磁壁移動検出方式による高密度光磁気記録

非会員 白鳥 力, 非会員 藤井英一 (キャノン株式会社 製品技術研究センター)

非会員 宮岡康之, 非会員 穂積 靖 (キャノン株式会社 製品技術研究センター)

High-Density Magneto-Optical Recording with Domain Wall Displacement Detection

Tsutomu Shiratori, non-Member, Eiichi Fujii, non-Member,
Yasuyuki Miyaoka, non-Member, and Yasushi Hozumi, non-Member
(Products Technology Research Center, Canon Inc.)

In this paper we propose a new method for reproducing signals from high-density recorded patterns irrespective of the resolution limit of the readout optical system. With this method, the recorded pattern is resolved by using a specified temperature isothermal line on the medium surface. The signal is recorded in the form of an arrangement of unclosed domain walls. Each domain wall is displaced in the higher-temperature direction due to the wall energy gradient when a wall reaches the specified temperature isothermal line. Displacement occurs each time a domain wall reaches the isothermal line. Scanning the medium at a constant velocity, the time interval of these events corresponds to the spatial interval of recorded domain walls. Therefore, the recorded signal can be reproduced by detecting the displacement of domain walls.

The basic mechanism of this method, that is, domain wall displacement due to the temperature gradient, was confirmed by direct observation through a polarizing microscope. The dynamic properties of the medium were investigated using a conventional optical pickup. A clear readout waveform was obtained, and a flat signal amplitude dependence on the mark length was maintained for a domain length of greater than 0.075 μm .

キーワード: 光磁気記録, 磁壁, 磁壁移動, 磁壁エネルギー, 交換結合, 分解能

1. はじめに

動画像のデジタル化並びに圧縮符号化技術の急速な進展により動画情報を扱う機会が増えるに従って、光ディスクメモリに対する高密度化への要求も加速してきている。

光ディスクメモリの記録密度は、通常は再生光学系の分解能による制約を受ける。しかし、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、磁性膜の多様な物性を利用した様々な試みがなされ、この制約を克服する技術が続々と提案されてきている^{(1), (2), (3)}。

今回我々は、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新しい再生方式(磁壁移動検出方式)を考案し、実効的再生分解能を著しく向上できることを確認した⁽⁴⁾。この方式によれば、光学系の高分解能化技術の進展とは独立に記録密度を向上できるので、急速な高密度化・大容量化へのニーズにも充分に対応して行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、基本動作並びに動特性の確認結果について報告する。

2. 磁壁移動検出方式の動作原理

半径 r の円筒磁区の磁壁に作用する単位面積当たりの力は、下式で表される。

$$F(r) = 2M(r)Hd(r) + 2M(r)He - \sigma(r)/r - \partial\sigma/\partial r \quad (1)$$

ここで、 $M(r)$, $Hd(r)$, 及び $\sigma(r)$ は、それぞれ位置 r における飽和磁化、反磁界、及び磁壁エネルギー密度であり、 He は外部磁界である⁽⁵⁾。磁壁エネルギー密度は温度 T に依存するので、右辺第4項は下式のように変形できる。

$$-\partial\sigma/\partial r = -(\partial\sigma/\partial T)(\partial T/\partial r) \quad (2)$$

(2)式から分かるように r 方向の温度勾配を付与することにより、第4項の力を発生させることができる。 σ は一般に温度上昇に伴って低下するから、この力は磁壁を高温側に移動させる方向に作用する。本方式では、この温度勾配による力で磁壁を高温側に移動させて信号を再生する。このため、(1)式右辺の第1項から第3項までの力は抑制して、第4項の力を支配的に作用させる必要がある。第1項と第2項は磁性膜の組成比を調整して飽和磁化を小さくすれば抑制できる。第3項は、磁区をシュリンクさせて磁壁の総面積を縮小させるように作用する力である

図1 閉じていない磁壁の模式図

Fig. 1. Schematic diagram of unclosed domain wall.

が、図1に例示したような閉じていない磁壁を形成し、磁区サイズが変化しても磁壁の総面積が変化しないようにすれば作用しなくなる。

図2は磁壁移動検出方式の動作原理を示している。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_s 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。移動層中の磁壁を温度勾配で移動させるため、移動層は前述の各条件を満たすようにしておく。また、移動層に作用する静磁結合力を抑制するため、他の磁性層も飽和磁化を十分に小さくしておく。

記録膜面上を局所的に加熱すると、温度勾配が生じ、移動層中の磁壁に前述の力が作用する。磁壁が前述のキュリー温度 T_s よりも低い温度の領域に位置している時には、メモリ層との交換結合が作用しているため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、媒体の走査に伴って、磁壁が T_s よりも高い温度の領域に到達すると、スイッチング層の磁化が消失してメモリ層との間の交換結合が切断されるため、磁壁抗磁力の小さい移動層内の磁壁だけが単独で高温側に移動する。

記録膜中に信号に対応した間隔で形成されている磁壁

図2 磁壁移動検出方式の動作原理

Fig. 2. Readout mechanism.

が、媒体の走査に伴って温度 T_s の等温線上に到達する度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。従って、磁壁移動の発生を検出することにより記録信号が再生される。磁壁移動の発生は、これに伴う磁化の反転を従来の光磁気光学系を用いて検出できる。温度 T_s の等温線が記録パターンを弁別して行くので、光学系の分解能とは無関係に高密度記録信号を再生することができるのである。

3. 実験結果

実験に用いた記録媒体の膜構成を図3に示す。但し、次に述べる磁区観察用には、基板を通さずに移動層を観察するために、各磁性層を図3とは逆順に積層したサンプルを用いた。各磁性層の組成は、飽和磁化を低減させるため補償組成近傍に調整してある。磁区観察用にはトラックピッチ $1.6\mu\text{m}$ の基板を、動特性評価用には $1.1\mu\text{m}$ の基板を用いた。

閉じていない磁壁を形成するために、グループ上の磁性膜を予めレーザービームでアニール処理して磁性を劣化させた。このディスクのランド上に幅一杯に磁区を記録すると、両側のグループに接する磁区境界部には実質的に磁壁が形成されず、ランド上に図1のような閉じていない2枚の磁壁が形成されることになる。

UV樹脂オーバーコート		
保護層	SiN	50nm
メモリ層	TbFeCoCr	80nm
スイッチング層	TbFeCr	10nm
移動層	GdFeCr	30nm
保護層	SiN	90nm
ポリカーボネイト基板		

図3 記録媒体の膜構成

Fig. 3. Layer structure of the medium.

3-1. 磁区観察による基本動作の確認

サンプルの局所加熱用にレーザービームを付加した偏光顕微鏡を用いて、温度勾配による磁壁移動現象を直接観察した。磁区を記録したディスクをサンプルステージにセットし、基板側から加熱ビームを照射してトラック方向に走査しながら、膜面側（移動層側）から磁区の変化（磁壁の移動）を顕微鏡観察した。

図4は、一つの磁区の上を加熱ビームが通過して行く過程での磁区の変化の様子を順次撮影した顕微鏡写真である。各写真の下部に、その時の各磁性層の磁化状態を示した略式断面図を添付してある。加熱ビームは写真の左から右へ走査している。温度 T_s の等温線を、サンプルを透過して観察される加熱ビームの位置等から想定して各写真に記入してある。但し、写真撮影時には、加熱ビームの透過光はフィルターでカットした。

写真中の黒い部分が磁区であり、磁区の両側のグループ

図4 加熱ビームの通過に伴う磁区の変化

Fig. 4. Changes in the observed domain.

に接する境界部には磁壁が形成されておらず、ランド上の左右の境界部に、それぞれ独立した閉じていない磁壁が形成されている。図4(1)に示したように、本稿ではこの左右の磁壁をそれぞれleading wall及びtrailing wallと称することにする。また、温度 T_s の等温線をfront lineとrear lineとに分けて取り扱うことにする。

さて、図4(1)の状態から加熱ビームを磁区に近づけて行くと、図4(2)のように、front lineが磁区の左端に達した瞬間に、leading wallが加熱領域の中心部に向かって磁壁移動するのが観察された。これは、移動層中の磁壁が、メモリ層との交換結合が切断された瞬間に、温度勾配によってピーク温度部まで磁壁移動したものと考えられる。

上述の変化の後、この磁壁は加熱領域の中心部に固定されたまま、加熱ビームの走査に伴って図4(3)の位置まで移動して行った。これは、磁壁エネルギーが極小となるピーク温度位置に磁壁が捕捉されたものと考えられる。

しかし、加熱ビームを図4(3)の位置から更に進めた瞬間に、図4(4)のように、加熱領域後部が磁化反転して磁壁が消滅した。この現象は以下のように説明できる。

加熱ビームが図4(3)の位置に近づいて行くと、メモリ層に保存されている磁区の前端部がrear lineの後方に現れ始める。rear lineの後方では、メモリ層と移動層とが再び交換結合するので、このメモリ層中の磁区前端部とrear lineとの間の領域に界面磁壁が形成される。加熱ビームを更に進めて行くと、この領域が広がると共に、温度が低下して界

面磁壁エネルギー密度も大きくなるため、この領域中に貯えられる界面磁壁エネルギーが増大して行く。そして、移動層の核形成に十分な界面磁壁エネルギーが蓄積されると、この領域の移動層が磁化反転して、メモリ層の磁化状態が移動層に転写される。その結果、磁区前端部の位置とrear lineの位置との2カ所の移動層中に磁壁が形成される。このうちrear lineの位置に形成された磁壁は、直ちに温度勾配によってピーク温度部まで移動して行き、元々ピーク温度部に存在していた磁壁と合体して消滅する。以上がこの現象のプロセスと考えられる。

この後、加熱ビームを更に進めて行くと、front lineが磁区の右端に達した瞬間に、図4(5)に示すように、今度はtrailing wallが加熱領域の中心部に向かって磁壁移動するのが観察された。これは、図4(2)の場合と同様の磁壁移動が、逆極性の磁化状態の条件下で発生したものと考えられることができる。以下同様に、図4(6)及び図4(7)の現象は、それぞれ図4(3)及び図4(4)の現象と等価な現象と考えることができる。

以上の一連の現象は、温度勾配による磁壁移動現象が実現していると考えられることで初めて説明できる現象であり、これにより本方式の基本動作が確認されたといえる。

3-2. 動特性確認

上述の実験で媒体面上に温度勾配を形成するために用いた加熱ビームを、信号読み出し用の再生ビームとしても用いると考えれば、通常の光磁気ディスクドライブで磁壁移動検出方式による信号再生を試みる事が可能である。そこで、波長680nm、NA 0.55の光学系を有する通常の光磁気ディスクドライブにより、図3の構成の光磁気ディスクの動特性を確認した。磁壁の記録は、ディスクを線速度1.5m/secで回転させながら3.0mWの記録パワーでランド幅一杯を記録温度に加熱して、外部磁界を変調させることにより行なった。

図5(a)及び図5(b)は、磁区長3.0 μ mの磁区をそれぞれ再生パワー0.8mW及び1.6mWで再生したときの再生波形である。

再生パワー0.8mWでは、記録膜の温度が、交換結合の切断される温度 T_s に達しておらず磁壁移動が起らない。このため、図5(a)のように通常の再生波形が得られる。これ

図5 長い磁区の再生波形 (磁区長3.0 μ m)Fig. 5. Waveform for a long domain.
(domain length 3.0 μ m)

に対して、再生パワー1.6mWでは、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ており、閾値温度 T_s の等温線上からピーク温度部に向けて磁壁移動が起こる。このため、図5(b)のような、磁壁移動を示唆する急峻な信号レベルの変化を有する再生波形が現れる。

図5(b)の写真中の(1)で示した信号レベルの急峻な変化は、前述の磁区観察における図4(2)に相当する磁壁移動を検出したものと考えられる。即ち、front lineからピーク温度部へのleading wallの磁壁移動を検出したものと考えられる。また、図5(b)の(2)の信号レベルの変化は、図4(4)のように、leading wallがrear lineを通過した時に発生するrear lineからの磁壁移動を検出したものと考えられる。同様に、図5(b)の(3)の信号レベルの変化は、図4(5)のようなfront lineからのtrailing wallの磁壁移動を、また図5(b)の(4)の信号レベルの変化は、図4(7)のように、trailing wallがrear lineを通過した時に発生するrear lineからの磁壁移動を検出したものと考えられる。

但し、磁区観察時と異なり、媒体は加熱ビームに対して比較的高速で走査されているので、膜面上に形成される温度分布は、蓄熱の影響により媒体の走査方向に非対称な分布になる。そして、磁壁移動の終着点となるピーク温度部は再生スポットの中心よりも若干後方に形成される。このため、front lineからの磁壁移動は再生スポットの中心部で検出され、rear lineからの磁壁移動は再生スポットの裾で検出されることになる。この結果、図5(b)に見られるように、信号レベルの変化量は、front lineからの磁壁移動を検出した時の方が大きくなっている。

このように、再生ビーム自身で温度分布を形成すると、再生スポットの内部にピーク温度部が形成されるので、front lineからの磁壁移動とrear lineからの磁壁移動とが共に検出され、それぞれを検出した波形が、両者の距離に対応した一定の遅延時間（この場合約1.1 μ sec）を持って重畳された波形になる。これは信号を再生するためには不都合なことである。しかし、以下に述べるように磁区長が短い場合にはこのような重畳波形が出なくなる。

図6(a),(b)及び(c)は、それぞれ磁区長0.2 μ m, 0.1 μ m及び0.075 μ mの孤立磁区を再生した時の再生波形であり、左側の写真が再生パワー0.8mWで通常再生方式で再生した波形、右側の写真が再生パワー1.6mWで磁壁移動検出方式で再生した波形である。

右側の写真において、前述のように前後からの磁壁移動が重畳されて検出されていれば、波形の最初の立ち上がりから約1.1 μ sec遅延した位置に第2の立ち上がりが現れるはずである。ところが、これらの写真ではそのような重畳波形は現れていない。そこで、再生波形の磁区長依存性を調べたところ、磁区長が0.25 μ m程度以下になると重畳波形が出なくなることが分かった。この理由は次のように考えられる。

磁区長が短い場合、メモリ層に保存されている磁区の前端部がrear lineの後方の再結合領域に進出した後、移動層の

図6 再生パワー0.8mW (左図) 及び1.6mW (右図) における微小磁区の再生波形

Fig. 6. Waveform for isolated short domain with a readout power of 0.8mW (left-hand figure) and 1.6mW (right-hand figure).

核形成に十分な界面磁壁エネルギーが蓄積される前に、磁区全体がrear lineを通過してしまう。そのため磁区が移動層に再転写された時には、このrear line後方の磁区の前端と後端の位置に磁壁が形成され、rear line上には磁壁が形成されなくなる。rear line後方に形成された磁壁はメモリ層との交換結合が作用しているので磁壁移動できない。この結果、加熱領域後方からの磁壁移動が起こらなくなり信号の重畳がなくなるのである。

さて、図6の左側の写真に見られるように、通常の再生方式では、媒体の走査に伴って再生スポット内に磁区が侵入して来ることにより徐々に信号レベルが立ち上がる。一方、図6の右側の写真に見られるように、磁壁移動検出方式では磁区端部の磁壁が閾値温度 T_s の等温線に到達した瞬間に高速で磁壁移動することによって信号が立ち上がるので、非常に急峻な立ち上がりの信号になる。このことは信号の検出ジッターを非常に小さくできるということを意味している。また、通常の再生方式では、磁区長が短くなるにつれて信号振幅が低下するが、磁壁移動検出方式では、磁壁の間隔に関わりなく、磁壁移動距離によって信号振幅が決まるので、信号振幅が磁区長に依存しない。

図7(a)及び(b)は、それぞれ磁区長0.1 μ m及び0.075 μ mの連

図7 磁壁移動検出方式による連続磁区パターンの再生波形

Fig. 7. Waveform for continuous pattern.

連続磁区パターンを、再生パワー1.6mWで磁壁移動検出方式によって再生したときの再生波形である。

通常の再生方式では、このようなパターンは光学系の分解能をはるかに越えているため全く信号が出てこないが、磁壁移動検出方式では、磁区長 $0.1\mu\text{m}$ においても極めて鮮明な再生波形が得られる。光学的な波形干渉の影響を受けないため、連続磁区パターンの場合でも、磁区長 $0.075\mu\text{m}$ に至るまでほぼ一定の信号振幅が得られている。

図7(b)の磁区長 $0.075\mu\text{m}$ の再生波形は、上部と下部で波形が繋がってしまっており、一部の信号が欠落していることを示唆する波形になっている。但し、図6(c)に見られるように、孤立磁区の場合には良好な波形が得られていることから、この信号欠落は、連続パターンを記録することによる記録状態の不良に起因していると考えられる。従って、記録状態を改善すれば、更なる高密度化が可能と考えている。

4. 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、偏光顕微鏡直接観察により基本動作が確認されたこと、及び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越えた磁区長 $0.1\mu\text{m}$ 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 $0.075\mu\text{m}$ に至るまでほぼ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、磁区長が $0.25\mu\text{m}$ 程度以下の場合には重畳のない信号が得られた。

本方式によれば、原理的には再生上の分解能の限界がなくなるので、今後記録状態を改善して行くことによって、磁壁厚レベルまでの高密度化を達成できる可能性があると考えている。

(平成10年 6月24日受付)

文 献

- (1) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko, K. Watanabe : "Magnetically induced super resolution in novel magneto-optical disk", Proc. SPIE, vol.1499, p.209 (1991).

- (2) Y. Murakami, N. Iketani, J. Nakajima, A. Takahashi, K. Ohta, T. Ishikawa : "Super Resolution Read-Out of a Magneto-Optical Disk with an In-Plane Magnetization Layer", J. Magn. Soc. Jpn., 17, S1, p.201 (1993).

- (3) H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, N. Ohta, A. Yamaguchi, S. Sumi, K. Torazawa : "Magnetic domain expansion readout for amplification of an ultra high density magneto-optical recording signal", Appl. Phys. Lett., 69(27), p.4257 (1996).

- (4) T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, Y. Hozumi : "High-Density Magneto-Optical Recording with Domain Wall Displacement Detection", J. Magn. Soc. Jpn., 22, suppl. No. S2, pp.47-50 (1998).

- (5) B. G. Huth : "Calculations of Stable Domain Radii Produced by Thermomagnetic Writing", IBM J. Res. Develop., 18, p.100 (1974).

白鳥 力 (非会員) 1958年8月18日生まれ。84年3月千葉大学理学部物理学科卒業。同年キャノン(株)入社。主として光磁気記録材料の研究開発に従事。現在に至る。

藤井 英一 (非会員) 1958年7月8日生まれ。83年3月青山学院大学理工学研究科卒業。同年キャノン(株)入社。主として光磁気記録媒体の研究開発に従事。現在に至る。

宮岡 康之 (非会員) 1964年5月14日生まれ。87年3月筑波大学情報学類卒業。同年キャノン(株)入社。主として光磁気記録媒体の研究開発に従事。現在に至る。

穂積 靖 (非会員) 1969年4月12日生まれ。94年3月東北大学大学院工学研究科修了。同年キャノン(株)入社。光磁気記録媒体の研究開発に従事。現在に至る。