

多層型三次元光磁気メモリーの新展開

伊藤 彰 義

Recent Progress in Multi-Layer Three-Dimensional Magneto-Optical Memory

Akiyoshi ITOH

Recent progress in three-dimensional ultra high density magneto-optical recording technologies have been reviewed. It was realized as magnetic multi-valued (MMV) media and the multi-wavelength readout (MWR) method. To increase the signal-to-noise ratio (SNR) of the reproduced signal for the MMV media, MWR method has been applied. The experimental MWR results for the MMV media are reported and discussed. For the case of 2-recording layers read out by using 2-wavelengths, 21 Gb/in² has been successfully achieved. A new method has proposed which can read the information from the 2-recording layers only by using a single wavelength detecting magneto-optical rotation and ellipticity. Another method for achieving high density MO recording has also proposed as double-MAMMOS (multi-layered Magnetic AMplifying MO System) and successfully demonstrated the write and read capability with a recording density as high as 50 Gb/in² × 2 = 100 Gb/in².

Key words: magneto-optical memory, multi-valued recording, multi-wavelength readout, magnetic amplifying, optical disk

光ディスクは、磁気ディスクと異なり媒体可換という大きな特徴を備え、重要な情報を安全に保管できる高いセキュリティ性を備えている。なかでも光磁気 (MO) ディスクは、高い信頼性と無限な書き換え回数 (10⁷ 回まで実験検証済み) を誇ることから、外部記憶装置として大きく発展してきた。半導体レーザーディスク (LD) によるプロトタイプを世界に先駆けて発表して以来光磁気記録技術をリードしてきたわが国では、次世代の技術についての研究も盛んである。

高密度化には、面密度の増加と記録層多層化による三次元化がある。前者は、レーザーの短波長化およびレンズの高 NA (開口数) 化で光スポット径を小さくすることが基本である。しかし、回折現象による限界がある。この干渉限界を媒体の磁気特性により解決したのが、一連の磁気超解像 (magnetic super resolution; MSR)¹⁾ である。これを発展させ記録領域の微小化による信号強度の低減を劇的に

改善したのが磁区拡大再生方式 (magnetic amplifying MO system; MAMMOS) である。日立マクセルと三洋電機のグループ²⁾ による発明である。日本大学のグループ³⁾ は、波長多重再生により多層化記録膜の高信号対雑音比 (S/N 比) 再生法を実現した。これらを結集することで、100 Gb/in² を超える超高密度な光磁気記録の実現が現実的になっている。

本稿では、磁気と光の双方の長所を取り入れた光磁気記録の技術を、三次元化に関する話題を中心に解説する。従来から、三次元化は大別して、1) 記録層の媒体の厚さ方向への積層による方法、2) ポリウムホログラフィーの方法が考えられてきた。前者は基本的にレーザーの集光位置制御により記録再生層の選択が行われる。後者は従来とは異なり bit by bit 記録方式ではない。

これに対し本稿では、従来の bit by bit 記録法でありながらスポットの集光位置制御による記録層の選択の必要の

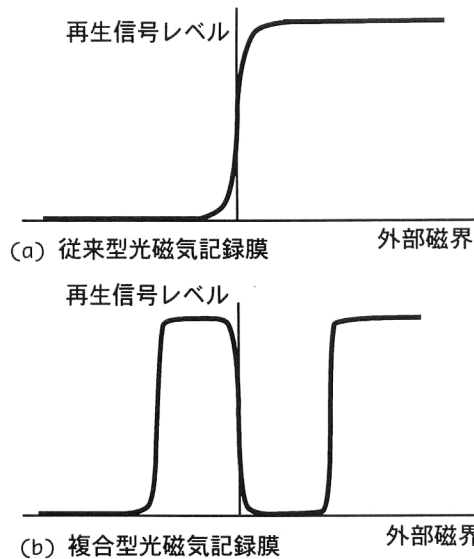


図1 従来型の光磁気記録膜 (a) と複合型光磁気記録膜 (b) の外部磁界に対する記録特性。

ない、新しい三次元化の方法である多層多値記録と波長多重再生法および MAMMOS の三次元化について述べる。

1. 光磁気記録とその特長

光磁気記録には記録層間の磁氣的結合を巧みに利用した高密度化法がある。層間の磁氣的結合には、「静磁気結合」と「交換結合」がある。前者は、磁気双極子間の磁界による結合である。後者の交換結合は、2つの原子磁気モーメント間に働く量子力学的効果で、2つの磁気モーメントが平行になるように働く。これらの結合と膜の温度上昇を利用して MSR や MAMMOS が実現した。このように光磁気記録では、層間の磁氣的相互作用を利用できることが他の光記録にはない大きな特長である。これを利用した光磁気記録の三次元化について述べる。

2. 多層多値光磁気記録

光磁気記録には、希土類と 3d 遷移金属のアモルファス合金膜、例えば TbFeCo が用いられる。これにレーザー光を照射し外部磁界を加えて記録する。外部磁界に対する記録状態は図 1 (a) (図では縦軸を再生出力の大きさと表した) のようになり、外部磁界を正とすると記録され、負とすると記録されない。ところが、日立マクセルの島崎、太田ら⁴⁾はこれを他の、例えば PtCo などの磁性膜と積層し層間の交換結合を利用し、図 1 (b) のように、正の小さな磁界では記録されず、負の磁界でも記録される膜とした。絶対値大の負の外部磁界で消去、絶対値小の負の磁界で記録、絶対値小の正の磁界で消去、絶対値大の正の磁界で記録というように、記録状態を外部磁界で制御できる。これ

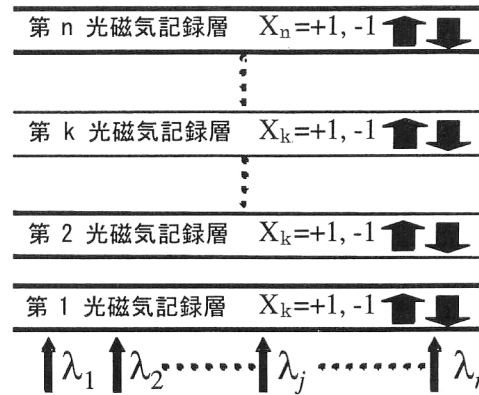


図2 記録層を n 層積層した記録媒体構成図。 n 種類の波長で再生。 $X_k=1$, $X_k=-1$ は第 k 層の上, 下向きの磁化状態を示す。

を通常の膜と積層し 2 層の記録状態を合わせて考えると、正負の外部磁界の大きさの制御により、4 通りの記録状態間を任意に遷移することができる。このように記録膜を 2 層にしても、中間の非磁性層を含んで全体の厚さは 200～300 nm 程度でありレンズの焦点深度内に収まる。すべての記録層が同一の焦点深度内にあり、焦点位置を変え各層をアクセスしなおす必要がないという大きな特長をもつ。外部磁界の制御のみで 2 層それぞれに同時に異なる状態を独立に記録できる画期的方法である。これにより多層記録の欠点が解決されるだけでなく、2 層同時に記録・再生するので、焦点面を可変する方式に比べ、データ転送速度も 2 倍になる。

3. 波長多重再生方式

多値記録は本質的に信号対雑音比 (S/N 比) が下がる。そこで、筆者らはこの欠点を克服する波長多重再生方式を提案した⁵⁾。この手法は、ある情報を複数の波長で再生し線形結合することで再生 S/N 比を向上する方式で、2 層 4 値記録の場合、理論上最大 12.5 dB だけ S/N 比を向上できる。

同一焦点深度内にある各磁性層を複数波長で再生した信号から各層の磁化状態を決定する。これを実現するためには、各波長での再生信号への各層の記録状態の寄与が層ごとに異なるようにする必要がある。例えば 2 つの記録層を波長 λ_1 , λ_2 で再生するとき、 λ_1 には 1 層目のみ、 λ_2 には 2 層目のみの信号が含まれるようにすれば、それぞれの波長で各層が独立に再生されることになる。

その実現のため、各磁性層の磁気光学効果と多層構成の光干渉による波長依存性を利用する。磁気記録層を図 2 に示すように n 層積層し、ある波長 λ_j での積層膜全体の干渉効果による反射率を R_j とする。第 k 層目の磁化状態を

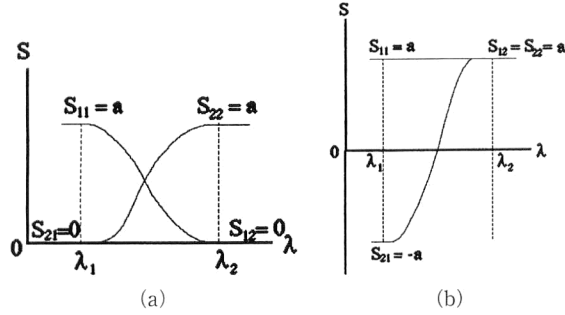


図3 2層4値記録2波長再生のS/Nの極大条件. (a) $\text{SNR}_{\text{conv}} + 9.5 \text{ dB}$, (b) $\text{SNR}_{\text{conv}} + 12.5 \text{ dB}$

X_k とし、上向きの磁化状態を $X_k = +1$ に、下向きを $X_k = -1$ に対応させる。 X_k の符号を反転すると、積層膜全体の干渉効果で決定される反射光の偏光状態が変わる。

多層膜での干渉の結果をひとつの媒質とみなし複素屈折率 N^* を決定する。その方法にはいくつか考えられるが、ここでは仮想光学定数法⁶⁾によった。 $X_k = \pm 1$ に対応した波長 λ_j での多層膜全体の干渉効果の結果によるカー回転角 θ_j 、カー楕円率 η_j を求め、 $\theta_j(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_n)$ 、 $\eta_j(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_n)$ と表す。磁性層が2層の場合、任意の X_1, X_2 に対して次の式(1)~(4)で $\theta_{ij} (i=1, 2)$ を定義する。

$$\theta_{1j} = \frac{\theta_j(+1, X_2) - \theta_j(-1, X_2)}{2} \quad (1)$$

$$\theta_{2j} = \frac{\theta_j(X_1, +1) - \theta_j(X_1, -1)}{2} \quad (2)$$

$$\eta_{1j} = \frac{\eta_j(+1, X_2) - \eta_j(-1, X_2)}{2} \quad (3)$$

$$\eta_{2j} = \frac{\eta_j(X_1, +1) - \eta_j(X_1, -1)}{2} \quad (4)$$

これらの定義から、 $\theta_j(X_1, X_2)$ 、 $\eta_j(X_1, X_2)$ は次の式(5)、(6)のように表される。

$$\theta_j(X_1, X_2) = \theta_{1j} \cdot X_1 + \theta_{2j} \cdot X_2 \quad (5)$$

$$\eta_j(X_1, X_2) = \eta_{1j} \cdot X_1 + \eta_{2j} \cdot X_2 \quad (6)$$

波長 λ_j での再生信号 D_j は、その波長での媒体全体としての反射率 R_j およびその波長での磁気光学効果 θ_j 、 η_j に比例する。磁気光学回転角 θ_j に関する信号は、

$$D_j = R_j \cdot \theta_j(X_1, X_2) \quad (7)$$

と表せる。これに式(5)を代入して、

$$D_j = R_j \cdot \theta_{1j} \cdot X_1 + R_j \cdot \theta_{2j} \cdot X_2 \quad (8)$$

となる。このように2記録層の場合は、再生信号 D_j は2つの磁性層の磁化状態 X_1, X_2 の線形結合で表される。

ここで、次の式(9)のように S_{ij} を定義する。

$$S_{ij} = R_j \cdot \theta_{ij} \quad (9)$$

これにより、2記録層を2つの波長で再生したときの信号 D_1, D_2 は、

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{12} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

と表される。各 S_{ij} は膜構成と各層の光学、磁気光学定数で決まりあらかじめ求めることができるから、各層の磁化状態すなわち記録情報は、次のようにして求められる。

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{12} & S_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

一方、磁性層が3層以上の場合には、任意の X_i について、次式(12)が一義的に決定できない。

$$2\theta_{ij} = \theta_j(X_1, X_2, \dots, X_i = +1, \dots, X_n) - \theta_j(X_1, X_2, \dots, X_i = -1, \dots, X_n) \quad (12)$$

すなわち、ある層の磁化が変化 ($X_i = +1, X_i = -1$) したとき、式(12)の θ_{ij} は他の X_k の値が異なると異なる値となる。しかしながら、通常の光磁気記録に用いる TbFeCo 等の光学定数を想定すると、 $X_k (k \neq i)$ の組み合わせによる θ_{ij} への影響は0.1%以下であることがわかった。したがって、上述の式(12)を3層以上の磁性層の一般の場合に拡張し、近似的に式(13)のように線形結合として扱うことができる。

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} & \dots & S_{n1} \\ S_{12} & S_{22} & \dots & S_{n2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ S_{1n} & S_{2n} & \dots & S_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (13)$$

このように n 個の記録層の多層膜が同一焦点深度内にあり、再生信号にすべての記録層の磁気光学効果が含まれていても、 n 種類の異なる波長で再生し、 S 行列の逆行列を用いて磁化状態 X を決定できる。 S 行列は媒体構成から事前に決まる。 X を決定する演算は線形演算なので、 n 種類の再生信号 D を係数回路と加減算回路で演算するだけであり、簡単である。以上の関係は、楕円率 η についても同様に成立する。

4. 2記録層の2波長多重再生

2層4値記録を2波長で再生するときは、図3に示す2つの条件を満足する場合に再生信号のS/Nが極大となる。図3(a)の場合、4値記録を従来法に比べ9.5 dBのS/N増加、すなわち単一層を単一波長で再生するときと同一のS/Nで再生できる。これはそれぞれの波長でそれぞれの層を再生することに相当する。一方、図3(b)の場合は、 λ_1 では各層の信号が逆位相、 λ_2 では同位相であり、加減算により信号はさらに3 dBだけ大きく、高いS/Nで再生できる。

488 nm (Ar レーザー) と 442 nm (He-Cd レーザー) および NA=0.7 の色収差補正レンズを用いた青色領域2波長再生装置により、2層4値記録2波長再生の実験を行っ

表1 3記録層2波長再生媒体の例.

波長	光学性能指数(度)	第1層	第2層	第3層
488 nm	$R\theta$	-0.0547	0.0137	0.0378
488 nm	$R\eta$	-0.0168	0.0439	0.0058
442 nm	$R\sqrt{\theta^2 + \eta^2}$	0.0266	0.0479	0.0438

た. この媒体の各波長での性能は一般の光磁気記録媒体での要求事項 $R\theta$ 積 0.03 以上を満足している. これにより, マーク長 300 nm での 21 Gb/in² の密度相当の記録再生に成功した^{7,8)}.

5. 2記録層の1波長再生

短波長領域かつ高 NA のもとで複数の記録層を波長多重再生により独立に再生できることを実証した. しかしながら, 複数の光源を使用しなければならないことは, 光学系を複雑にする. そこで, 筆者らは, 単一の波長のみで2層の記録を独立に分離して再生する新しい方法を提案した⁹⁾.

磁気光学効果には, 磁気光学回転角 θ と楕円率 η の2つのパラメーターがあり, これを独立に測定することが可能である. これを利用すれば, 単一波長のみで2つの記録層の情報を再生することができる. 波長 515 nm の Ar レーザーによる磁気光学回転角 θ と楕円率 η 検出光学系により, これを実証した⁹⁾.

6. 3記録層の2波長再生

上記の1波長2層再生を利用し3層の場合でも2波長再生が可能である. 一般に, 途中の記録層における光吸収により, 光源側から遠い場所にある層からの信号は小さくなる. そこで, 光源に近い2つの層を一方の波長の θ と η でそれぞれ再生し, 遠い1層はもうひとつの波長の θ と η の両方の成分を用いて信号の減衰を補う方法を検討した¹⁰⁾. 干渉計算による媒体最適化を行い, 各層からの信号の積が最も大きくなるように探索し, 各層の $R\theta$ 積 (あるいは $R\eta$, $R\sqrt{\theta^2 + \eta^2}$) がそれぞれ 0.03 以上を満足する構造を得ることができた (表1).

7. MAMMOS の多層化の検討

今まで述べてきた光磁気記録の特長を生かし, 超高密度記録への挑戦が行われている. 経済産業省・NEDO の産業技術応用開発プロジェクト「ナノメータ制御光ディスクシステムの研究開発」の中の「磁気応答3次元光メモリ技術」における筆者をリーダーとする三洋電機, シャープ, 日立マクセル, 富士通の共同研究である.

MAMMOS では, 記録層上に非磁性層を介して拡大再生

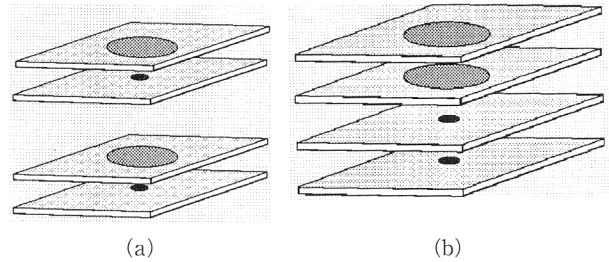


図4 2記録層の磁区拡大を実現するいくつかの方法. (a) 記録層と拡大層を2組積層する. (b) 拡大再生層を光の入射方向に寄せる.

層を設け, 再生層に転写後レーザービーム径いっぱいまで磁区を拡大し, 大きな振幅の信号を得る. その後, 次の情報が到達する前に磁区を外部磁界を反転して消去する.

MAMMOS では赤色レーザーと NA 0.6 程度の従来の光学系によって, トラック幅 400 nm, 最小ビット長 20 nm の高密度記録が可能であることが示されているが, 青色レーザー (413 nm) と高 NA (0.9) の極微小スポット (径約 400 nm) のもとでは媒体の温度勾配が大きくなる. それに伴う磁区の収縮力 (磁区周囲の遷移領域 (磁壁) の長さを短くすることで全磁壁エネルギーを減少する方向に働く力) も従来の約3倍と見積もられること, また, 基板による収差変動を避けることのできる媒体側光入射方式のディスクでは熱伝導の様子が大幅に異なることから, 磁区拡大現象が生じるか否かが心配された. これを媒体の磁気特性および熱特性を変化することで克服した. この極微小スポットのもとで磁区拡大現象を世界に先駆けて実現し, 100 nm の直径の記録再生に成功した. これは 64 Gb/in² に相当し, 光記録で世界一の密度である¹¹⁾.

この MAMMOS の短波長, 高 NA での成功と, 波長多重再生での多層化媒体構成の経験を生かして, MAMMOS の2層化に挑戦した. まず, 図4(a) のように, 従来の MAMMOS 構成 (記録層+拡大層) を単純に2層化する方法を考えた. これは, 下の拡大層を再生するとき, 上の拡大層, 記録層を通過せねばならないので光損失が大きい. そこで, 次の方法として, 図4(b) のように再生層を光入射方向に片寄せる.

記録層の記録磁区からの漏れ磁界により再生層に転写する際の, 記録層と再生層の対応関係のモードは, 図5のように2通り考えられる. 図5(a) のモードは一見合理的なように思えるが, 転写距離 (記録層と転写拡大層間の間隔) がほとんど同じとなるから, 下部記録層→下の拡大層への転写条件と上部記録層→上部拡大層への転写条件が近いものになる. このとき, 上部記録層→上部拡大層への転写条件は, 同時に上部記録層→下部拡大層への転写を伴ってし

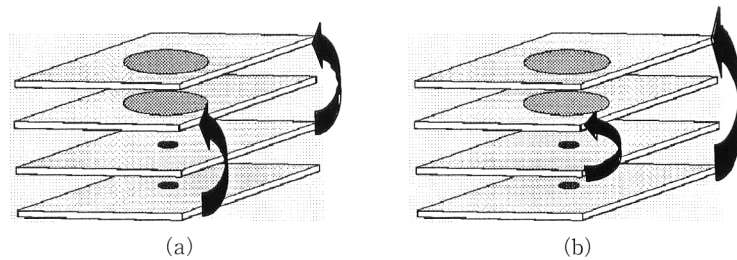


図5 MAMMOSの2層化(double MAMMOS)における転写様式。(a) 下部記録層→下の拡大層, 上部記録層→上部拡大層。(b) 上部記録層→下の拡大層, 下部記録層→上部拡大層。

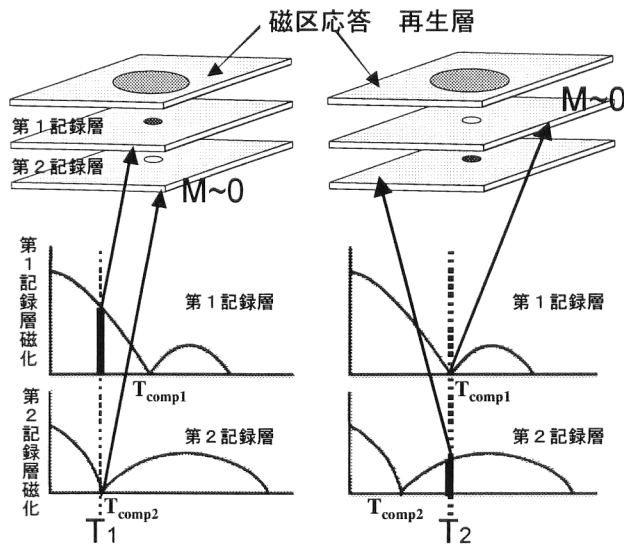


図6 2層磁区拡大再生法の原理。フェリ磁性体の磁化の温度特性を利用し、再生光パワーの制御により2つの記録層からの信号を分離して転写拡大再生する。 T_1 :低温(低再生パワー)は第2記録層の補償温度 T_{comp2} (第2記録層の磁化=0)で第1記録層を転写拡大再生する。 T_2 :高温(高再生パワー)は第1記録層の補償温度 T_{comp1} (第1記録層の磁化=0)で第2記録層を転写拡大再生する。

まうこととなる。これに対し、図5(b)は、上部の記録層からの漏れ磁界は記録層周辺のみで大きく、距離が大きくなるにつれ急速に減衰するように、また下部記録層からの漏れ磁界はその距離に対する変化率が小さく遠方まで届くようにすることで、(a)よりは設計が容易にできる。この条件を満足するには、上部記録層の膜厚を小さく、下部記録層の膜厚を大きくすればよい。

この設計思想のもと、磁界変調記録による三日月状磁区の場合についてのシミュレーションを行った。上部記録層からある距離のところそれぞれの層からの漏れ磁界の大きさが逆転することから、その点の上下に2つの転写拡大層を設置すれば、第1および第2記録層からそれぞれ分離して転写拡大が起こる。しかし、それぞれの転写拡大層における第1、第2記録層からの漏れ磁界の差は大きくはなく、分離転写拡大再生マージンが狭いことが、記録層の膜

厚、間隔、飽和磁化、記録磁区の大きさを種々変化した多くのシミュレーションから予測された。

8. 再生パワー変化によるMAMMOSの多層化

ここで、拡大層を1層とし、記録層からの漏れ磁界をフェリ磁性体の温度特性を利用して再生光パワーで制御する新しい方法を提案した¹²⁾。光磁気記録に用いられるフェリ磁性体は複数の副格子の磁化が反平行に結合し、それぞれの温度特性が異なる。したがって、ある温度(補償温度)で見かけの磁化がゼロとなるようにできる。これを用いて次のようにする。

図6に示すように、温度 T_1 は下の第2記録層の媒体の補償温度で、この層からの漏れ磁界はなく上の第1記録層からの漏れ磁界で拡大再生が生じる。温度 T_2 では、逆に第1記録層からの漏れ磁界はなく、第2記録層からの漏れ磁界で拡大再生が生じる。すなわち、低再生パワーで第1記録層を、高パワーで第2記録層を再生する。

これにより磁区応答する漏れ磁界を制御するため、2つの記録層(第1、第2記録層)それぞれの補償温度を実験的に調整する必要がある。そこで、ダミー層を用いて磁区応答に適した再生パワーを実験的に調べた。第1記録層の漏れ磁界で磁区応答するパワーを知るために、第2記録層に代わり熱伝導特性等は同じになる非磁性ダミー層を用い、磁区応答現象が生じるパワーを測定した。第2記録層についても、第1記録層をダミー層にして同様の実験をした。これらから、第1記録層の補償温度を 140°C 、第2記録層の補償温度を 45°C とした媒体を用いて、磁区応答三次元記録を評価した。波長 413 nm 、NA 0.7 の光学系で、図7のように、1層あたり 50 Gb/in^2 相当の2層MAMMOS方式の実証に成功した。

このように、磁区拡大再生方式の2層化に成功し、 $50\text{ Gb/in}^2 \times 2 = 100\text{ Gb/in}^2$ の実証に成功した。 100 Gb/in^2 は、5円玉の大きさに約 5 GB の記録が可能となり、現在のDVDと同じ映画が記録再生できる。このような夢のディスクの実現も近い。

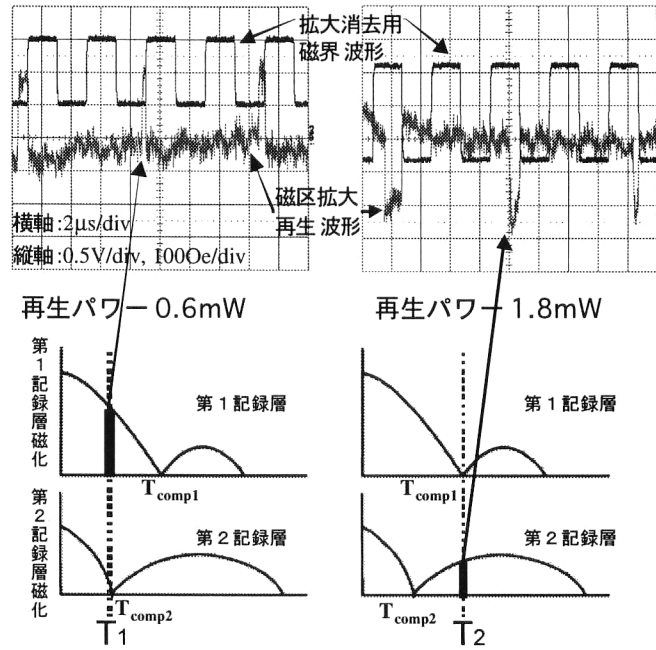


図7 2記録層1再生層の三次元化MAMMOSの実験結果.

本稿の一部は、「磁区応答3次元光メモリ技術」研究グループの協力によるところ大であり、サプリーダーの太田憲雄(日立マクセル)、内山隆(富士通)をはじめ、栗野博之、今井奨(日立マクセル)、内原可治、中田正治(三洋電機)、高橋明、三枝理伸、池谷直泰(シャープ)、手塚耕一(富士通)および中川活二(日本大学)の皆様に深く感謝する。本稿の一部は、経済産業省の資金をもとに、(財)光産業技術振興協会が受託したNEDOの平成10年度新規プロジェクト「ナノメータ制御光ディスクシステムの研究開発」に関するものである。

文献

- 1) A. Fukumoto, S. Yoshimura, T. Udagawa, K. Aratani, M. Ohta and M. Kaneko: *Proc. Data Storage Topical Meeting, TuB4* (Colorado Springs, 1991) p. 209.
- 2) 栗野博之, 白井 寛, 太田憲雄, 山口 淳, 鷺見 聡, 虎沢研示: 第20回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 22pE-4 (1996) p. 313.
- 3) 中川活二, 伊藤彰義: 第19回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 25aE-6 (1995) p. 319.
- 4) K. Shimazaki, M. Yoshihiro, O. Ishizaki, S. Ohnuki and N. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **19**, Suppl. S1 (1995) 429-430.
- 5) 中川活二, 伊藤彰義: 電気学会マグネティクス研究会, *Mag-95-200* (1995) 59-64.
- 6) K. Ohta, A. Takahashi, T. Deguchi, S. Kobayashi and H. Yamaoka: *SPIE*, **382** (1983) 252.
- 7) 田中 護, 鈴木昌吾, 横田修一, 中川活二, 伊藤彰義: 第25回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 27pF-6 (2001) p. 362.
- 8) NEDO フォーラム 2001 (第21回事業報告会) (2001) p. 217. 次のURLよりダウンロード可能 <http://www.nedo.go.jp/introducing/forum/2001.pdf>
- 9) A. Itoh, K. Nakagawa, K. Shimazaki, M. Yoshihiro and N. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, Suppl. S1 (1999) 221-224.
- 10) 中川活二, 伊藤彰義, 荒滝新菜: 第23回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 5pD-7 (1999) p. 87.
- 11) 伊藤彰義, 太田憲雄, 内山 隆, 高橋 明, 三枝理伸, 池谷直泰, 内原可治, 中田正宏, 手塚耕一, 栗野博之, 今井 奨, 中川活二: 第24回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 14aC-4 (2000) p. 332.
- 12) 中川活二, 田中 護, 横田修一, 伊藤彰義: 第26回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 17pF-11 (2002) p. 126.

(2003年4月21日受理)