磁界変調記録と磁気超解像を用いた高密度光磁気ディスク

Realization of a High Density Magneto-Optical Disk through the Use of Magnetically Induced Super-Resolution with Magnetic Field Modulation Recording

篠田昌孝・坂本哲洋・中沖有克・菅野正喜・金子正彦

ソニー(株)中央研究所, 東京都品川区北品川 6-7-35 (〒141)

M. Shinoda, T. Sakamoto, A. Nakaoki, M. Kanno, and M. Kaneko

Research Center, Sony Corporation, 6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan

Magnetically induced super-resolution (MSR) is one of the methods to realize high-density magneto-optical recording. We investigated MSR by front aperture detection (FAD) with magnetic field modulation recording. The structure of the FAD disk was optimized, taking account of the balance between thermomagnetic recording characteristics and readout characteristics on MSR. We realized a $\pm 25\%$ recording power tolerance for a high areal density of 2.8 Gbit/inch², on the optimized FAD disk.

Key words: magneto-optical disk, magnetically induced super-resolution (MSR), front aperture detection (FAD), magnetic field modulation recording, thermal structure

1. はじめに

磁気超解像 (Magnetically induced super-resolution 以下, 本文中では MSR と呼ぶ) とは光磁気記録における高密度化技術の一つであり, 1991 年に提案^{1), 2)}されたものである。この技術はレーザ波長の短波長化や信号処理に頼らずとも媒体のみで高密度化が図られることが期待されるため, 多くの研究グループにより様々な検討がなされてきた^{3)~5)}。本論文では MSR 媒体を用い, 磁界変調記録と MSR を組み合わせる際の媒体構造の最適化方法と, その最適化された媒体構造を用いてビット長 0.27 μm , トラックピッチ 0.85 μm (2.8 Gbit/inch²) の高密度 MSR 光磁気ディスクの検討を行った結果について述べる。

2. MSR の再生方式

MSR の基本的な原理は再生レーザ光による媒体の温度上昇と, それに伴う媒体の磁気的交換結合力の変化を利用した微小記録マークの再生技術である。Fig. 1 にレーザ波長 $\lambda = 780$ nm, 690 nm と対物レンズの開口数 $NA = 0.55$ をもつ光学系における通常再生と MSR の再生出力の空間周波数依存性を示す⁶⁾。通常再生出力はそれぞれの波長に対し $2NA/\lambda$ で規格化すると, とともに回折理論に基づくカットオフ周波数 $2NA/\lambda$ でゼロになることがわかる。一方, 同じ光学系でも MSR により再生を行った場合にはレーザスポット内の一部分がマスクされることにより検出部分 (アパーチャ) が小さくなり, 実効的にレーザスポットを絞ったのと同じ効果が得られるためにカットオフ周波数は高域まで伸びることがわかる。これまでにこのレーザスポット内のマスクとアパーチャの位置関係によって

Fig. 1 Comparison of the relative carrier level MSR and conventional detection.

様々な MSR が報告されている。

Fig. 2 から Fig. 4 に MSR の特徴的な三つの再生方式を示す。Fig. 2 はレーザスポット内の前方部分にアパーチャが存在する FAD (Front Aperture Detection) 方式¹⁾, Fig. 3 は後方部分にアパーチャが存在する RAD (Rear Aperture Detection) 方式²⁾, Fig. 4 は中央部分にアパーチャが存在する CAD (Center Aperture Detection) 方式³⁾と呼ばれるものである。これら MSR 媒体は通常, 情報の記録を担う記録層, 記録層と再生層の磁気的な交換力制御のための中間層, そして再生の際にマスクとアパーチャとを生じさせる再生層とで構成される。マスク部分は外部からの再生磁界などにより再生層の磁化を膜面に垂直な一方, または面内方向に揃えることにより常に記録層の磁化情報とは無関係な状態 (マスク状態) を作り出し, アパーチャ部分は再生層に働く交換力の作用により記録層の磁化

Fig. 2 States of the magnetization during readout for the case of front aperture detection.

Fig. 3 States of the magnetization during readout for the case of rear aperture detection.

Fig. 4 States of the magnetization during readout for the case of center aperture detection.

情報を転写することにより回折限界以下の微小な記録マークを読み出すことを可能にしている。また RAD や CAD 再生ではレーザスポット内の高温部分のみがアパーチャとなり記録マークを転写し再生することから、通常の再生に比べて隣接トラックからのクロストークを抑制することが可能で、したがってトラック幅方向にも高密度化を達成することが可能である。

一方、磁界変調記録は記録マークのエッジが光強度ではなく、磁界のスイッチングで決定される方式である。基本的に記録マークが光強度の変動の影響を受けにくく、記録パワーマージンが広くとれる優位性がある。特に高密度化のためのマーク長記録（エッジ検出）との相性が良く、オーバーライトも可能であるので、ミニディスクや $\phi 88$ mm データ用にすでに実用化されている。我々は磁界変調記録と MSR の組み合わせにより次世代用のさらに高密度な光磁気ディスクシステムを実現したいと考えている。MSR メディアとして製膜が容易で我々の中で実績が最も豊富な FAD を取り上げ、磁界変調記録用に媒体構造の最適化を行い高密度記録の検討を行った。

3. FAD ディスクの構成と評価方法

FAD 方式の媒体構造を Fig. 5 に示す。FAD ディスクの構成は基板上に干渉層 (71 nm)、FAD 層 (95 nm) を膜厚一定で製膜後、SiN スペース層（以下、SiN 層とする）、Al 良熱伝導材料層（以下、Al とする）の膜厚を実験により変化させ製膜した。FAD 層の膜構成は再生層をキュリー温度が 350°C の GdFeCo（膜厚 36 nm）、中間層を同 160°C の TbFe (9 nm)、記録層を同 260°C の TbFeCo (50 nm) とした。ディスク最表面には保護層として紫外線硬化樹脂をスピスコートにより製膜してある。基板には媒体構造の最適化の検討用にトラックピッチ $1.05\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Layer structure of the FAD disk.

のポリカーボネート基板（ランド記録）、狭トラック化の検討用にトラックピッチ $0.85\ \mu\text{m}$ のワイドグループガラス 2P 基板（グループ記録）を使用した。

ディスクの記録再生特性の測定はレーザ波長: $690\ \text{nm}$, NA : 0.55 の評価機により行った。実験方法は、線速 $5.0\ \text{m/s}$, パルスアシスト磁界変調記録, (1, 7) RLL マーク長記録によりランダムデータのジッタ評価を行った。特にことわりのない限りデータビット長は $0.27\ \mu\text{m/bit}$ とした。記録、再生磁界はともに $24\ \text{kA/m}$ である。なお、本論文におけるジッタ値とは RF 信号をイコライズ処理した後 PLL 回路を通し、クロックに対する RF 信号の立ち上がり/立ち下がり時のタイミングのずれの標準偏差として定義する。また記録パワーマージンはジッタ分布をガウシアンと仮定したときビットエラーレート 6×10^{-5} に対応するジッタ値 12.5% 以下の範囲と定義した。

4. 結果と考察

4.1 磁界変調記録 FAD ディスクの構造の最適化

FAD ディスクの磁界変調記録における Al 層の影響を調べるために、SiN 層の厚さを $30\ \text{nm}$ に固定し、Al 層の厚さを変化させた。トラックピッチ $1.05\ \mu\text{m}$ の基板上に Fig. 5 の構造のディスクを作製し、通常の再生でクロストークなしでの記録特性を Fig. 6 に示す（この場合だけ、データビット長は $0.33\ \mu\text{m/bit}$ としてある）。

Fig. 6 より Al 層を厚くするに従い記録感度は低下するが、ジッタの最小値は改善し結果的に記録パワーマージンは向上する。これは Al 層をつけることで磁性層の蓄熱効果が弱まり、

Fig. 6 Recording power dependence of the jitter measured from FAD disks with different thicknesses of Al in conventional readout without crosstalk.

Fig. 7 Recording power dependence of the jitter measured from FAD disks with different thicknesses of Al in MSR readout without crosstalk.

Fig. 8 Distorted waveform of the 1.44- μ m mark in MSR readout with a 40-nm-thick Al layer.

磁界変調記録した際に特徴的に見られる磁区形状のいわゆる「矢羽」部分が短くなり、その結果ジッタが減少したものと考えられる⁷⁾。

次に同じディスクの MSR による評価結果を Fig. 7 に示す。ジッタ値は Al 層を厚くするに従い悪化し記録パワーマージンは減少した。これはランダムパターンに含まれる長い記録マークが Fig. 8 のように Al 層を厚くするに従い歪んでしまうためである。我々はこれを MSR 時におけるアパーチャの形状が最適な位置からずれてしまったためと考え、媒体構造の熱的な設計を記録のみならず再生からも考慮し最適化することとした。

再生レーザー光は磁性層が厚いためそれ以降を透過せず、SiN 層と Al 層は記録再生時の媒体の熱応答性のみに影響を与えるため、光ディスク熱解析シミュレーション⁸⁾により SiN 層厚および Al 層厚を変えた場合の媒体の温度分布を計算した。シミュレーションにおけるディスク回転速度は実験と同じ線速 5 m/s とした。再生時のディスク移動方向の温度分布を示したものが Fig. 9, Fig. 11 である。Fig. 9 は SiN 層厚を 30 nm に固定して Al 層厚を変えた場合、Fig. 11 は Al 層厚を 30 nm に固定し、SiN 層厚を変えた場合の結果である。なお再生レーザーパワーは媒体の最高到達温度が各構造で同じになるように設定した。

Fig. 10 には Fig. 9 における上昇温度 150°C 以上の領域がマ

Fig. 9 Temperature profiles of four disks with different Al layer thicknesses.

Fig. 10 150°C contour lines for four different FAD disks.

Fig. 11 Temperature profiles of four disks with different SiN layer thicknesses.

スク部分となると仮定した場合のスポット内でのマスク領域を示した。この結果から SiN 層厚は媒体面上での温度勾配を変化させ、Al 層厚はさらにレーザスポット中心と媒体温度のピークとの相対位置を変化させることがわかった。

したがって、MSR において媒体に Al 層を付けることは、マスク部分がレーザスポットの中心に近づくアパーチャの割合が減るために解像度の向上につながる一方、レーザスポット内の強度分布が近似的にガウシアンであり、マスク部分がスポット中心に寄りすぎると光強度が最も強い中心部分が再生信号に寄与しなくなるため、結果的には S/N の低下を招くものと考えられる。また SiN 層厚を薄くすることは、媒体面上の温度勾配を緩やかにし、温度むらが存在した場合のマスク面積の変動要

Fig. 12 Al layer thickness dependence of the bottom jitter and the recording power margin with a 30-nm-thick SiN layer.

Fig. 13 SiN layer thickness dependence of the bottom jitter and the recording power margin with a 30-nm-thick Al layer.

因になるだけでなく、温度勾配が急峻なディスクに比べてアパーチャ部分での再生温度が相対的に高くなりカー回転角の減少を生じ、これも結果的に S/N の低下を招くものと考えられる。

我々はこのシミュレーション結果を下に最適な媒体構造を調べるため、SiN 層厚を 30, 55, 80, 100, 120 nm, Al 層厚を 0, 10, 20, 30, 40 nm とそれぞれ組み合わせた FAD ディスクを作製し、その MSR における記録特性を調べた。

Fig. 12 に SiN 層厚を 30 nm に固定し、Al 層厚を変化させた場合の記録特性を示す。SiN 層厚が 30 nm と薄い場合には Al 層厚の増加に伴う再生信号の劣化を抑えることができず、記録パワーマージン、ジッタとも急激に悪化してしまう。Al なしの場合は再生特性が良好となり、ジッタ最小値 8%，記録パワーマージン $\pm 30\%$ が得られている。

Fig. 13 に Al 層厚が 30 nm で SiN 層厚を変化させたときの MSR 時の記録特性を示す。この場合、SiN 層の膜厚の増加に伴って記録パワーマージンは増加し、ジッタの最小値も小さくなる。これは SiN 層が薄いときは温度分布が緩慢なため再生特性が良好ではないが、SiN 層を厚くしたことで改善されたものと考えられる。

以上のように本実験の媒体の構造では Al 層をつけないものが最も良好な特性を示し、Al 層を積層する場合は SiN 層を厚くつけることにより特性改善が可能であることがわかった。こ

Fig. 14 Recording power dependence of the jitter for an FAD disk without Al, an FAD disk with 120-nm SiN and 30-nm Al, and an FAD disk with 30-nm SiN and Al.

Fig. 15 Read-out power dependence of the jitter for an FAD disk without Al and for an FAD disk with 120-nm SiN and 30-nm Al.

Fig. 16 Eye pattern of an FAD disk without an Al layer after equalization ($1.05 \mu\text{m}/\text{track}$, $0.27 \mu\text{m}/\text{bit}$).

れらのジッタの記録パワー依存性を Fig. 14 に示す。比較として SiN 層厚 30 nm, Al 層厚 30 nm のディスクのデータも付加した。SiN 層厚 30 nm, Al 層厚 0 nm の組み合わせの場合、ジッタが最小となる記録パワーの範囲が狭いにもかかわらず、ジッタの最小値が小さいため結果的に記録パワーマージンは大きく取れており、再生特性の良好な構造になっていると考えられる。SiN 層厚 120 nm, Al 層厚 30 nm の組み合わせの場合、ジッタが最小となる記録パワーの範囲が広いがジッタの最小値が前者と比較して大きいために、結果的に記録パワーマージン

は前者と同程度かやや悪くなっている。したがって、これは記録特性の良好な構造になっていると考えられる。

次に上記二つの構造のディスクについてそれぞれジッタが最良となる記録パワーで記録を行ったときのジッタの再生パワー依存性を Fig. 15 に示す。SiN (120 nm)/Al (30 nm) の方が感度が低下しているが中心再生パワーで規格化する再生パワーマージンはどちらの構造も同じで $\pm 18\%$ 程度である。

以上の結果により、ビット長 $0.27\text{ }\mu\text{m}$ 、トラックピッチ $1.05\text{ }\mu\text{m}$ での磁界変調記録と FAD 再生における媒体の最適な構造は、Al をつけない構造か、Al をつけても SiN 層を厚くして S/N の低下を抑える構造が最適であることがわかった。参考のために Al をつけない構造の FAD ディスクに対してランダム信号を等化処理後再生したアイパターンを Fig. 16 に示す。アイが開いており、 $0.27\text{ }\mu\text{m}/\text{bit}$ が再生可能であることがわかる。

4.2 狭トラックピッチ化の検討

次に我々はこの最適化された媒体構造を用いて高密度化の検討を行うため、トラックピッチ $0.85\text{ }\mu\text{m}$ のガラス 2P 基板（グループ記録）に上記の最適化された構造の FAD ディスクを作製した。基板のグループ深さは 36, 70, 96 nm と変化させた 3 種類のものを用意した。このディスクにそれぞれビット長が $0.27\text{ }\mu\text{m}$ のランダムデータを記録し、そのジッタ値、記録パワーマージン、クロストーク、クロスライトについて検討を行った。なお媒体の FAD 層以降の膜構成は SiN (120 nm)/Al (30 nm) である。（Al 層をつけた膜構成としたのは、媒体の保護や繰り返し耐久性を考慮したためである。）

まず、Fig. 17 に両隣接トラックにマークが記録されていない状態（クロストークが影響しない状態）での中央のトラックのジッタの記録パワー依存性を示す。同じトラックピッチの基板を用いてもジッタの最小値は基板のグループ深さ（d）に依存し、クロストークの影響がない状態では基板のグループ深さは浅いものが好ましいことがわかった。これは通常の MO 媒体と同様にグループ深さによる光学的な干渉効果が現れたものと考えられる。

ところで、狭トラック化したときに大きな問題のなるのが再生の際に隣接トラック信号が漏れ込んでくるクロストークと、記録の際に隣接トラックに記録を行ってしまうクロスライトの

Fig. 17 Recording power dependence of the jitter without crosstalk and crosswrite for FAD disks with different groove depths.

Fig. 18 Recording power dependence of the jitter with crosstalk and crosswrite for FAD disks with different groove depths.

問題である。そこで次に我々は以下の二つの測定によりそれらの影響について検討を行った。

（測定 1）クロストーク、クロスライトの影響

まずマークが記録されていない中央のトラックにジッタが最小値となる記録パワーで記録を行う。次にその両隣接トラックに 7 mW の記録パワーでマークを記録し、その際の中央トラックのジッタの変化を測定する。以下、順次両隣接トラックに記録パワーを増加させながら記録を行い、中央のトラックのジッタの劣化測定を行った。その結果を Fig. 18 に示す。ジッタの劣化の変化は基板のグループ深さが浅いものほど影響を受けやすく、そのためクロストーク、クロスライトがない状態での最適なグループ深さとは逆に基板のグループ深さが浅いものほど記録パワーマージンは狭くなることがわかった。

したがって、MSR 媒体においても通常の MO 媒体と同様⁹⁾に狭トラック化する際の基板のグループ深さは、単にジッタの最良値によってのみで決定されるのではなく、クロストーク、クロスライトの影響を考慮した最適な深さを選択することが重要である。なお、この方法では両隣接トラックにマークを記録するため、中央トラックのジッタの劣化がクロストークによるものか、クロスライトによるものかは分離することはできない。

（測定 2）クロスライトの影響

次に、Fig. 18 で示したジッタの劣化がクロストーク、クロスライトどちらの影響によるものか調べるために以下の測定によりクロスライトだけの影響の検討を行った。まず測定 1 と同様にマークが記録されていない中央のトラックにジッタが最良値となるパワーで記録を行う。次にその両隣接トラックに 7 mW の消去パワーで一方に消去を行い、そのときの中央のトラックのジッタの変化を測定する。以下、順次両隣接トラックに消去パワーを増加させながら消去を行っていき、中央のトラックのジッタの劣化測定を行った。この測定方法は両隣接トラックからのマーク信号の漏れ込みがないので、クロスライトの影響のみを評価できる。その結果を Fig. 19 に示す。図のようにトラックピッチ $0.85\text{ }\mu\text{m}$ においてはクロスライトによるジッタの劣化はほとんど生じず、Fig. 18 に示したジッタの劣化はクロストークによるものであることがわかった。

Fig. 19 Recording power dependence of the jitter with crosswrite for FAD disks with different groove depths.

以上の結果からクロストーク、クロスライトを考慮したトラックピッチ $0.85\ \mu\text{m}$ における基板の最適なグルーブ深さは $70\ \text{nm}$ であることがわかった。

次にこのディスクを使ってオーバーライトも含めた総合的なジッタの記録特性の評価を行った。その結果を Fig. 20 に示す。図中の 1 track write とはクロストークがない状態でのジッタの記録パワー依存性を示している。overwrite とは両隣接トラックにそのジッタ値が 12.5% を超える上限のパワー ($13.2\ \text{mW}$) で記録しておき、中央トラックに同じ $13.2\ \text{mW}$ から順にパワーを減少させながらオーバーライト記録した時のジッタの記録パワー依存性を示している。crosstalk とは中央トラックにジッタ値が 12.5% を超える下限のパワー ($8.0\ \text{mW}$) で記録しておき、その両隣接トラックに同じ $8.0\ \text{mW}$ から順にパワーを増加させながら記録した時の中央トラックのジッタの変化を示している。

まず 1 track write であるが、ジッタが記録パワー $8\ \text{mW}$ で非常に急峻に立ち下がることがわかる。ことことはこの記録パワーに対してマークが急激に形成されたものと考えられる。したがって、逆に記録パワーを減少させながらオーバーライトした際にも $8\ \text{mW}$ までは良好に記録マークが形成されるため、1 track write と同様に広いオーバーライト記録マージンが得られたものと考えられる。また overwrite, crosstalk でのジッタ

Fig. 20 Recording power dependence of the jitter without crosstalk (1 track write), and with overwrite and crosstalk for FAD disks with a 70-nm groove depth.

の最小値が 1 track write に比べて 1.5% 程度上昇しているのは主にクロストークの影響であると考えられる。

以上これらの測定から実際のシステムに近い状態での記録パワーマージンを評価すると、ジッタ 12.5% でのこれら各記録パワーマージンからトレランスとして $\pm 25\%$ 確保することができることが確認された。

5. 結 論

我々は MSR (FAD) と磁界変調記録による高密度光磁気ディスクの検討を行った。

その結果、

(1) FAD ディスクを用いて磁界変調記録を行う場合には、その記録特性のみならず再生に関しても最適な媒体構造があることを明らかにした。

(2) 再生に関する熱の応答性はスペーサ層 (SiN 層) と良熱伝導材料層 (Al 層) が担っており、その最適な媒体構造は Al 層をつけない構造で、Al 層をつけても SiN 層を厚くつけることで改善が可能であることがわかった。

(3) この最適な媒体構造をもつ FAD ディスクを用いてトラックピッチ $0.85\ \mu\text{m}$ 、ピット長 $0.27\ \mu\text{m}$ ($2.8\ \text{Gbit/inch}^2$) における密度での記録パワーマージンは基板のグルーブ深さを最適に選択してやることにより $\pm 25\%$ を達成できた。

(4) この密度でのジッタの劣化原因は主にクロストークによるもので、これは基板のグルーブ深さにより低減することが可能であることがわかった。

謝 辞 本論文をまとめるに当たり研究を支えていただいたソニー(株)中央研究所大木部長、様々な仕様の基板を作製していただいた同、増原氏、内藤氏、および関係各位に感謝いたします。

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. 209 (Colorado Springs, 1991).
- 3) Y. Murakami, N. Iketani, A. Takahashi, K. Ohta, and T. Ishikawa: Proc. MORIS '92, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 17(Suppl. S1), 201 (1993).
- 4) N. Nishimura, T. Hiroki, and T. Okada: Proc. MORIS '94, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 19(Suppl. S1), 417 (1995).
- 5) 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 (日本応用磁気学会, 東京, 1995).
- 6) H. Owa, M. Kanno, and S. Tanaka: Proc. SPIE 2338, Optical Data Storage, p. 296 (Dana Point, 1994).
- 7) H. Miyamoto, T. Niihara, H. Sukeda, M. Takahashi, T. Nakao, M. Ojima, and N. Ohta: *J. Appl. Phys.*, 66, 6138 (1989).
- 8) O. W. Shih: *J. Appl. Phys.*, 75, 4382 (1994).
- 9) A. Fukumoto, S. Masuhara, and K. Aratani: Dig. Symp. Optical Memory, p. 41 (Tokyo, 1994).

1996 年 2 月 9 日受理, 1996 年 5 月 16 日採録