

CD/DVD 互換光学系と互換部品

水野定夫

1996年8月に4.7GB/片面のDVD-ROMフォーマットが完成し、1997年7月には書き換え可能な2.6GB/片面のDVD-RAMフォーマットが完成した。この結果、DVDはビデオからコンピューター応用を含む多くの分野で、情報可換媒体として使用可能になった。この規格では、基板厚0.6mmの光ディスクを2枚張り合わせた構造とし、波長を650nm、対物レンズの開口数(NA)を0.6として高密度の光ディスクを実現している。高密度化を図るには対物レンズのNAを大きくする必要があるが、NAを大きくすると、光ディスクが傾いたときの収差が増加し、光の収束状態が劣化する。この収差は主にコマ収差と呼ばれるもので、対物レンズのNAの3乗と基板の厚みに比例する。光ディスクを薄くすることで、この収差は抑えることができるため、DVDでは基材厚0.6mmの光ディスクを採用した。

しかし、DVD用に作られた対物レンズでは、CDディスクは読み取れない。DVDは今後の発展が期待される光ディスクであるが、過去に蓄積されたCDソフト資産を継承したいという市場の要望に応えるため、CDとDVDの互換性をどう維持するかということが開発当初からの課題であった。

本稿では、これを解決するために提案されたCDとDVDの互換方式と、その光学系について解説する。

1. CD/DVD 互換方式の概要

対物レンズは基板の厚みが設計値からずれると球面収差が生じ、レンズの中心部を通る光と周辺部を通る光の収束位置がずれる。このため、DVD用の光ピックアップでは、

CDが読み取れない。そこで、基板厚の異なるディスクを再生するため図1に示すような互換方式が開発されてきた。この互換方式は、波長650nmの光源を用いた1波長方式と、波長650nm/780nmの2光源を用いた2波長方式に分けられる。

1波長方式は構造的にシンプルであり低コスト化できるが、波長依存性のあるCD-Rが再生できない。代表的な方式としては2焦点、複合対物レンズ、対物レンズ切り替えなどがあり、カーナビやビデオプレーヤー等の分野に実用化されている。

2波長方式は、CD再生専用波長780nmの光源を設けることで、CD-R再生を可能にしたが、ピックアップ構造は複雑になる。この方式には主に、CD光学系を有限系にして球面収差を補正するものと、対物レンズの中間領域をCDに最適化して球面収差を補正するものがあり、それぞれ実用化されている。主な用途はDVD-ROMドライブとビデオプレーヤーである。

2. 1波長方式によるCD/DVD互換

2.1 2焦点

この方式はCDとDVDの各々の読み取りに最適な2つの光スポットを形成して再生するものであり、対物レンズをCD用とDVD用の領域に分ける領域分割と、CD用のレンズ作用とDVD用のレンズ作用を、領域を重ねて2重に形成する波面分割がある。領域分割は5分割程度にすればジッター*1は確保できるが、反射光の一部が欠落するため規格限界ディスクを再生した場合に制御性能が劣化する。これに対し波面分割は、対物レンズの中心部にホログラムを形成して、回折した光と透過した光で再生するもの

松下電器産業(株)光ディスク開発センター (〒571-8501 門真市大字門真 1006)
E-mail: smizuno@drl.mei.co.jp

*1 再生信号の時間軸変動。基準となる時間幅と、再生信号の変換点位置誤差(一定のレベルをクロスする位置の誤差)の比。

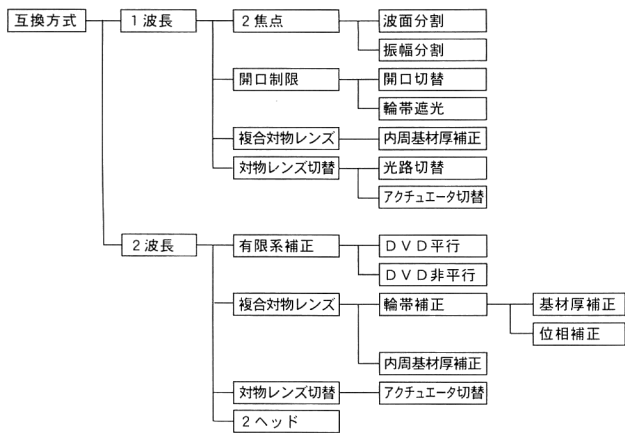


図1 1波長, 2波長の各種互換方式.

であり, 開口内のすべての領域の光を使用するため, 領域分割のような問題はない. 対物レンズは最適基材厚0.6 mmに設計され, 入射側の表面に同心円状のホログラムを形成している¹⁾(図2). ホログラムのピッチは内周から外周にわたって連続的に小さくなっている. 2焦点光ピックアップでは, 0次光をDVDの再生に用い, +1次光をCDの再生に用いており, +1次の回折効率を高くするため, ホログラムの断面形状を鋸歯状にしている. また, CD再生時は往路・復路とも+1次の回折を利用するので, 信号検出光は+2次のレンズ作用を受ける. ここで, 往路の0次回折光のうち, 復路に+2次の回折を受けた光も, ほぼ同じ程度のレンズ作用を受けるのでフォーカス信号を劣化させる. これを避けるため, ホログラムの鋸歯を二山状にして+2次回折光の低減を図っている²⁾.

CD用のNAは0.4に設定しており, この範囲がホログラム領域である. ホログラムはその中心部で回折した+1次光が対物レンズとの合成レンズ作用を受け, 基板の厚みが1.2 mmのCDに適合した光スポットを形成する波面を生成するように設計される. ホログラムで回折されない0次光は, NA 0.6の対物レンズで収束されてDVD用の光スポットを形成する.

DVDを再生するときには, ディスク上にDVD用の光スポットが収束され, CD用の光スポットは焦点が外れたピンぼけ像となり, その反射光は高周波の信号成分をもたない. CDを再生するときにはその逆となる.

2.2 開口切り替え

対物レンズの開口を切り替えるだけで基材厚の異なる光ディスクを読み取ることができる. DVDを再生するときには開口を全開にし, CDを再生するときには外周部を遮断して中心部の光だけを通し, 情報を読み出す³⁾. 対物レンズはDVDに最適化され, CDを再生するときには, NAが

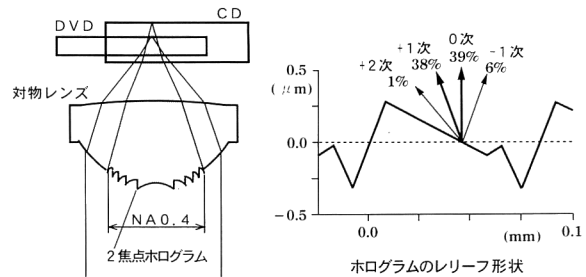


図2 2焦点対物レンズの構成とホログラム断面形状図.

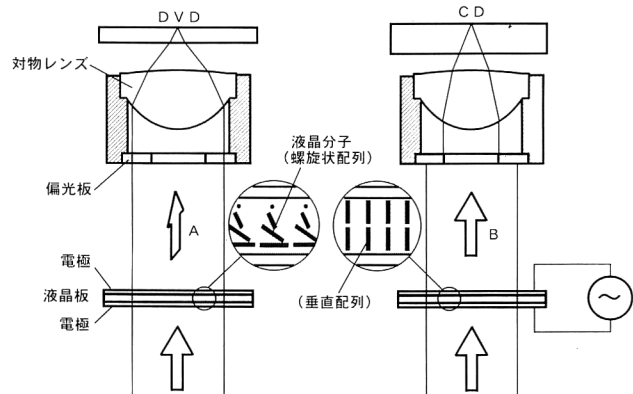


図3 液晶による開口切り替えの原理図.

0.35になるように開口を絞る. 基材厚が1.2 mmであっても, この領域の球面収差は55 mλrms以下に抑えられ再生が可能になる. 球面収差が大きいため, CDのジッターは6~7% (基準信号と再生信号間のジッター)まで増加する. しかし, 実用上の課題であるディスク傾きによるジッター劣化は少なく, ラジアル方向のディスク傾きは±2.0°以上許容できる. これは, ディスク傾きで発生する収差が主にコマ収差であるため, 初期の球面収差とは2乗加算になり, ジッターが限界に達したときの影響が相対的に少なくなるためである.

開口の切り替えは, TN型の液晶板とリング状の偏光板を組み合わせで行う(図3). 液晶板は, 電圧を印加しないときには液晶分子が螺旋状になっており, ここを透過すると光の偏光方向は90°回転する. 電圧を印加したときには液晶分子が垂直になり, 液晶板を透過する光の偏光方向は回転しない. 偏光板は外周部が偏光特性をもち, 図中A方向の偏光は透過し, B方向の偏光は外周部が遮断される. DVD再生時は液晶板に電圧を印加せず, A方向の偏光になり偏光板では遮光されない. CD再生時は液晶板に電圧を印加することで, B方向の偏光になり外周部が遮断され偏光板の中心部で開口制限される.

さらに液晶板の透明電極をリング状に4分割し最外周部

で開口制限して、内周部で球面収差補正を行う方法も提案されている⁴⁾。

2.3 輪帯遮光

対物レンズの一部をリング状に遮光することにより、CD再生時の収差を低減する方式である。対物レンズの最適基材厚は0.6 mmであり、CD再生時には大きな球面収差が発生するが、輪帯部が遮光されることで内周部の比較的球面収差が少ない領域の光のみが検出される⁵⁾(図4)。CDディスク上の光スポットは、球面収差により広がり、その反射光には多くのノイズ成分が含まれている。このノイズ成分は外周領域の反射光に含まれているので、復路に球面収差で拡散し、光検出器上には入射しない。また、輪帯領域の光は遮光され、結局、内周部の光のみが光検出器上に入射する。これは光ディスクからの反射光を開口制限したものであり、開口切り替えと同様の性能を得ることができる。

NA 0.37~0.42の領域を遮光することにより、CD再生

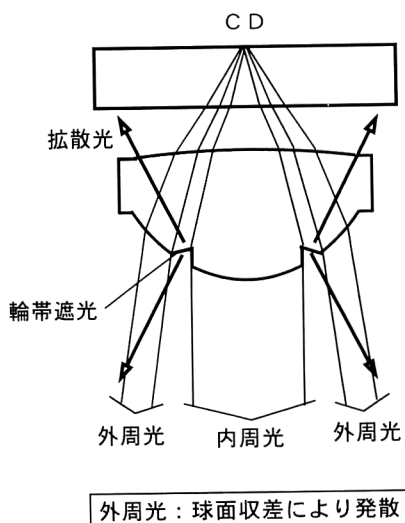


図4 輪帯遮光方式における対物レンズの構成。

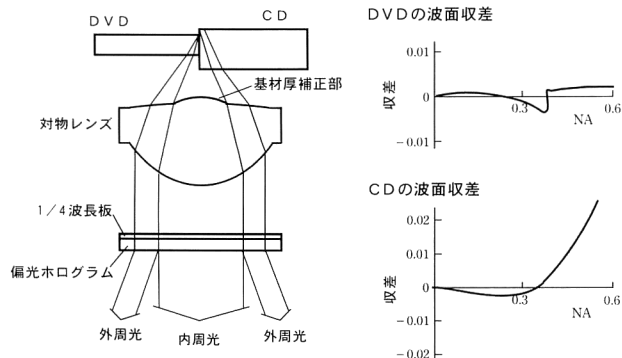


図5 内周基材厚補正方式における対物レンズの構成と波面収差を示す図。

光を実質的に開口制限できる。また、DVDを再生するときには対物レンズの一部が遮光されるが、この程度の輪帯であれば性能への影響は少なく、ジッターも6.5%程度は確保できる。開口切り替えのような液晶シャッターを必要としないシンプルな光学系であり、低コスト化を実現できる方式である。さらにこの方式を発展させ、輪帯部を遮光せずにCD再生に利用した「輪帯基材厚補正」方式が開発されている。

2.4 内周基材厚補正

対物レンズを工夫し互換をとる方式として、対物レンズの内周部と外周部の最適基材厚を変えて、CD光学系の球面収差を低減し、DVD光学系に高次の収差成分をもたせた内周基材厚補正がある^{6,7)}(図5)。対物レンズは、内周部(NA 0.37)と外周部の特性が異なり、内周部は基材厚1.2 mmの光ディスクを通して光を収束したとき、収差がMarechal criteriaの半分以下になるように構成されている。具体的な最適基材厚は、CDディスク厚の60~80%の間である。外周部の最適基材厚は0.6 mmに設計され、内周部を通った光と合成して光を収束したとき、3次の球面収差がほぼゼロになるよう構成されている。基材厚0.6 mmの光ディスク上の光スポットは、外周部と内周部の光が干渉して1次のサイドローブが最小になる。球面収差を抑えた結果、高次の収差は増加するが、この収差は光スポットの高次のサイドローブとして現れ、その反射光は高域の信号成分を含まず、再生信号を劣化させることはない。したがって、DVDは内周光と外周光を用いて再生することができ、専用の対物レンズと同等の性能を確保できる。

CD再生に用いる内周部の光は、偏光ホログラムの回折を利用して外周部の光と分離できる。また、フォーカス検出が非点収差法であれば、球面収差による広がりにより光検出器上で分離することができる。

この対物レンズを用いた光ピックアップでは、上記分離

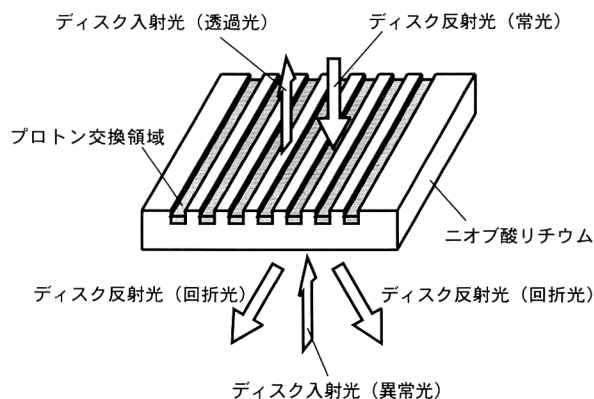


図6 偏光ホログラムの構成。

のためだけでなく、RAM ディスク再生の観点から偏光ホログラムを採用している。偏光ホログラムは1/4波長板と組み合わせて、光ディスクからの反射光だけを回折し、検出光量の少ないRAM再生に対応している。さらに、SSD (spot size detection) 方式のフォーカス検出を容易に実現することができ、RAM再生時のトラッキング干渉の低減を図っている。

偏光ホログラムは複屈折材料のニオブ酸リチウム基板をタンタルでパターンニングし、Li⁺をH⁺で置換するプロトン交換を行い、選択エッチングによりホログラムの溝深さをコントロールして作製される⁹⁾(図6)。この偏光ホログラムは異常光(光ディスク入射光)に対しては回折せず、常光(光ディスク反射光)に対しては回折するよう構成されている。回折により、光ディスクからの反射光は内周部と外周部に分離し、内周部はフォーカス検出用の+1次光と、トラッキング検出用の-1次光に分離する。この+1次光と-1次光は4分割され、各光はさらに受光素子面を挟んで前側に焦点のある光と、後側に焦点のある光に分割されている。この焦点前側/後側の光スポットをディテクターの分割線上に形成してSSDを構成しフォーカス信号を得ている。

2.5 対物レンズ切り替え

CD用とDVD用の2つの対物レンズを用いて再生するもので、対物レンズを切り替える方式として、光路切り替えとアクチュエーター切り替えがある。光路切り替えとしては、2つの対物レンズを隣接して設け、両方の対物

レンズに半導体レーザーからの光が入射するよう構成し、フォーカス動作により使用する光学系を選択する方法⁹⁾(図7(a))が提案されている。アクチュエーター切り替えとしては軸摺り回転アクチュエーターに2つの対物レンズを搭載し、トラッキング動作と兼用して対物レンズを切り替えるものが主流である¹⁰⁾(図7(b))。これは、支軸のまわりを回転し、かつ支軸に沿って摺動できる可動子の同偏心位置に2つの対物レンズを設け、回転によりトラッキング制御を、摺動によりフォーカス制御を行い、トラッキングコイルにキックパルスを印加して対物レンズを切り替えるものである。駆動中立点は磁性片とトラッキングマグネットの吸引力によって保つことができる。2つの対物レンズは各々CDとDVDに最適設計されており、球面収差に関しては他の方式のような問題はない。

この方式では、可動子の傾き調整により一方の対物レンズのコマ収差は補正できるが、もう一方の対物レンズは傾き調整ができずコマ収差が残ってしまう。これを解決する

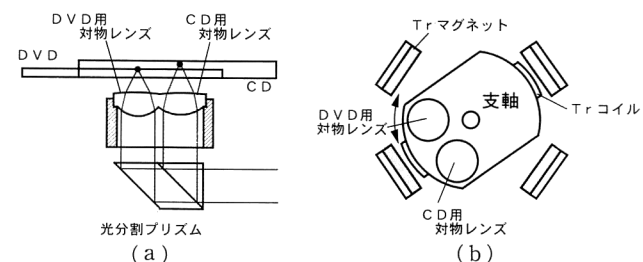


図7 対物レンズ切り替え方式の代表的な構成。(a) 光路切り替え、(b) アクチュエーター切り替え。

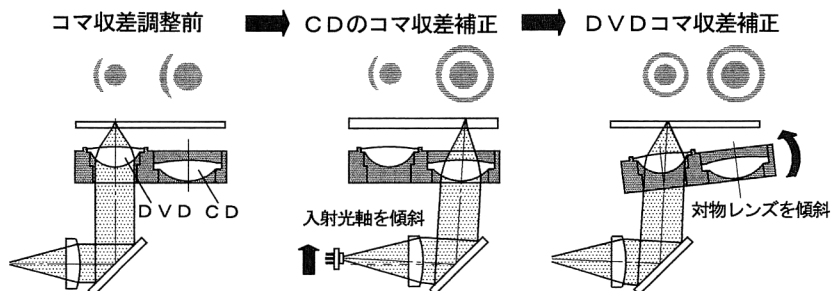
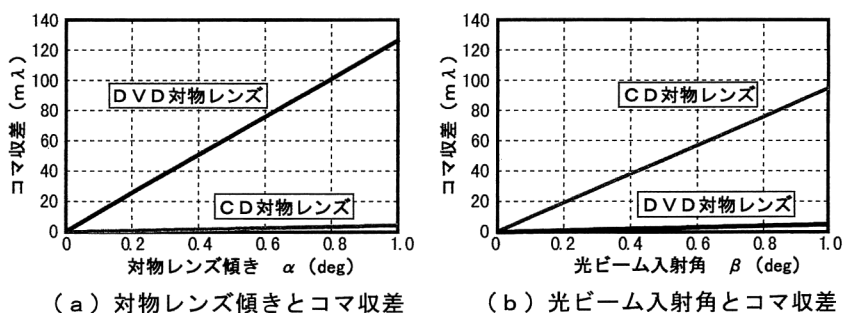


図8 対物レンズ切り替え方式におけるコマ収差補正の原理図。

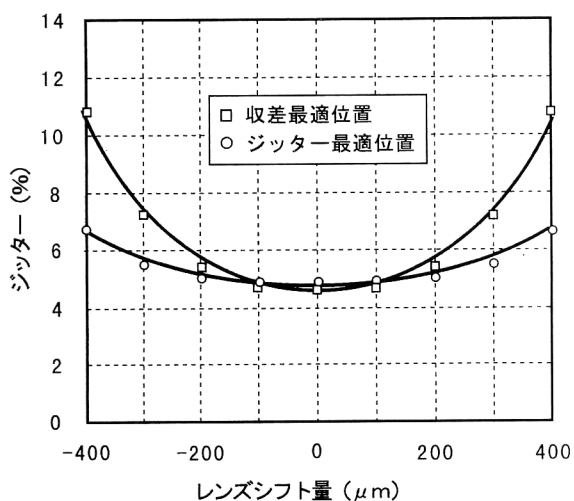


図9 CD有限系のレンズシフト特性.

ために、正弦条件*2を所定程度外した対物レンズをCDに用いることで、両対物レンズのコマ収差を補正するものが開発されている¹¹⁾。図8(a)は対物レンズの光軸傾きにより発生するコマ収差を示す。DVD用対物レンズのコマ収差は光軸に対する傾き角 α の3乗に比例して増加するが、CD用対物レンズのコマ収差は α にほとんど依存しない。図8(b)は対物レンズへの光ビームの入射角 β に対して発生するコマ収差を示す。DVD用対物レンズのコマ収差は正弦条件を満たしているため入射角 β にはほとんど依存しないが、CD用対物レンズのコマ収差は β により大きく変化する。このため各々の対物レンズに対し、光軸に対する傾斜角と光ビームの入射角を合わせることで、ほぼ独立にコマ収差を補正できる。図では便宜上、対物レンズを固定し、光学系を移動して説明した。また、1波長の光ピックアップとして説明したが、現実には2波長の光ピックアップに実用化されている。

3. 2波長方式によるCD/DVD互換

3.1 有限系補正

ディスク基材が厚くなると、空气中を収束する光の最適な波面の曲率は小さくなる。このため、CDとDVDの基材厚差による球面収差を対物レンズに入射する光の発散・収束度合いによって補正することができる。

光学系構成として、DVDを無限系としCDを有限系としたものと¹²⁾、DVD/CDともに有限系にしたもの¹³⁾とがある。前者は集光レンズのコリメート調整が容易で2層ディスクに対して有利であり、後者はレンズシフト(トラッ

キング動作によるレンズ移動)時の収差が抑えられる点ですぐれている。DVD無限系/CD有限系にするとCD光学系は正弦条件を満たさず、光軸上の収差を最小にした設計ではレンズシフトによるコマ収差が大きくなる。しかし、光ピックアップの設計は収差を最小にすることではなく、ジッターを低減し、その許容範囲を拡大することである。この観点からCD有限系の最適化設計をすると、レンズシフトによるジッター劣化を抑えることができる。このときの改善効果を図9に示す。

DVD無限系の対物レンズを用いて、CD光学系を有限系にするには、CD用の光源を集光レンズに近づける方法と、波長選択プログラムで発散光に変換する方法がある¹⁴⁾。波長選択プログラムは、波長650nmの光に対して 2π の位相差となるような階段状の段差からなり、波長780nmの光に対しては球面収差を補正するように段差の幅と位相差が決められている。CDの開口制限は波長選択プログラムと一体に設けられた光学フィルターで行っている。

発光点を集光レンズ側に近づけた発散光学系では、可動子に設けられた波長フィルターによってCDの波長に対してNA0.45になるよう開口が制限される(図10(a))。この波長フィルターの内周部は位相調整膜、外周部は短波長透過膜からなり、特性の異なる2つの光学膜が波長板上に成膜されている(図10(b))。短波長透過膜は波長650nmの光を透過し、波長780nmの光は反射する特性をもち、CDの光は開口制限を受ける。位相調整膜は上記両波長の光を透過し、波長650nmの光に対しては外周部を透過する光との間に位相差が生じないように構成している。位相は波長依存性があるが、波長650nm近傍で短波長透過膜と位相調整膜の位相特性を合わせることで、波長フィルターを透過したDVDの光の位相差は $1/18\pi$ 以内に抑えることができる。

3.2 輪帯基材厚補正

DVD用対物レンズの中間領域をリング状に基材厚補正することで、CD/DVD互換をとることができる。対物レンズの内周部と外周部は最適基材厚0.6mmに設計され、NA0.38~0.44の中間領域を最適基材厚1.2mmとしてCDの収差を補正する¹⁵⁾(図11)。比較的球面収差の少ない近軸領域と、CD用に設計された輪帯領域が合成されて、CDで用いる領域の球面収差は30mλrms程度に抑えられる。通常対物レンズは製造誤差により20mλrms程度の球面収差があり、再生ジッターはCD専用設計された光ピックアップに近い値を示す。また、NA0.44以上の外周部は球面収差により拡散して光検出器には入射せず、上記有限系補正のような波長フィルターは必要ない。

*2 コマ収差を生じない条件。物点および像点で光線が主軸となす角を u 、 v とすると、 $\sin(v)/\sin(u) = \text{一定}$ の条件を満たすこと。また、無限光学系では、入射高 h 、焦点距離を f のとき $h/\sin(v) = f$ となる。

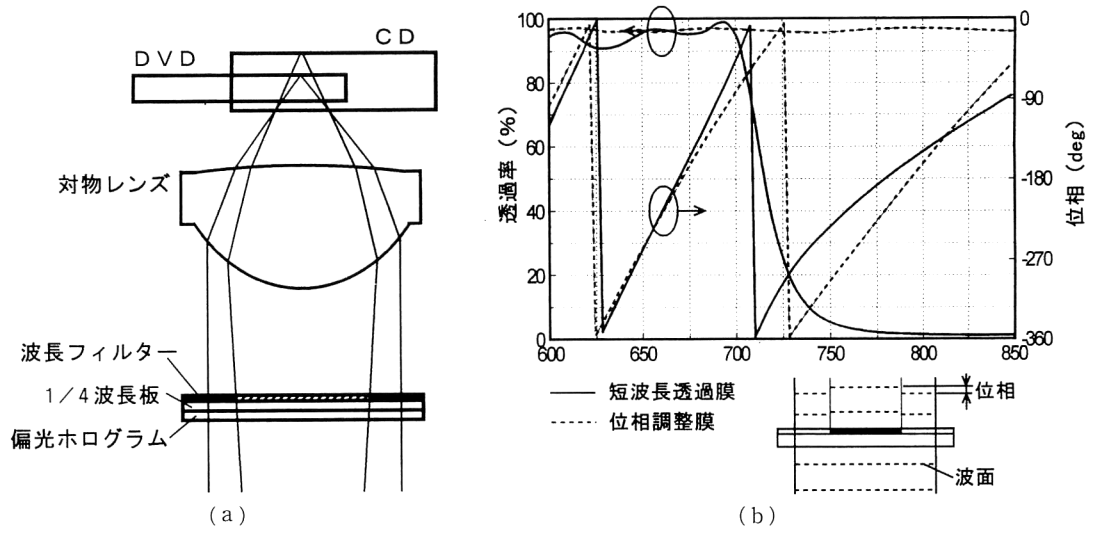


図10 有限系補正方式における開口制限と波長フィルター特性. (a) 有限系補正の開口制限, (b) 波長フィルター特性.

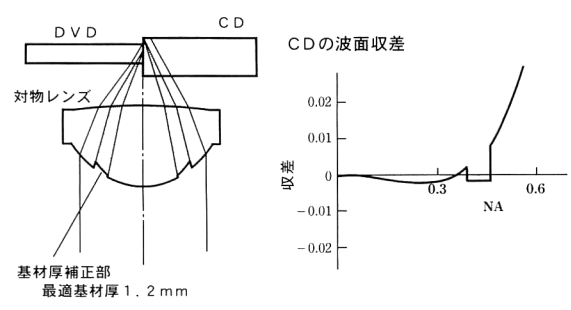


図11 輪帯基材厚補正方式における対物レンズの構成と波面収差.

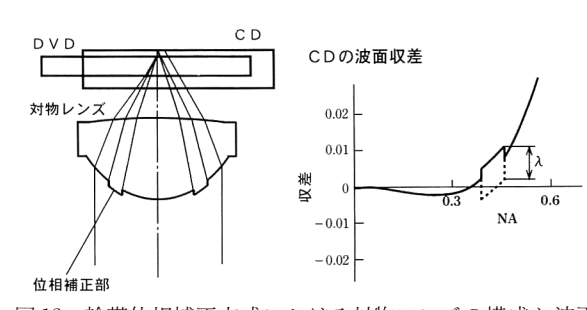


図12 輪帯位相補正方式における対物レンズの構成と波面収差.

DVDの再生においては、この輪帯領域が拡散し光検出器上に収束しないよう構成することで、輪帯遮光同様にDVDの性能劣化を少なくでき、実用的なジッターを得ることができる。さらに、CD、DVDとも無限系になるため、同一の光検出器を利用でき、光検出器を1つにすることができる。

一方、このような構成にするには、光検出器の受光面積がこの拡散範囲よりも小さくしなければならず、フォーカス検出はこれに適した非点収差法が用いられる。検出面積の大きいSSD方式とは相性が悪く、トラッキング干渉の点でRAM再生には工夫が必要である。

この輪帯領域と内・外周部には1~3 μm の段差があり、成形性のよい樹脂レンズが用いられている。樹脂レンズの球面収差は温度依存性があり、屈折率変化の少ない材料(-6.85 $\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)を使っても80 $^{\circ}\text{C}$ で45 m λrms の球面収差が発生する。一方、2層ディスクの基材厚は規格上、最適基材厚に対して+40~-50 μm ずれる。NA 0.6の対物レンズでは基材厚が50 μm ずれると約50 m λrms の球面収差が発生し、樹脂レンズの温度変化を加えると80 $^{\circ}\text{C}$ では球面収差が80 m λrms を超えて、安定に再生することがで

きない。対物レンズを保持する可動子には、フォーカス・トラッキング駆動コイルが巻回され、ドライブが起動すると短時間で温度が上昇する。可動子では80 $^{\circ}\text{C}$ 前後になり、集光レンズとの温度差は40 $^{\circ}\text{C}$ 以上になる。このため、対物レンズの温度変化による球面収差を集光レンズで補正することは困難である。DVD規格を満足させるための対物レンズの材質はガラスが適しており、輪帯に段差のあるガラス対物レンズの開発が望まれる。

3.3 輪帯位相補正

レンズ効果による収差補正だけでなく、位相操作によっても収差補正することができる。対物レンズの内周部と外周部は上記輪帯基材厚補正と同様に設計され、中間領域の輪帯部の位相をずらしてCDの収差を補正する方法が提案されている¹⁰⁾。図12に示すように、NA 0.41~0.46の輪帯領域をCDディスクを通して光を収束させたとき波面収差が最小になるように位相をずらす。図では輪帯部分が凸型になっており、ここを透過した光は内・外周部を透過した光に対して位相が遅れるが、1波長シフトした波面と内・外周部の波面とで形成される波面の収差を少なくしている。輪帯部分は凹型でもよいが、凸型にすることで内・

外周部との段差を小さくできる。シミュレーション結果では5%台のジッターが得られている。

DVD に対する輪帯領域の位相ずれは、波長差により CD と異なるため、CD に効果あり DVD に支障のないように構成することができる。また、CD、DVD とも無限光学系にできるため光検出器は1つで構成できる。

3.4 内周基材厚補正

2 波長方式では内周基材厚補正の対物レンズで DVD と CD の性能を両立させることは難しい。2 波長では対物レンズ内周部の NA が大きくなるため DVD の収差を考慮すると最適基材厚は 0.75 mm 以下にせざるを得ない。この基材厚補正では CD の球面収差が 100 mλrms を超えてしまう。そこで、上記輪帯位相補正との組み合わせで互換をとる方式が発表されている¹⁷⁾。

この方式は、1 波長方式に比べ内周部の NA を拡大した内周基材厚補正の対物レンズに、DVD、CD ともに収差を低減するよう輪帯位相補正を行うものであり、内周基材厚補正と輪帯位相補正の複合方式である。位相補正は対物レンズに設けられた輪帯状の溝によって与えられ、深さでその補正量が決められる。位相補正量は DVD で負、CD で正にすることで DVD/CD ともに収差が低減できるとしている。

CD 互換は、DVD の性能を犠牲にするものではなく、DVD の性能を維持して CD を再生するものである。しかし、光学系を収差だけで評価すると、ほとんどの場合 DVD の性能は劣化する。収差は重要な評価ファクターではあるが、性能を維持するという観点からは、ジッターを評価基準にして光学系を設計する必要がある。上記の例では、内周基材厚補正における高次収差の影響、CD 有限系/DVD 無限系のレンズシフト性能、輪帯基材厚補正の光学系などである。ジッターを改善するためには波面収差が増加することもあり、収差だけでは光学系の性能を正しく把握できない。これは従来の光ピックアップの設計とは異なる点であり、CD/DVD 互換光ピックアップの特徴でもある。

文 献

- 1) Y. Komma, *et al.*: "Dual focus optical head for 0.6 mm and 1.2 mm disks," *Optical Data Storage '94*, SPIE, **2338** (1994) 282-287.
- 2) 金馬慶明, ほか: "二焦点光ヘッド(III)", 第 56 回応用物理学学会学術講演会予稿集, No. 3 (1995) 956.
- 3) 土屋洋一: "ディスクフォーマットと互換性ピックアップ", 高密度記録のための DVD キーテクノロジー, JIEC セミナー資料 (1997) pp. 13-31.
- 4) 大滝 賢, ほか: "光ディスク用ヘッドへの液晶の応用", 映像情報メディア学会技術報告, Technical Report, **21**, No. 50 (1997) 1-6.
- 5) C. W. Lee, *et al.*: "A compact disc compatible digital video disc pickup using annular mask," *Dig. Int. Symp. Optical Memory and Optical Data Storage* (1994) p. 348.
- 6) 伊藤達男, ほか: "LD-PD ユニットの用いた DVD 用光ヘッド", 第 44 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-NF-1 (1997) p. 1071.
- 7) Y. Tanaka, *et al.*: "Lens design for optical head compatible with compact disk and digital versatile disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 2179-2183.
- 8) 山本博昭, ほか: "LiNbO₃ を用いた偏光分離素子", 第 40 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30a-B-1 (1994) p. 1045.
- 9) 毛利政就, ほか: 特開平 6-333255.
- 10) 篠田昌久, ほか: "ツインレンズ方式 DVD 用光ピックアップ", 光技術コンタクト, **31**, No. 11 (1995) 619.
- 11) 長島賢二, ほか: "異なる基材厚ディスクに記録可能な 2 レンズ光ヘッド", 第 45 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29a-ZK-8 (1997) p. 1122.
- 12) 笠澄研一, ほか: "LD-PD ユニットの用いた DVD 用 2 波長光ヘッド", 第 44 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-NF-2 (1997) p. 1071.
- 13) 山崎敬之: 特開平 9-306023.
- 14) 片山龍一: "波長選択フィルタを用いた基板厚 0.6 mm/1.2 mm 兼用光ヘッド", 第 23 回光学シンポジウム講演予稿集, 講演番号 16 (1998) pp. 49-50.
- 15) J.-H. Yoo, *et al.*: "An optical head with special annular lens for laser disc-compatible digital versatile disc pickup," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 2184-2188.
- 16) 荒井則一, ほか: 特開平 10-143905.
- 17) 島野 健, ほか: "CD 互換 1 レンズ DVD ヘッド", 第 23 回光学シンポジウム講演予稿集, 講演番号 18 (1998) pp. 55-56.

(1998 年 10 月 1 日受理)