

磁壁移動検出方式による光磁気ディスクの高密度化

Realization of a High-Density Magneto-Optical Disk through the Use of Domain Wall Displacement Detection

白鳥 力 キヤノン(株)製品技術研究センター

T. Shiratori, Products Technology Research Center, Canon Inc.

The domain wall displacement detection (DWDD) method is a new magneto-optical readout method that utilizes the domain wall displacement caused by the temperature gradient. It allows high-density signal patterns to be read out irrespective of the resolution limit of the readout optical system.

This paper reviews the basic mechanism and the dynamic properties of this method. A clear readout waveform was obtained and a flat signal amplitude dependence on the mark length was maintained even for a domain length of $0.1 \mu\text{m}$.

The ghost signal, which was the main problem within this method, was suppressed by modifying the recording medium. As a result, a wide jitter margin could be obtained for a random signal with a linear density of $0.1 \mu\text{m}/\text{bit}$.

An approach to reducing the track pitch in this method is also described.

Key words: magneto-optical recording, domain wall, wall energy, domain wall displacement, exchange-coupling, nucleation, interface wall, resolution

1. はじめに

近年、光ディスクメモリの高密度化技術は日進月歩の進展を呈しており、DVD サイズのディスク片面で 15 GB 程度の記録容量実現はもはや当たり前のことのように言われるようになってきている。これは青色半導体レーザーの実用化が視野に入ってきたことによる影響が大きい。

しかし、動画像のデジタル化ならびに圧縮符号化技術の急速な進展に伴う動画情報の増大を考慮すると、光ディスクメモリに対する高密度化への要求は今後ますます加速していくと考えられる。光学系の高分解能化技術の進展を座して待っていたのでは、この要求に十分に対応していくことは困難であろう。

記録層として磁性膜を用いる光磁気ディスクメモリにおいては、光学系の分解能によって制約される記録密度の限界を、磁性膜の多様な物性を利用して克服するさまざまな方法が、これまでに提案されてきている^{1)~3)}。

磁壁移動検出方式 (DWDD: Domain Wall Displace-

ment Detection) は、温度勾配による磁壁移動現象という磁性膜のユニークな性質を利用した全く新しい再生方式である⁴⁾。この方式においては、一定の閾値温度の等温線が記録パターンを弁別していくので、線記録密度方向には原理的に再生上の分解能の限界がなくなり、光学系の分解能による束縛から完全に解放される。

磁壁移動検出方式によれば、現行の波長 680 nm あるいは 780 nm 程度の光学系を用いても、DVD サイズ片面 15 GB 程度の記録容量を実現できる。もちろん光学系を高分解能化してトラック密度方向にも高密度化すればさらなる大容量化が可能であり、原理的な可能性を述べればきりがなくなる。今後の急速な高密度化・大容量化へのニーズに対しても十分に対応していくことが可能と考えられる。

本稿においては、磁壁移動検出方式の動作原理を解説し、基本動作確認結果、実用化する上での問題点とその解決策などについて概要を述べる。

2. 磁壁移動検出方式の動作原理

Fig. 1 は磁壁移動検出方式の動作原理を示している。Fig. 1(a) に示したように、記録媒体は、小さな磁壁抗磁力を呈する移動層と、相対的に低いキュリー温度 T_c を有するスイッチング層と、大きな磁壁抗磁力を呈するメモリ層からなる交換結合 3 層膜で構成される。

記録膜面上を再生用のレーザービームを利用して局部的に加熱すると、Fig. 1(b) に示したような温度分布が形成され、これに伴って、磁壁エネルギー密度の分布が Fig. 1(c) に示したように形成される。磁壁エネルギー密度は一般的に温度が上昇するほど低下するので、ピーク温度の位置で磁壁エネルギー密度が最も低くなるような分布になる。

この結果、磁壁をエネルギー密度の低い高温側へ移動させようとする磁壁駆動力が Fig. 1(d) に示したように発生する⁵⁾。

媒体温度がスイッチング層のキュリー温度 T_c よりも低い場所では、各磁性層は互いに交換結合しているため、前述の温度勾配による磁壁駆動力が作用しても、メモリ層の大きな磁壁抗磁力に阻止されて磁壁移動は起こらない。ところが、媒体温度が T_c よりも高い場所では移動層とメモ

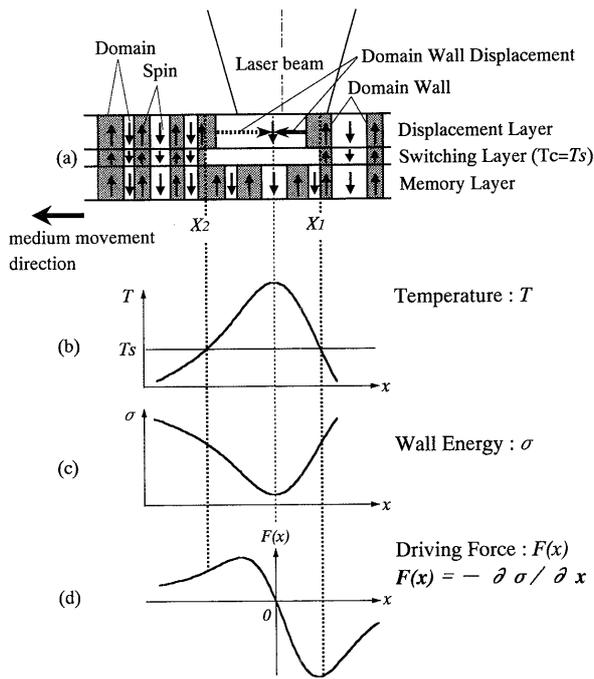


Fig. 1 DWDD mechanism.

り層との間の交換結合が切断されるため、磁壁抗磁力の小さな移動層中の磁壁は、温度勾配による磁壁駆動力で磁壁移動可能になる。このため、媒体の走査に伴って、磁壁が温度 T_s の位置を越えて結合切断領域に侵入した瞬間に、移動層中の磁壁の高温側への磁壁移動が起こる。

記録膜中に信号に対応した間隔で形成されている磁壁が、媒体の走査に伴って温度 T_s の位置を通過するたびに、移動層内で磁壁移動が発生する。媒体を一定速度で走査すると、記録されている磁壁の空間的間隔に対応した時間間隔で、この磁壁移動が発生することになる。したがって、磁壁移動の発生を検知することにより記録信号を再生することができる。磁壁移動の発生は、再生用のレーザービームにより、磁壁移動領域の磁化反転に伴う偏光面の変化として、従来の光磁気光学系で検知することができる。

信号振幅は、磁壁移動距離で決まり、記録されている磁壁間の距離すなわち磁区長には依存しない。また、再生スポットではなく、温度 T_s の等温線が記録パターンを弁別していくことになるので、光学系の分解能とは無関係に信号を再生することができるのである。

以上が磁壁移動検出方式の動作原理である。ただし、実際に信号を再生するためには、以下の二つの問題点について対策を取っておく必要がある。

第一の問題点は、上記のような加熱領域の前方からの磁壁移動のほかに、Fig. 1(a) 中に破線矢印で示されているように、加熱領域後方からも磁壁移動が発生し、これが再生用のレーザービームで検出されてしまうということである。この問題については、後で述べるように、再生磁界の印加⁶⁾や記録膜の工夫⁷⁾によって解決することができる。

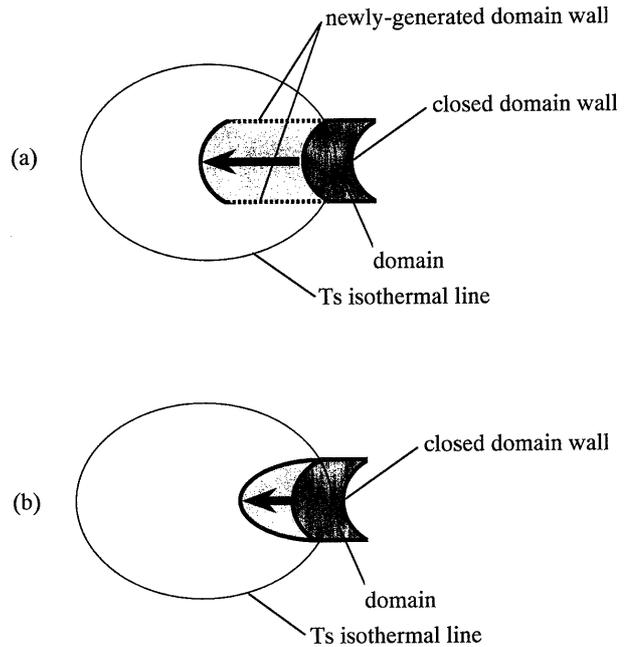


Fig. 2 Displacement of a closed domain wall.

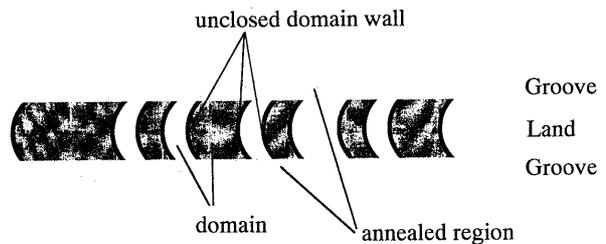


Fig. 3 Unclosed domain walls.

第二の問題点は、通常の磁壁は磁区の周囲に閉じた状態で形成されており、磁区の前端と後端とにそれぞれ独立した磁壁が存在しているものではないということである。

磁壁が閉じている状態で前端部分の磁壁が温度 T_s 以上の結合切断領域に侵入して、エネルギー密度の低い高温側に移動したとすると、Fig. 2(a) のように側部に新たな磁壁が生成されることになり、逆に余計なエネルギーを蓄えてしまうことになる。したがって、実際には例えば Fig. 2(b) のように、全体としてのエネルギーが最小になるような適当な形状に磁壁が変形することになる。これでは良好な再生信号が得られない。

この問題に対して、生産性やランド/グループ記録への適用を考慮した対応策については後述するが、以下の実験では、グループ部の磁性膜を高出力のレーザービームでアニール処理して、磁壁が形成されないような状態に変質させて対処している。このように処理した媒体のランド上に幅いっぱい磁区を記録すると、Fig. 3 に示したように、磁区の前端と後端とに独立した磁壁を形成することができる。実際には、アニール処理した部分は面内磁化膜になっていると考えられ、ランドの両側に面内から垂直にスピンの配向が遷移する磁壁が形成されているとも考えられる。し

かしその場合でも、このランドの両側の磁壁がランド上の磁壁の移動に伴って生成・消滅することはないので、エネルギー的には側部に磁壁が存在しない場合と等価である。

3. 実験結果

実験に用いた記録媒体の代表的な膜構成を Fig. 4 に示す。基板としては、板厚 1.2 mm, トラックピッチ $1.1 \mu\text{m}$ の標準的なポリカーボネイト基板を用いている。メモリ層のキュリー温度は 290°C , スイッチング層のキュリー温度は 160°C , 移動層のキュリー温度は 250°C 程度である。各磁性層の組成は、再生温度となるスイッチング層のキュリー温度近傍の温度範囲において飽和磁化が極力小さくなるように、鉄族元素と希土類元素との組成比を調整してある。これにより、再生時の磁壁の挙動に及ぼす浮遊磁界の影響が抑制され、温度勾配による磁壁移動動作が安定化する。

3.1 基本動作確認結果

この光磁気ディスクの動特性を、波長 680 nm , $NA 0.55$ の光学系を有する通常の光磁気ディスク評価装置により確認した。記録は DC レーザー照射磁界変調方式で行った。磁気ヘッドの変調周波数の制約上、ディスク線速度は 1.5 m/s とした。測定に先立って、グループ上に 10 mW 程度のレーザーを照射してアニール処理した。

磁区長 $0.3 \mu\text{m}$ の孤立磁区および連続磁区パターンを記録して、再生パワー 1.6 mW で再生したときの再生波形を、それぞれ Fig. 5(a) および (b) に示す。

適当な強度の再生パワーを照射すると、再生スポット下に T_s 以上の温度に加熱された領域が形成され、閾値温度 T_s の等温線上からのピーク温度部に向けて磁壁移動が起こる。この磁壁移動を検出して、明らかに通常の再生波形とは異なる急峻な信号レベルの変化が起こっているのが Fig. 5 の波形からわかる。

Fig. 5(a) の波形の (1) で示した信号レベルの急峻な変化は、磁区前端部の磁壁が結合切断領域に侵入した瞬間にピーク温度部に向けて磁壁移動したのを検出したものであり、(2) は、磁区後端部の磁壁が結合切断領域に侵入した瞬間に磁壁移動したのを検出したものである。

これに対して、(3) は、メモリ層中の磁区前端部が結合切断領域後方の再結合領域に侵入したときに移動層に再転写されて形成された磁壁が再生スポット後方から磁壁移動したのを検出したものであり、(4) は、磁区後端部が再結合領域に侵入したときに形成された磁壁が再生スポット後方から磁壁移動したのを検出したものである。

再生スポットが媒体に対して相対的に移動しているので、磁壁移動の終着点となる温度分布のピークは、再生スポットの中心より若干後方に偏った位置に形成されている。このため前方からの磁壁移動は、ガウシアン強度分布をもつ再生スポットの中心付近で検出されるのに対し、

UV resin overcoat		
Protective Layer	SiN	50 nm
Memory Layer	TbFeCoCr	80 nm
Switching Layer	TbFeCr	10 nm
Displacement Layer	GdFeCoCr	30 nm
Enhance Layer	SiN	90 nm
Polycarbonate substrate		1.2 mm

Fig. 4 Layer structure of the medium.

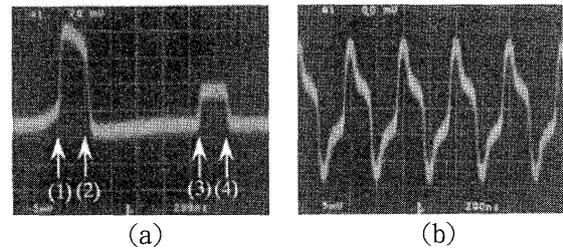


Fig. 5 Readout waveforms for (a) isolated and (b) continuous patterns with a domain length of $0.3 \mu\text{m}$.

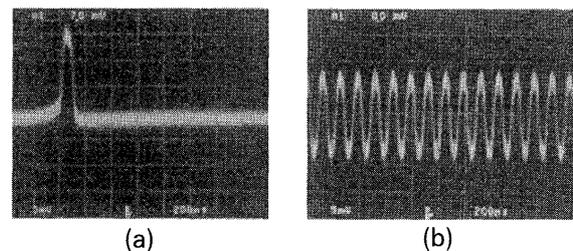


Fig. 6 Readout waveforms for (a) isolated and (b) continuous patterns with a domain length of $0.1 \mu\text{m}$.

後方からの磁壁移動は再生スポットの中心から外れた部分で検出される。この結果、(1) および (2) で示した信号レベルの変化量の方が (3) および (4) で示した信号レベルの変化量よりも大きくなっている。

このように、前方からの磁壁移動による信号に、後方からの磁壁移動による信号がゴースト信号として重畳されるため、連続信号を再生すると、Fig. 5(b) のように 4 値の信号レベルを有する波形が現れる。このような重畳が生じると実効的な信号振幅が両者の差になってしまい、信号再生上問題である。しかし、以下に述べるように磁区長が短い場合にはゴースト信号が出なくなる。

Fig. 6(a) および (b) は、磁区長 $0.1 \mu\text{m}$ の孤立磁区および連続磁区パターンを再生パワー 1.6 mW で再生したときの再生波形である。この再生波形には前述のような重畳信号は見られない。

また、Fig. 7 にキャリア、ノイズ、および CNR の周波数依存性を示す。この図で、周波数 3 MHz 以下の領域では、キャリアレベルの周期的な変動が見られる。これは、対応する磁区長 $0.25 \mu\text{m}$ 以上の領域で、ゴースト信号が発生し

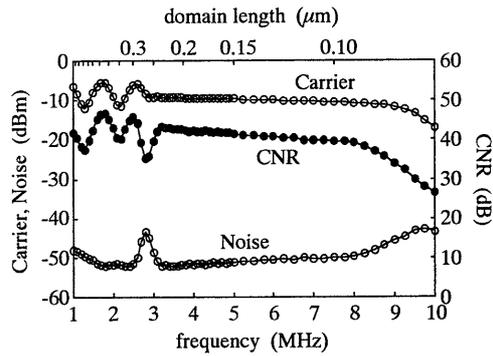


Fig. 7 Frequency dependencies of the carrier level, noise level, and CNR.

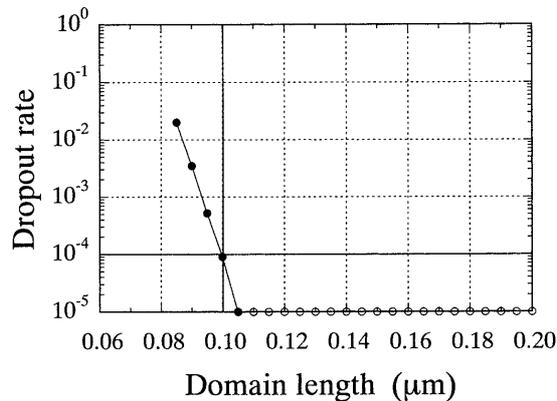


Fig. 8 Domain length dependence of the dropout rate.

ていることを示している。ゴースト信号は、媒体が結合切断領域を通過するのに要する時間に対応した一定の遅延時間をもって発生するので、信号周波数に伴って同相で重畳される場合と逆相で重畳される場合とが交互に現れ、キャリアレベルの周期的な変動が起こるのである。逆に、磁区長 $0.25 \mu\text{m}$ 以下の領域では、キャリアレベルがフラットであり、ゴースト信号が発生していないことを示している。

このように磁区長が短くなるとゴースト信号が発生しなくなる理由については後述する。

磁壁移動検出方式は、原理的に信号振幅が磁区長に依存しない。Fig. 7を見ると、磁区長 $0.1 \mu\text{m}$ 以下になるとキャリアが低下しはじめているが、これはFig. 8に示したように信号欠落が生じはじめることに起因したものであり、信号振幅は $0.1 \mu\text{m}$ 以下に至っても一定である。

磁区長 $0.1 \mu\text{m}$ 以下で信号欠落が生じる原因については、磁気力顕微鏡による磁区観察の結果などから、記録状態の不良に起因していることが確認されている。特にランド上のグループに近い部分において、前後の磁壁の端部同士がつながってしまっている状態がしばしば観察される。この部分は、グループをアニールしたときの影響で磁気特性がある程度劣化していると考えられるので、レーザーアニール以外の手段でトラック間の分断を行えば、磁区長 $0.1 \mu\text{m}$ 以下でも信号欠落はかなりのレベルまで抑制でき

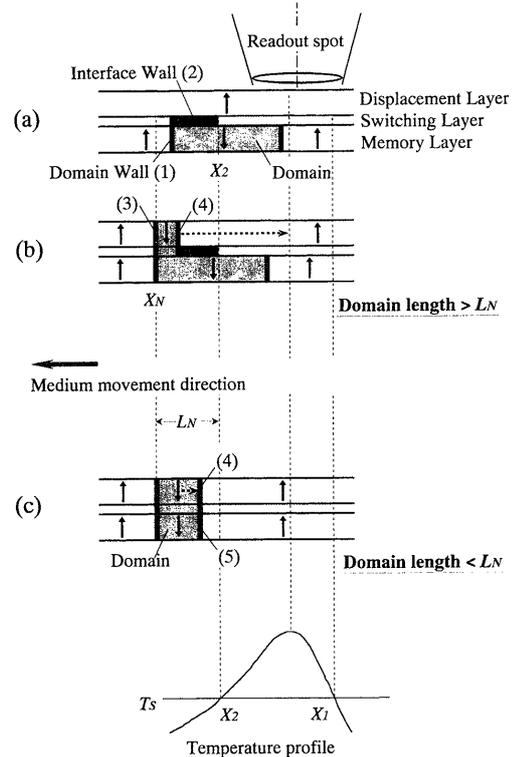


Fig. 9 Rear process of the DWDD.

ると考えている。

3.2 ゴースト信号の抑制

Fig. 9を用いてゴースト信号発生メカニズムについて少し詳しく説明する。

Fig. 9(a)のように、メモリ層中の磁区前端部が結合切断領域後方の再結合領域に侵入すると、移動層とメモリ層とのスピン配向が反平行であるので、磁壁(1)と温度 T_s の位置 X_2 との間のスイッチング層内に界面磁壁(2)が形成される。媒体の走査に伴って、この界面磁壁は、より低温の界面磁壁エネルギー密度の高い領域に広がっていき、エネルギーが蓄積されていく。

移動層の核形成をひき起こすのに十分なエネルギーが蓄積される位置 X_N まで界面磁壁が広がると、Fig. 9(b)のように、移動層の一部が磁化反転して磁壁(3)および(4)が形成される。磁壁(4)は温度勾配による磁壁駆動力によって直ちに再生スポット内のピーク温度近傍まで磁壁移動していき、ゴースト信号を発生させるのである。

ここで、磁壁(4)には、温度勾配による力 F_g のほかに、メモリ層との交換結合による力 F_1 が作用する。 F_1 は界面磁壁の形成されている領域を縮小させる方向に作用する。したがって、Fig. 9(b)では磁壁(4)を右側方向に移動させる方向に作用する。

ところが、Fig. 9(c)に示したように、磁区長が短く、磁壁(4)が形成された時点で、メモリ層中の磁区後端部の磁壁(5)が、すでに再結合領域に侵入してきている場合には、磁壁(4)がメモリ層中の磁壁(5)の位置まで磁壁移動する

と界面磁壁は消滅する。磁壁(4)がさらに右側に磁壁移動すると逆に新たに界面磁壁を形成することになるので力 F_1 は左側方向に作用することになる。結合切断領域のごく近傍以外では、交換結合による力 F_1 は、温度勾配による力 F_g よりもはるかに大きいので、磁壁(4)は磁壁(5)の位置よりも右側には磁壁移動できず、ゴースト信号が発生しなくなるのである。

そこで、このような短い磁区だけで信号を構成すれば、ゴーストのない再生信号を得ることができる。前述の実験結果より、Fig. 4の構成のサンプルでは、マーク長 $0.25\mu\text{m}$ 以下のマークのみで信号を構成すればよいことになる。しかし、信号欠落の観点から最短マーク長に制限があることと、検出窓のマージンを考慮すると、どのような変調方式を使用するにしても、もう少し長いマーク長までゴーストが発生しないように改良しないと、マークエッジ記録による実用性のある高密度記録は困難と考えられる。

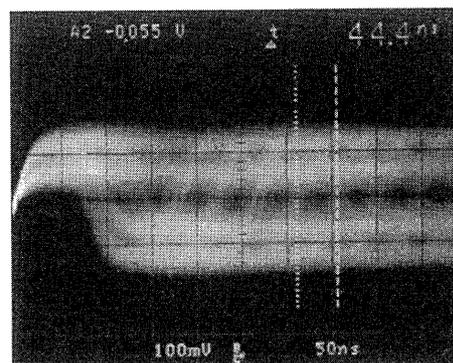
ゴーストが発生しない磁区長を長くするためには、温度分布の工夫なども有効であるが、媒体側の工夫のみで対処するには、移動層内での核形成の発生を遅らせるように磁気特性を調整すればよい。すなわち、核形成に必要なエネルギーを増大させるか、界面磁壁が相当温度低温側に広がるまで核形成に十分なエネルギーが蓄積されないようにすればよい。しかし、そのために不用意に移動層の異方性を増大させたり、界面磁壁エネルギー密度を低下させたりすると、転写性が低下して再生特性が劣化してしまう。

そこで、移動層とスイッチング層との間に、磁壁エネルギー密度が移動層よりも大きく、キュリー温度がスイッチング層よりも高い磁性層を挿入することにした⁷⁾。これにより、核形成に必要なエネルギーが増大する一方で、低温領域では界面磁壁エネルギー密度が増大するので転写性を維持できる。

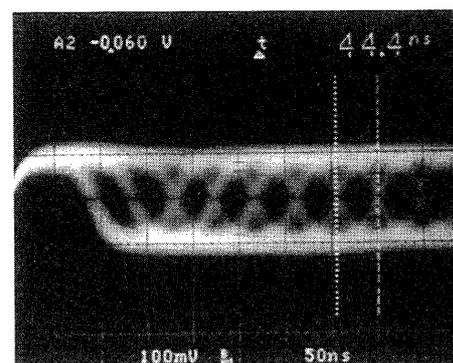
この結果、この改良媒体においては、再生特性が劣化することなく磁区長 $0.8\mu\text{m}$ 程度までゴーストが発生しなくなった。

この改良媒体に、最長マーク長に制限のある変調方式として(1,7)RLL変調方式を用いて、線記録密度 $0.1\mu\text{m}/\text{bit}$ のランダム信号を記録した。このときのアイパターンをFig. 10(b)に示す。Fig. 10(a)は、同じ信号を改良前の媒体に記録したときのアイパターンである。この信号の場合、最短マーク2Tは $0.133\mu\text{m}$ であり、最長マーク8Tは $0.533\mu\text{m}$ になる。したがって、改良前の媒体では4T以上のマークでゴーストが発生してしまうが、改良媒体ではこの信号に含まれるすべてのマークでゴーストが発生しない。この結果、Fig. 10(b)のように良好なアイパターンが得られている。

Fig. 11に、改良媒体に(1,7)RLL変調方式でランダム信号を記録したときのジッターの線記録密度依存性を示す。ジッター値18%以下を実使用可能レベルとすると、再生



(a)



(b)

Fig. 10 Eye patterns for (a) conventional and (b) modified DWDD media.

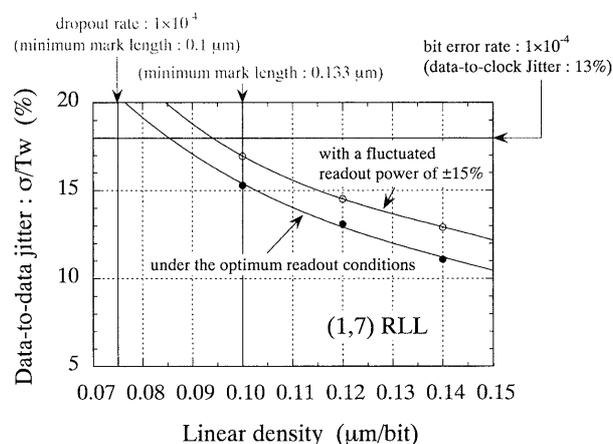


Fig. 11 Linear density dependencies of the jitter for various readout conditions.

パワーに $\pm 15\%$ の変動を見込んでも、 $0.1\mu\text{m}/\text{bit}$ 程度の高密度記録が十分に可能である。測定したジッターはdata-to-data jitterであるので、このジッター値18%は、data-to-clock jitterに換算すると約13%に相当し、ジッター分布をガウシアンと仮定した場合、約 1×10^{-4} のビット・エラー・レートに相当する。

なお、本稿では説明を省くが、再生磁界を印加することで、マーク長に関わらずゴースト信号を抑止することも可能である⁶⁾。

4. 狭トラックピッチ化

これまで、トラックピッチは $1.1\mu\text{m}$ で検討を行ってきた。しかし、面記録密度の向上のためには、狭トラックピッチ化を合わせて行うことが重要である。狭トラックピッチ化にはランド/グループ記録を行うことが有効であるが、その場合、グループ部をアニール処理している現状の実験手法は適用できない。また、生産性の観点からも別の手法を確立することが望まれる。

この課題に対して、Fig. 12 に示したように、急峻なテーパ部を有する Deep Groove 基板⁸⁾を用いて対応することを検討中である。この基板に指向性の高い成膜方法で記録膜を成膜することにより、テーパ部には実質的に記録膜が堆積しないようにする。このようにすることにより、ランドとグループそれぞれに、側部の磁壁が実質的に存在しない磁区を形成することが可能になり、グループ部をアニール処理したときと同等の効果が得られると考えている。

現状はまだ検討に着手した段階であり、成膜プロセスの最適化などが不十分なため、報告に足るような信号特性は得られていないが、この方法で磁壁移動検出方式の基本動作が可能なのは、現在までの検討で確認できている。

テーパ部に記録膜が堆積しないようにすることは、隣接トラックへの熱干渉を抑制する上でも有効である。このことは、Deep Groove 効果と合わせて、クロスイレズ耐性の向上につながるばかりでなく、磁壁移動検出方式にとってはクロストークの抑制につながる。なぜなら、再生時に隣接トラックを磁壁移動開始温度 T_s 以上に加熱しないようにできるからである。このため、隣接トラックの信号は通常再生方式により再生されることになるが、記録されている信号が通常再生方式では再生できないような高密度記録信号であることを前提としているので、大きなクロストークは発生しないことになる。また、磁壁移動検出方式の信号は立ち上がり急峻なので、クロストークがジッ

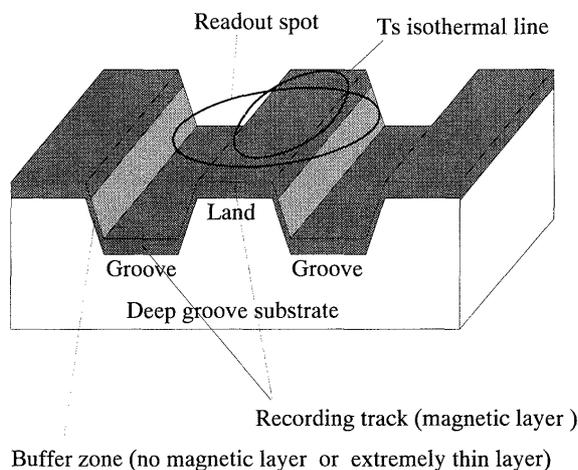


Fig. 12 Land/groove recording with DWDD.

ターに及ぼす影響は通常再生方式に比べて格段に小さいと考えられる。

5. ま と め

以上、温度勾配による磁壁移動現象を利用した新規な光磁気再生方式について、通常の光磁気ディスクドライブを用いて実動作が確認されたことを報告した。

動作確認の結果、光学系の分解能をはるかに超えた磁区長 $0.1\mu\text{m}$ の連続パターンにおいても良好な再生波形が観察され、磁区長に依存せず一定の信号振幅が得られることが確認された。磁区長が長い場合には後方からの磁壁移動による重畳信号が観察されたが、媒体構成を改良することにより、磁区長が $0.8\mu\text{m}$ 程度以下の場合には重畳のない信号が得られるようになった。

改良媒体に (1,7)RLL 符号で記録することにより、線記録密度 $0.1\mu\text{m/bit}$ においても実用上十分なジッターマージンが得られることを確認した。

狭トラックピッチ化のために、本方式にランド/グループ記録を適用する道筋を示し、クロストークの観点から本方式が狭トラック化にも適していることを説明した。

ランド/グループ記録を行えば、現行の光学系でも $0.6\mu\text{m/track}$ 以上の狭トラック化が十分可能であり、その場合、磁壁移動検出方式により面記録密度 10 Gbits/inch^2 以上、DVD サイズ片面 15 GB 以上の書換え型光ディスクが、現行の光学系に何ら変更を加えることなく実現されることになる。

文 献

- 1) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko, and K. Watanabe: *Proc. SPIE*, **1499**, 209 (1991).
- 2) Y. Murakami, N. Iketani, J. Nakajima, A. Takahashi, K. Ohta, and T. Ishikawa: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **17**(Suppl. No. 1), 201 (1993).
- 3) H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, N. Ohta, A. Yamaguchi, S. Sumi, and K. Torazawa: *Appl. Phys. Lett.*, **69**(27), 4257 (1996).
- 4) T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**(Suppl. No. S2), 47 (1998).
- 5) B. G. Huth: *IBM J. Res. Develop.*, **18**, 100 (1974).
- 6) T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: ISOM '98 Technical Digest, Tu-F-02, p. 46 (1998).
- 7) T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: MORIS '99 Technical Digest, to be published.
- 8) S. Morita, M. Nishiyama, and T. Ueda: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**(Part 1, No. 1B), 444 (1997).

(1998年11月19日受理)



白鳥 力 しらとり つとむ

昭59 千葉大学理学部物理学科卒業、同年 キヤノン(株)入社、現在に至る。

専門 光磁気記録