. 209 (Colorado Springs, 1991).
- 2) A. Fukumoto, S. Yoshimura, T. Udagawa, K. Aratani, M. Ohta, and M. Kaneko: Proc. SPIE 1499, Optical Data Storage Topical Meeting, p. 216 (Colorado Springs, 1991).
- 3) Y. Murakami, N. Iketani, A. Takahashi, K. Ohta, and T. Ishikawa: Proc. MORIS '92, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **17** (Suppl. SI), 201 (1993).
- 4) 松本幸治, 玉野井 健, 庄野敬二: 第 19 回日本応用磁気学会学術講演概要集, p. 316 (1995).
- 5) 篠田昌孝, 坂本哲洋, 中沖有克, 菅野正喜, 金子正彦: 日本応用磁気学会誌, **20**, 848 (1996).
- 6) 篠田昌孝, 中沖有克, 菅野正喜, 金子正彦: 電気学会研究会資料, MAG-96-201, 9 (1996).
- 7) K. Torazawa, S. Sumi, S. Yonezawa, N. Suzuki, Y. Tanaka, A. Takahashi, Y. Murakami, and N. Ohta: International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage, Technical Digest Series 12, OTuA1-2 (Maui, 1996).
- 8) 黄 義明, 石田新一郎, 内山洋一, 村田 靖, 小林 寛: 第 5 回日本応用磁気学会学術講演概要集, p. 3 (1981).
- 9) 田中富士雄, 田中信介, 今村修武: 電気学会研究会資料, MAG-86-95, 53 (1986).
- 10) 佐藤正聡, 斎藤 旬, 松本広行, 赤坂秀機: 昭 62 日本応用物理学会春季予稿集, 28p-ZL-3, 721 (1987).
- 11) 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, p. 192 (1989).
- 12) 堤 和彦: 日本応用磁気学会誌, **15**, 831 (1991).
- 13) 藤井善夫, 中木義幸, 徳永隆志, 堤 和彦: 第 16 回日本応用磁気学会学術講演概要集, p. 438 (1992).
- 14) Y. Fujii, Y. Nakaki, T. Tokunaga, and K. Tsutsumi: Proc. MORIS '92, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **17** (Suppl. SI), 167 (1993).
- 15) Y. Fujii and T. Tokunaga: International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage, Technical Digest Series 12, 269/OWD3-2 (Maui, 1996).
- 16) A. Fukumoto, S. Masuhara, and K. Aratani: Technical Digest Symp. Optical Memory '94, p. 41 (1994).
- 17) A. Fukumoto, S. Masuhara, and K. Aratani: Proc. SPIE, 2514, Optical Data Storage '95, p. 374 (1995).
- 18) H. Miyamoto, T. Toda, H. Ide, A. Saito, K. Andoo, T. Niihara, and M. Ojima: Proc. MORIS '92, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **17** (Suppl. SI), 179 (1993).
- 19) Y. Nakaki, Y. Fujii, T. Fukami, T. Tokunaga, K. Tsutsumi, and H. Shibata: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 1900 (1990).
- 20) Y. Fujii, T. Tokunaga, K. Tsutsumi, S. Suzuki, and K. Sato: Proc. MORIS '94, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **19** (Suppl. SI), 379 (1995).
- 21) J. Saito, S. Morita, S. Kurita, M. Doi, Y. Aoki, and H. Akasaka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, 5197 (1993).
- 22) T. Fukami, Y. Nakaki, T. Tokunaga, Y. Kawano, and K. Tsutsumi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 411 (1992).
- 23) T. Maeda, F. Kirino, T. Toda, H. Ide, S. Mita, and K. Shigematsu: Digest Intermag '93, DD-6 (1993).
- 24) S. Morita, M. Nishiyama, H. Konishi, H. Matsumoto, and T. Niwa: International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage, Technical Digest Series 12, 274/OWD5-1 (Maui, 1996).

(1996 年 12 月 24 日受理)



藤井善夫 ふじい よしお

昭 59 大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了, 同年 三菱電機株式会社入社, 現在に至る.

専門 磁性薄膜・光磁気記録材料



徳永隆志 とくなが たかし

昭 61 広島大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年 三菱電機株式会社入社, 現在に至る. 平 2 日本応用磁気学会論文賞受賞.

専門 磁性薄膜・光磁気記録材料