

多層記録膜用光ヘッド

篠 田 昌 久

Optical Head for Multi-Layer Recording Media

Masahisa SHINODA

The multi-layer recording technology is one of promising solution to improve optical recording density. The recent optical technologies of the optical head for multi-layer recording are introduced. First, the spherical aberration compensation methods using the lens movement or the liquid crystal device are introduced. Next, the layer jumping control method by the focusing error signals with and without the spherical aberration is described. Finally, the inter-layer cross-talk suppression method by combining quarter wave plates is introduced.

Key words: optical head, multi-layer optical media, spherical aberration, liquid crystal device, inter-layer cross-talk

高記録密度化のひとつの手法として有望な多層記録技術に関して、多層記録膜用光ヘッドの光学的な技術ポイントについて解説する。一口に「多層記録膜」と称しても、大きく2つのタイプに分類されよう。1つ目めは、BD (Blu-ray Disc) や DVD (digital versatile disc) ですでに規格化されている2層ディスクの層数をさらに増やしたタイプの多層記録膜で、記録膜層とスペース層が交互に形成されているものである。層数に応じて記録容量を増やすことができるが、各層を安定に形成するための課題が大きい。もう1つは、二光子吸収記録のように、体積的に厚みをもって形成された記録膜である。こちらは記録時に自ら信号層を形成していくための光学のおよび制御的な面での課題がある。しかしながら、いずれのタイプにしても、記録膜に回折限界まで集光されたスポットを形成し、記録動作もしくは再生動作を行うわけで、ここで光学的な課題となるのは、球面収差の存在である。球面収差は対物レンズの開口数に依存するが、対物レンズからみて近い信号層と遠い信号層の間隔が多層化に従って拡大する方向となるため、球面収差を補正するための手段が不可欠となってくる。球面収差の存在は、集光スポットの品質劣化のみならず、焦点

制御にも多大な影響を及ぼす。また、多層記録膜では、特定の信号層以外の他層からの反射光（反射型の記録膜と想定）が迷光となる光学的な層間クロストークが無視できない。

本解説では、上述の球面収差と層間クロストークについて、多層記録膜用光ヘッドにかかわる最近の話題を紹介する。

1. 層の厚みと球面収差の関係

球面収差は、レーザー光源の波長と対物レンズの開口数、そして信号層間の厚みに依存する。例えば、文献1では、BDの光学的規格を流用した8層のROMディスクが報告されている。現行のBD規格での2層ディスクの層間隔が $25\mu\text{m}$ であるのに対して、上述の8層ディスクでは1層目と8層目の間隔が約 $85\mu\text{m}$ と広い。そこで中間の厚みで球面収差が完全に補正されるような光学設計を行ったとしても、 $\pm 40\mu\text{m}$ 以上の厚み誤差による球面収差が発生することになる。図1はBDの光学的条件において、信号層の厚みの変化量と発生する球面収差（厳密値）の関係を示している²⁾。これによれば、 $40\mu\text{m}$ の厚み変化で発

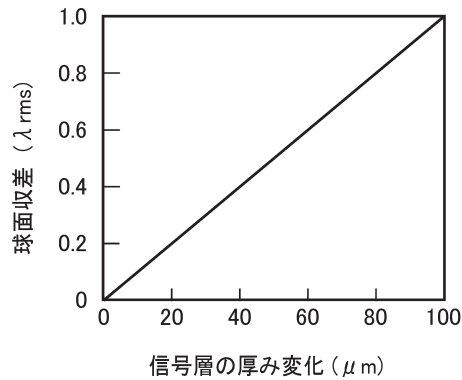


図1 信号層の厚みの変化量と球面収差の関係。

生ずる球面収差量は $0.4 \lambda \text{rms}$ にも及ぶ。この数値は光ディスクシステムの光学系全体で許容される収差量の $0.07 \lambda \text{rms}$ をはるかに超えるものであり、球面収差補正への対応が必須となる。また、文献3では、記録膜材料にアルミナを用いた二光子吸収記録として、 $7 \mu\text{m}$ の間隔で20層の記録例が報告されている。すなわち、記録層の厚みは $140 \mu\text{m}$ にも及び、かつアルミナの屈折率がBDのスペース層のそれより約1.2倍大きいことを考慮すると、やはり球面収差補正が不可欠となってくる。

2. 球面収差の補正方法

2.1 レンズ移動方式

レーザー光源から対物レンズに至る集光光学系で、光軸に沿ってレンズを移動させることで、球面収差を極小にすることができる。図2はその具体的方法を示し、(a)球面収差を補正するための専用のエキパンダー光学系を設ける方式、(b)コリメーターレンズ自身を光軸に沿って移動させる方式、がある。(a)の場合は凹レンズか凸レンズのどちらか一方を移動させればよい。現実にBD装置として市販されているものでは、光学系の簡素化を考慮して(b)の方式によるものが多い。図3はBD装置用のレンズ駆動機構の例である。コリメーターレンズがステッピングモーターによって約5mmの距離を約0.1秒で移動し、BD規格で定められた $25 \mu\text{m}$ の層間隔に対して球面収差補正が行われる。信号層が多層になるほど補正すべき厚みの量も増えるので、移動距離の長ストローク化が必要になるとともに、レンズ移動の高速化が求められる。これは信号層間をジャンプした場合にも、記録もしくは再生が途切れてはならないという装置側からの要請に対応しなければならないからである。また、光学的な性能面からは、レンズが正しく光軸上を移動する必要があるが、光軸に対するレンズ駆動機構の配置精度という機構的な面でも十分な配慮が必要

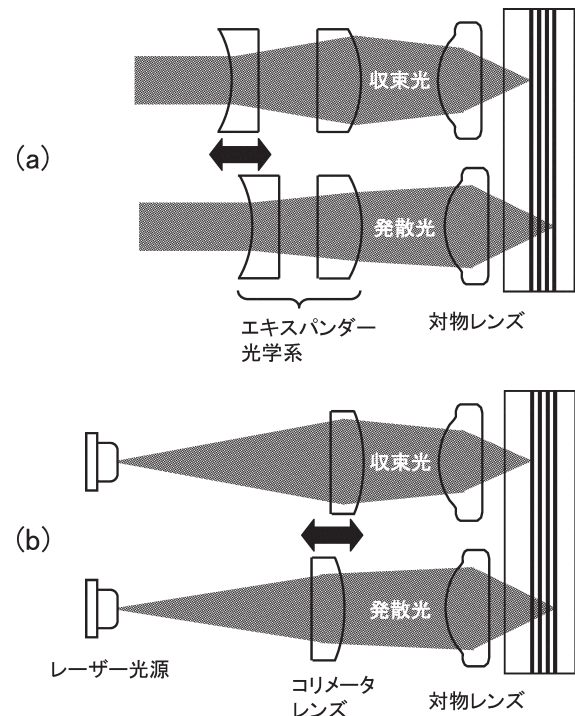


図2 レンズ移動による球面収差補正方式。

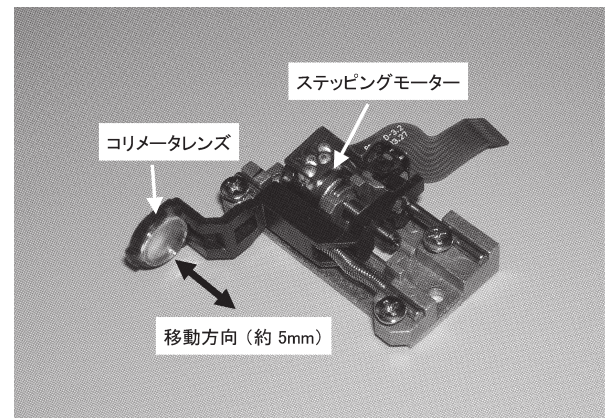


図3 レンズ駆動機構の例。

である。

2.2 液晶素子方式

マトリクス電極構造をもつ液晶素子が、レーザー光の伝搬波面に対して位相分布を与えられることを利用して、収差の補正を行う方法がある⁴⁾。電極構造によって任意の位相分布を作り出すことができるので、球面収差以外にもコマ収差や非点収差の補正も可能である。また、各収差用の補正素子を積層させて複数の収差を同時に補正することも容易であるし、補正すべき収差量、すなわち位相分布の変化量を印加電圧によって制御することができる、といったことが液晶素子方式の大きな利点である。

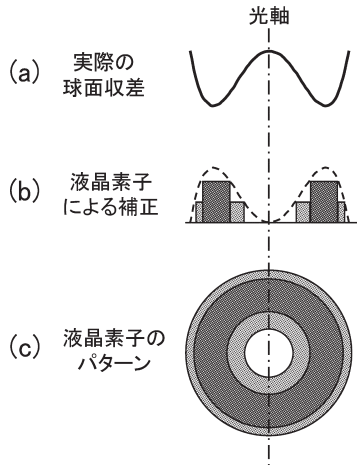


図4 液晶素子による球面収差補正の原理。

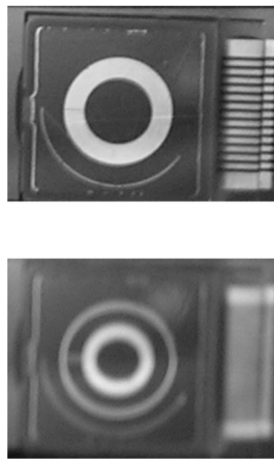


図5 液晶素子の例。

図4は、液晶素子で球面収差を補正できる原理を示す。図4(a)のように、球面収差の位相分布は光軸からの距離に対してW字状に変化する。この収差を補正するためには、極性が反転するように位相分布を与える。実際の球面収差補正では、図4(b)のように同心円状に液晶素子を分割し、補正すべき位相分布をおおよそ近似できるようにする。図4(c)は例えば、4つの同心円領域によって構成された液晶素子のパターンを示す。図5は実際の液晶素子のサンプルである。図6は、基準光源を備えた干渉計を用いて、この液晶素子の波面収差を観測した結果である。液晶素子に電圧を印加させると、同心円状に位相分布が変化し、3次の球面収差が $0.020 \lambda_{rms}$ 変化している。

液晶素子は時間的な応答性に課題がある。補正すべき収差量が多いと液晶素子の厚みも大きくなり、時間応答性が素子の厚みの2乗に反比例して悪化する。また、低温でも応答性が低下するため、使用に際して十分な配慮が必要となる。

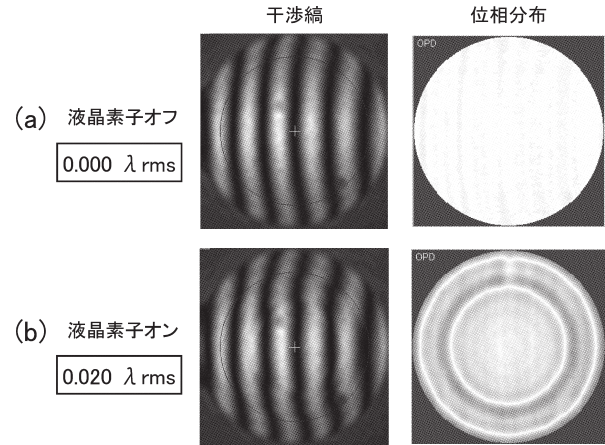


図6 液晶素子の動作による球面収差の変化。

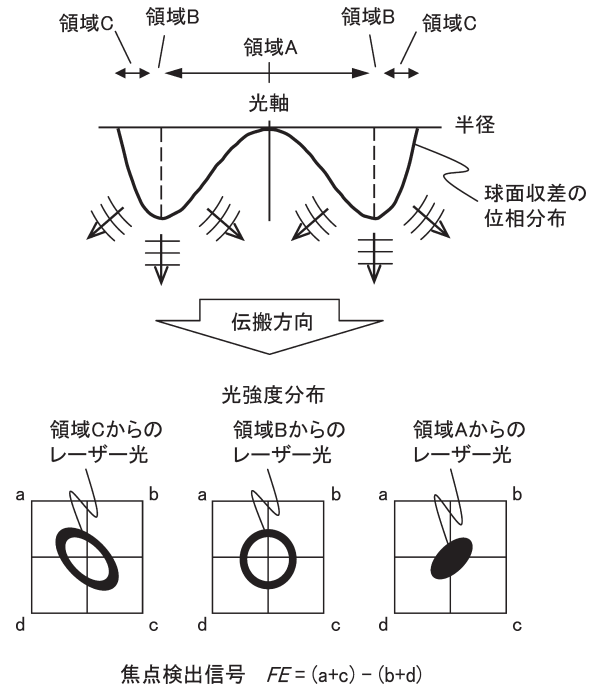


図7 球面収差の位相分布と光検知器面での光強度分布の関係。

3. 多層光ディスクにおける焦点制御の課題と対応方法

多層光ディスクでの球面収差の存在は、焦点制御においても深刻な問題を引き起こす。すなわち、球面収差によって、収差補正がされていない信号層の焦点検出信号品質が劣化するため、層間ジャンプの制御に問題が生じる^{5,6)}。図7は、球面収差が存在する場合の焦点検出の様子を示し、代表的な非点収差法を仮定している。球面収差の特徴であるW字状の位相分布をしたレーザー光が光ディスクから反射されて焦点検出用の光検知器に入射するときに、W字の谷の近傍領域をB、領域Bよりも光軸側を領域A、領域Bよりも外側を領域Cとすると、それぞれの領域か

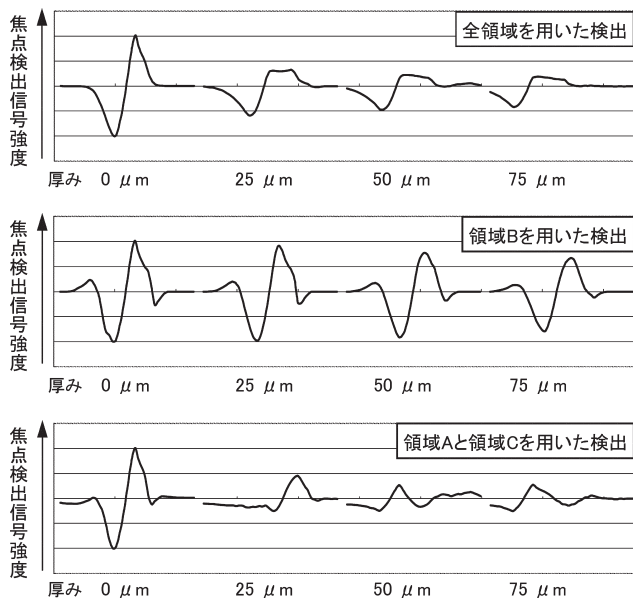


図8 信号層の厚み変化における焦点検出信号の計算値.

らのレーザー光は光検知器面で異なった光強度分布を示す。領域Bでは波面が光軸と平行に進んでいるので、レーザー光は光軸と平行に伝搬する。また、領域Bより内側の領域Aでは収束して伝搬し、外側の領域Cでは発散して伝搬する。したがって、3つに分割された各領域でのレーザー光が光検知器に入射した場合の光強度分布をみると、領域Bからのレーザー光は、ちょうど非点収差法での最小錯乱円を示し、その焦点検出信号 FE はゼロとなる。すなわち、焦点検出信号 FE は球面収差の有無や大きさに関係なく、正しく焦点位置を検出できることを示している。これに対して、領域Aと領域Cからのレーザー光は、それぞれ球面収差の影響を受け、四分分割光検知器の対角線方向に伸びた光強度分布となるため、焦点検出信号 FE はゼロとならず、さらにそれぞれの焦点検出信号 FE

の極性は反転したものとなる。そこで、領域Aと領域Cからそれぞれ生成される焦点検出信号を加算すると、球面収差が存在する場合には、それぞれの焦点検出信号 FE の極性が反転しているためにキャンセル効果が作用し、加算後の焦点検出信号は減少する。反対に、球面収差が存在しない場合には、極性の反転がなくなるため、加算後の焦点検出信号は逆に増大する。図8は、通常に用いられている全領域での検出(上段)、領域Bのみを用いた検出(中段)、領域AとCを加算した検出(下段)、の3つのケースにおいてBDの光学条件で焦点検出信号を計算した結果である。全領域を用いた従来の検出方法では、信号層の厚み変化が $25\mu\text{m}$ ですでに焦点検出信号振幅が半減するとともに、S字状の波形が崩れている。信号層の厚み変化が $50\mu\text{m}$ では、さらに信号振幅の低下と波形の乱れが進行しており、焦点制御には適さないことがわかる。一方、領域Bから検出した場合(中段)では、信号層の厚み変化が $75\mu\text{m}$ にわたる範囲において、多少の信号振幅低下がみられるもののS字状の波形をきれいに維持しており、球面収差の影響が排除されていることが確認できる。このような信号品質であれば、十分に焦点制御に使用できると判断される。また、領域Aと領域Cから検出した場合(下段)では、球面収差が補正されている $0\mu\text{m}$ においてのみ正常な焦点検出信号を示し、信号層の厚み変化 $25\mu\text{m}$ ではすでに信号振幅は大幅に低下しているとともに、S字状の波形が維持できていない。以上のことから、球面収差が補正されていない信号層の厚みでは、領域Aと領域Cからのそれぞれの焦点検出信号がキャンセルしあっていることが確認できる。

上述のことを、図9を参照して整理する。同心円状に領域を分割し、それぞれの領域から焦点検出信号を検出することによって、領域Bでは球面収差に依存せず劣化の少

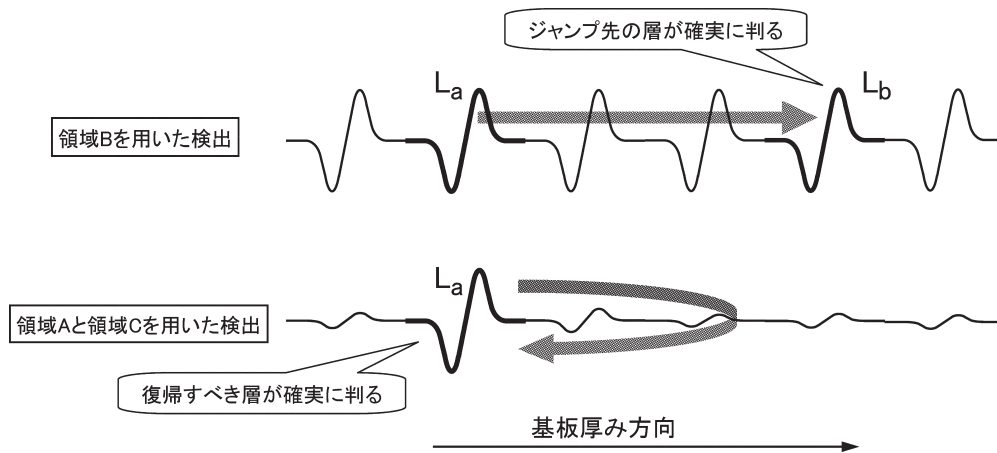


図9 多層光ディスクにおける焦点制御の方法.

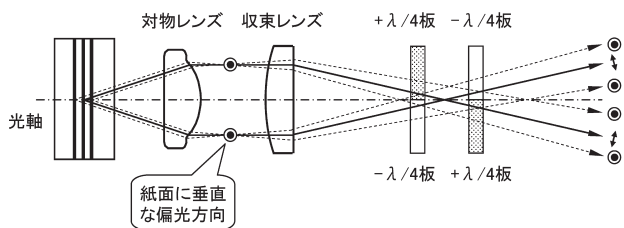


図10 層間クロストークを抑圧する光学系の例。

ない焦点検出信号が得られる。したがって、多層光ディスクの信号層によらず焦点検出信号が得られるので、ジャンプ先の信号層 L_b を確実に認識でき、層間ジャンプ制御の安定性に寄与できる。さらに領域 B 以外で検出することで、球面収差が補正されている特定の信号層でのみ所定の焦点検出信号を得ることができるので、この特徴を活用すれば、例えば振動や衝撃によって一時的に焦点はずれが発生した場合でも、もとの信号層 L_a の焦点検出信号だけが認識されるので、直前の信号層に容易に復帰することができ、同様に多層光ディスクのジャンプ制御の安定性に寄与できる。

4. 多層光ディスクにおける層間クロストークの対応方法

多層光ディスクでは、他の層からの反射光が迷光となって再生信号や制御信号の品質が劣化する問題点がある。前章までに述べた球面収差の観点からは、信号層の間隔は小さいほうが好ましいが、反対にクロストークは増大するので抑圧のための対策が必要となる。そのひとつとして図10のように1/4波長板を組み合わせた方式が提案されている⁷⁾。光軸に対して一方の側を+1/4波長板、他方の側を-1/4波長板となるように形成された波長板2枚を、多層光ディスクからの反射光が収束する前後に、かつ波長板の正負の符号が反転するように配置する。また、多層光ディスクからの反射光は直線偏光(図10では紙面に垂直な偏光方向)となるようにしておく。こうすると、所望の信号層から反射されたレーザー光(実線)は必ず同じ符号の2枚の波長板を透過することになるので、偏光方向が90度回転する。一方、所望の信号層以外から反射されたレーザー光(破線)は必ず異なる符号の2枚の波長板を透過することになるので、偏光方向は変化しない。したがって、2枚の波長板の後側に偏光子等を配置することで、所望の信号層から反射されたレーザー光だけを分離することが可

能になり、層間クロストーク成分は除去される。文献7では、本方式によって、信号層間の厚みを小さくしてもクロストークによるジッター値の増加を実際に抑えられたことが報告されている。また、正負の符号を反転して形成される波長板には、フォトニック結晶が使われている。フォトニック結晶は、高屈折率と低屈折率の2種類の誘電体が一定の凹凸形状で積層された素子であり、レーザー光が伝搬する際に誘電体の境界面で多重反射と多重散乱を起こさせる。これらの作用によって、波長板や偏光子、波長フィルタといった多様な機能を発現するため、このような特徴を生かして将来の光ヘッドに適用されることが期待される⁸⁾。

多層記録膜用光ヘッドにおける光学的な技術ポイントとして、球面収差と層間クロストークに絞って最近の話題を紹介した。本稿では割愛したが、二光子吸収記録のように体積的に自ら信号層を形成していく方式では、これまでとは違った独自の焦点制御やトラッキング制御が必要となってくる。今後は、高記録密度を目指したメディアの研究開発となお一層連動して、最適な光ヘッドの形態を追求していく必要がある。

文 献

- 1) 市村 功, 山崎 剛: "8層 200 Gbyte Blu-ray Disc," O plus E, **27** (2005) 425-430.
- 2) S. Stallinga: "Compact description of substrate-related aberrations in high numerical-aperture optical disk read-out," Appl. Opt., **44** (2005) 849-858.
- 3) M. S. Akselrod, S. S. Orlov, G. J. Sykora, K. J. Dillin and T. H. Underwood: "Progress in bit-wise volumetric optical storage using alumina-based media," *Optical Data Storage 2007 Technical Digest* (Portland, 2007) MA2.
- 4) 橋本信幸: "液晶による波面補正素子とその応用", 光学, **36** (2007) 149-153.
- 5) K. Nakai, H. Nakahara, D. Matsubara, T. Matozaki, N. Takeshita, T. Yoshihara and K. Mori: "Focusing error detection using concentrically separated light beams for multilayer optical discs," Jpn. J. Appl. Phys., **45** (2006) 1197-1203.
- 6) 篠田昌久, 中井賢也: "多層光ディスクの球面収差と光ヘッドの焦点制御方式", O plus E, **29** (2007) 1143-1147.
- 7) T. Ogata and T. Kawashima: "Novel read-out technology for multi-layer disc using polarization device," Proc. SPIE, **6282** (2006) 62820B-1.
- 8) 川上彰二郎: "フォトニック結晶の実用化の前線で", O plus E, **28** (2006) 381-385.

(2007年12月10日受理)