光ディスク用対物レンズにおける回折を利用した高機能化

竹内 修一

ペンタックス(株) 研究開発本部 光学研究部 (〒174-8639 東京都板橋区前野町2-36-9)

Developing a High Function Objective Lens for Optical Disc Systems by Utilizing Diffracting Structure

Shuichi TAKEUCHI

Optical Research Department, Research and Development Headquarters, PENTAX Corporation,
2-36-9 Maeno-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174-8639

(Received November 9, 2006)

Because optical disc systems use a laser light source, the systems can easily utilize a diffractive optical element. Accordingly, high function objective lenses for optical disc systems have been developed as hybrid elements having diffractive and refractive surface. Achromatic hybrid objective lenses for MO drives, and objective lenses for DVD/CD compatible drives, are practical examples of such elements. Especially, almost all DVD/CD drives use hybrid objective lenses. In addition, hybrid objective lenses are being considered for use in new optical disc systems using a blue-laser.

Key Words: Hybrid objective lens, Optical disc system, Spherical aberration, Aperture control function

1. 背景

1.1 はじめに

回折光学素子の応用が進んでいる分野のひとつに光ディスク装置が挙げられる。光ディスク装置は、光源にレーザーを用いており使用波長帯域が限られていることから、回折光学素子を応用しやすいという背景があり、光分岐素子などで早い時期から回折素子が利用されてきた。その中でも、回折構造の位相(波面収差)付加機能を巧みに利用した屈折一回折型DVD/CD用対物レンズは、回折作用による高機能素子の好例である。ここでは、DVD/CD用対物レンズを含め、回折を利用することにより光ディスク用対物レンズの高機能化、高性能化を実現してきた技術を、設計を中心に紹介する。

1.2 光ディスク用光学系の概要

Fig. 1は、光ディスク装置でデータの記録・再生を担う光ピックアップの基本構成を表したものである。Laser Diode(LD)から出射された光はコリメートレンズを介して対物レンズへ導かれ、ディスク記録面上に微細なスポットを形成する。ディスク記録面のピットにより変調された反射光は光路を逆に辿り、Photo Detector(PD)へと導かれる。ピットの有無による戻り光量の変化を2値化することでデジタル信号の再生が可能となる。

光ピックアップは、安定した信号再生(あるいは記録)の

Fig. 1 Schematic view of the optical pick-up optical system.

ために、リアルタイムでフォーカシングやトラッキングのサーボを行っている。それには、光を分岐してその強度差、位相差を利用することが行われているが、光の分岐には回折格子や高機能ホログラフィック面が使われている。

対物レンズは、開発初期の頃には複数のガラスレンズを組み合わせた高価なものが使われていた。しかし、1986年にコニカ(現コニカミノルタ)によってプラスチック非球面単レンズが実用化されると、対物レンズは一気に簡略化され光ディスク装置の普及を後押しした。そし

て、通常の単レンズでは不可能な機能を追加するために、回折作用を利用した対物レンズが開発された。

2. MO用色収差補正対物レンズ

回折作用による色収差補正¹⁾は古くから研究されているが、実用化された例はあまり多くなかった。設計上は優れた特性が得られても、実現するには曲面上に回折構造を形成する必要があると作製が難しいことと、広い波長範囲で使用する光学系では波長による回折効率の低下が避けられない²⁾ことが課題として存在したためである。しかし、前者は、精密な回折構造金型を作製し、モールディングや射出成形によりレンズを得る手法が実用化されたことにより解消された。また、光ディスク装置では、使用する波長帯域が狭く後者も大きな問題とはならない。これらの理由から、回折色収差補正対物レンズの実用化が可能となった。

光ディスク光学系では光源にレーザーを用いることから、色収差補正の必要性は感じにくい、実際には無視しきれない状況も存在する。例えば、光源に使われるLDは、戻り光ノイズ低減のためにマルチスペクトルモードで発振させることが多い。あるいは、記録可能なドライブでは再生時と記録時とでLD出力に大きな差があり、出力切り替え時に波長が瞬間的に変化するモードホップ現象が起こる。いずれも、波長の幅としては1~数nm程度しかなく、色収差の量にして1μm以下のわずかな量ではあるが、回折限界のスポットを必要とする光ディスク光学系では致命的となる場合もある。

これに対し、旭光学(現ペンタックス)では1994年に、プラスチック製MO(光磁気記録)用対物レンズの表面に、ブレース化した回折構造(ミクロンオーダーの段差を持つフレネルレンズ構造)を形成することで、色収差を補正した単玉対物レンズを開発した³⁾。

このような屈折-回折ハイブリッドレンズは、構造上、段差部分での光量の損失(回折効率の低下)は避けられないが、それを如何に少なくするかが実用化に際し重要

Fig. 2 Diffractive-refractive hybrid achromatic objective lens for MO drive.

Fig. 3 Comparison of the residual chromatic aberration by compensation methods of chromatic aberration.

なポイントとなる。そのために、材料にはプラスチックが選択された。プラスチック材料は、大量生産に向くということもあるが、ブレース化した回折構造のような微細な形状を高精度で作り上げるのに適している。また、回折構造を光源側の面に設けている。回折構造をレンズのどちら側につけるかは、光学設計上はほぼ任意であり、鏡面コア加工上は面傾斜が緩いディスク側の面に形成する方が好ましい。しかし、色収差補正に必要な回折段差の数は光学系のどこにつけても同じであるため、光束径が小さくなるディスク側の面に回折構造をつけるのは、回折段差の密度が高くなるため不利である。加えて、ディスク側の面はディスク、あるいはユーザーが接触する可能性があり、回折構造の物理的強度を考えると不安がある。以上のことから、対物レンズの回折構造は光源側の面に形成することが多い。このような工夫により、ハイブリッドレンズが実用化された。

光学設計に当たっては、回折作用を表現する方法として光路差関数を定義する。光路差関数とは、光が回折面を通過する際に、屈折作用とは別に回折作用により与えられる光路長差を、レンズの光軸からの高さ h の関数として表したものであり、例えば(1)式のような形式で表現される。

$$\Phi(h) = (P_2 \cdot h^2 + P_4 \cdot h^4 + P_6 \cdot h^6 + \dots) \times m \cdot \lambda = \phi(h) \cdot m \cdot \lambda \quad (1)$$

$$\text{但し, } \phi(h) = P_2 \cdot h^2 + P_4 \cdot h^4 + P_6 \cdot h^6 + \dots$$

ここで、 P_i は i 次の光路差関数係数、 m は回折次数、 λ は波長である。 $\phi(h)$ はフレネルレンズ構造のゾーン数に対応し、 $\phi(h)$ が1増える(または減る)ごとに段差が形成される。 $m \cdot \lambda$ は段差の高さに対応する。色収差補正の場合、回折により与える作用は主に光学的なパワーであり、光路差関数でいえば2次項 P_2 のコントロールに相当する。回折面による色収差補正は非常に強力であり、Fig. 3に示すように、ガラス4枚構成の色収差補正と同等の色収差補正性能を単玉レンズで得ることができる。

3. 回折レンズによる球面収差の温度補償

プラスチック製レンズは温度変化で焦点位置や収差が

Fig. 4 The definition of Numerical Aperture.

変化する。収差とは、本来一点に集まるべき光線が正しく集まらない現象のことで、その中で光軸に対称な誤差成分を球面収差と呼んでいる。ピックアップ光学系はフォーカスサーボ機能を備えているため焦点位置変化は問題とならないが、記録密度の向上にともない対物レンズに要求されるNAが増大してくると、球面収差の温度変化が問題となる。これに対し、回折作用をうまく利用すると、この球面収差の温度変化を抑えることができる⁴⁾。なお、NA (Numerical Aperture; 開口数)とは光束の収束度を表す指標 (Fig. 4)で、NAが大きいほど集光スポットは小さくなる。

温度変化による特性変化は、レンズ材料の線膨張と屈折率変化により生じる。焦点位置変化は両者が影響するが、収差変化は屈折率変化の影響が主体となる。なぜなら、線膨張によるスケージングは収差も拡大、縮小させるが、基本的に無収差である光ディスク用対物レンズはスケージングしても無収差を維持するためである。厳密には、ディスクまで含めて全てがスケージングしなければ無収差は維持されないが、ディスク材料もプラスチックであり線膨張係数が大きく異なるわけではないので、事実上線膨張の影響は無視してかまわない。

通常の光学材料が持つ屈折率(1.5~2.0程度)の範囲で、屈折率の変化に対して球面収差が不変のレンズは、球面収差の補正と正弦条件(軸外コマ収差)を同時に満足しない。しかし、回折作用は回折面を持つ媒質の屈折率に依存しないので、正弦条件を満足し、かつ球面収差不変の屈折レンズに、残存する球面収差を回折作用で補正してやれば、アプラナティック(球面収差も軸外コマもない)でありながら屈折率変化に伴う球面収差の変化もないレンズができる。ただし厳密には、回折作用は線膨張の影響を受けることから、屈折率に対して球面収差不変というだけでは温度変化に対して球面収差不変とはならないので注意が必要である。補正する球面収差は概ねNAの4乗に比例し、光路差関数で4次の項をコントロールすると補正できる。なお、温度補償設計を実際の光ディスク光学系に適用する場合、LDの発振波長が温度変化にともないシフトすることまで考慮して設計を行う。

Table 1 Comparison of the optical specification between DVD and CD.

	DVD	CD
Wavelength nm	635~680	770~800
NA	0.60~0.67	0.45~0.53
Disc cover layer thickness mm	0.60	1.20

4. DVD/CD共用対物レンズ

4.1 DVDとCDの違い

1983年に登場したCDは僅か数年で既存の音楽媒体であるレコードを駆逐し、さらにパソコン用の記録媒体としても使用されストレージ市場にも確固たる地位を築いた。その後、1996年に登場したDVDはCDの約7倍の記録容量を持ち、映像媒体ならびにストレージ媒体として2000年以降急速に普及した。DVDの登場以前に、CDに代わる音楽媒体の候補としてDATやMDが存在し、ストレージ市場ではMOなどが現れたが、いずれもCDに対抗することはできなかった。その中で、DVDがCDに匹敵する市場に成長できたのは、単に「記録容量が多い」というだけでなく、「DVD再生機がCDも再生できる」ことが重要なポイントであったと考えられる。CDとDVDは、外見はほぼ同じで、どちらも基本的には直径120 mm、厚さ約1.2 mmのプラスチック製ディスクであるがTable 1に示すように光学仕様には違う点が多い。

4.2 球面収差の補正

Table 1の光学仕様の中で、レンズ設計上まず問題になるのが保護層の厚みである。保護層は、光学的に見れば平行平板で、平行光束が入射した場合には特に影響を与えないが、記録面に向かって集光していく非平行の光束が保護層を通過すると、保護層の厚みに応じて波面収差(球面収差)が発生する。通常は、保護層で発生する波面収差量を見越して対物レンズが設計されるが、ディスク間に0.6 mmもの保護層厚の差があると同じレンズを使うことはできない。例えば、通常のDVD用レンズを波長780 nm、NA 0.45の条件でCD再生に使おうとすると、一般にいわれる収差許容量の約2倍となる約 1.7λ の波面収差が発生する。これを解決するために考えられたのが回折作用の利用である。

松下電器の金馬ら⁵⁾は、対物レンズに入射する光を2つの焦点に分割した2焦点回折レンズを開発した。これは、レンズ表面に同心円状の回折構造を形成し、入射光束を同軸上の0次光と1次回折光の2つに分割したものである。そして、回折構造の影響を受けずに屈折する0次光は0.6 mmの保護層に合わせた収差補正、1次回折光は1.2 mmの保護層に合わせた収差補正とすることで、DVD、CDとも適切に収差補正された状態を実現している。このとき、回折面で与えられる光路差は

$$\Phi_{\text{DVD}} = \phi(h) \cdot m_{\text{DVD}} \cdot \lambda_{\text{DVD}} = 0 (\because m_{\text{DVD}} = 0) \quad (2)$$

$$\Phi_{\text{CD}} = \phi(h) \cdot m_{\text{CD}} \cdot \lambda_{\text{CD}} = \phi(h) \cdot \lambda_{\text{CD}} (\because m_{\text{CD}} = 1) \quad (3)$$

$$\Delta\Phi = \phi(h) \cdot \lambda_{\text{CD}} \quad (4)$$

となる。DVDの保護層に対して無収差のレンズをCD再生に使うと、CDの有効光束半径 h_{maxCD} では $-1.7\lambda_{\text{CD}}$ の波面収差が発生するので、(4)式より、 $\phi(h_{\text{maxCD}}) = 1.7$ となるように光路差関数係数を定めればよい。ここで、補正する波面収差は温度補償のときと同じくほぼNAの4次関数となるため、与える光路差は主に4次項 P_4 でコントロールする。

しかし、2焦点回折レンズは、光を分割してしまうためそれぞれの焦点位置に集光する光のエネルギーが低く、しかも再生に利用していない焦点に集光する光も受光部に戻ってきて大きなノイズとなるという欠点がある。それを改良したのが、旭光学の丸山が開発した2波長回折レンズである⁶⁾。2波長回折レンズは、どちらのディスクに対しても1次回折光を使うことで高い回折効率を維持しつつ、光源の波長の差を利用して残存波面収差を補正する方式である。(1)式で考えると、2焦点回折方式は m (回折次数)を変えることで波面収差に差をつけ、2種類のディスク保護層厚に対応した設計であり、2波長回折方式は λ (波長)を変えることで2種類のディスク保護層厚に対応した設計である。

2波長回折方式において回折面で与えられる光路差は

$$\Phi_{\text{DVD}} = \phi \cdot m_{\text{DVD}} \cdot \lambda_{\text{DVD}} = \phi \cdot \lambda_{\text{DVD}} \quad (5)$$

$$\Phi_{\text{CD}} = \phi \cdot m_{\text{CD}} \cdot \lambda_{\text{CD}} = \phi \cdot \lambda_{\text{CD}} \quad (6)$$

$$\Delta\Phi = \phi(\lambda_{\text{CD}} - \lambda_{\text{DVD}}) \quad (7)$$

となる。CDで補正すべき波面収差は $-1.7\lambda_{\text{CD}}$ なので、DVDとCDの波長をそれぞれ660 nm, 780 nmとすると、(7)式より、 $\phi(h_{\text{maxCD}}) = -11.05$ が得られる。2焦点回折レンズに比べると、必要な回折作用はかなり強くなることがわかる。このことは、実際にレンズ表面につける回折構造のピッチが細くなることを意味し、レンズの製造上は好ましい方向ではないが、DVD/CD用レンズでは許容される範囲に納まっている。

ところで、2波長回折レンズは光源が2種類必要である。Table 1に示すように、もともとDVDとCDとでは光源の波長が異なっているのだが、CD-audioやCD-ROMならばDVD用光源でも使用できる。そして、2焦点回折レンズは1つの光源だけでも適用できる(その場合、与える光路差は先の計算とは異なる)。したがって、2種類の光源を必須とする2波長回折方式は、場合によっては受け入れられない可能性もあった。ところが、DVDの普及と相前後して急速に広まったCD-Rは、記録層に使われている色素の吸収特性によりDVD用光源では使用できない。その結果、DVDとCDの両方に対応した製品ではCD-Rまでサポートするために2種類の光源を搭載するのが前提となり、光源が2つ必要という制約は欠点とは感じられなかった。逆に、回折効率が高い(設計上97%以上)という利点と、DVDとCDの共用のための回折作用が³⁾で述べた球面収差の温度補償にも有効であったことから、2波長回折レンズは他のどの方式よりも優れた特性を持つと評価さ

Fig. 5 Improvement of the focus servo signal by refining the aperture control function.

Left figure (before improvement) : A large noise (shown by circle in figure) appears.

Right figure (after improvement) : A noise is reduced.

Fig. 6 SEM photo of the diffractive-refractive surface of DVD/CD compatible objective lens.

れ急速に広まった。ただし、メディアに使われる材料の特性や、レンズ開発のタイミングによっては、別の方式が普及した可能性も十分に考えられ、その意味で2波長回折レンズは非常に幸運だったといえる。

4.3 CD使用時の開口制限機能

波面収差の補正とは別に、DVDとCDの両用を考える上でもうひとつ問題になるのがNAの違いである。同じレンズでNAを変えるためには、有効光束径を変えなければならない。そのためには、再生するディスクに合わせた可変絞りを用意するのが一番であるが、それでは低価格化が難しいため、2波長回折レンズでは光学的な開口制限機能を持たせている。この機能にも回折作用を利用している。

CDに必要な有効光束径の外側(便宜上、DVD専用領域と呼ぶ)は、DVDの温度補償を考慮した回折作用を持たせている。その場合、CDの再生時にDVD専用領域を通過した光はメインスポット周辺の半径5~20 μm付近に分布する。この光は再生信号そのものには影響を与えないが、Fig. 5に示すようにサーボ信号に影響を与えることがあり、その結果として信号が再生不能となる恐れがあるため、できる限り拡散させる必要がある。そこで、DVD使用時の回折作用による温度補償を維持しつつ、CD利用時は回折による光分岐作用を持たせることが行われている⁷⁾。例えば、DVD専用領域の回折構造を、DVDで3次の

回折光が強く発生するように設計すると、CDの波長の光は3次と2次の回折光に分配され、サーボ信号への悪影響が低減される⁸⁾。また、単純な次数の選択だけでなく、各フレネルゾーンの幅を複雑に変化させることにより、特定の場所への光の集中を抑えた設計も行われている⁹⁾。

これらの手法は、回折作用の持つ波面収差の付加機能と光の分配機能を巧みに組み合わせたものである。このように、回折作用をうまく利用して対物レンズが多機能化されたことにより、CD再生機能を持つ低価格のDVD装置が実現し爆発的な普及につながった。逆に、この事例が次なる光ディスク装置の開発において、ある意味、足枷となってしまう。

5. BD, HD DVD用対物レンズへの応用

DVDよりもさらに記録密度を上げ、ハイビジョン映像を2時間以上記録できる新しい光ディスクとして、Blu-ray Disc (BD)が2003年に、HD DVDが2006年に登場した。これらは、Table 2に示すようにCDともDVDとも異なる光学仕様となっている上、BDとHD DVD相互間も通常のレンズでは共用できない。

しかし、下位互換(従来のメディアの使用)が可能な装置でなければ普及しないというDVDまでの経験から、装置を開発する電機メーカー各社、あるいはユーザーは、当然、これらの新ドライブ装置がDVDやCDの再生装置として共用できることを期待する。

下位互換のためには、やはり何らかの方法で球面収差を補正する必要がある。HD DVDはNA、ディスク保護層厚がDVDと同じため、DVD用のレンズを流用できそうに思えるが、実際には波長が大きく違うために球面収差が発生し、通常のレンズでは流用できない。球面収差の補正手法には、回折作用を利用する以外にも対物レンズに入射する光束の発散/収束度を変える方法や、液晶のような位相変調素子を使う方法が知られており、これらと回折作用の利用とを組み合わせることで実現することが考えられている。なぜ、回折作用だけでは駄目かというと、回折による球面収差の補正効果と回折効率とがトレードオフの関係にあるためである。

回折により波面収差の差を発生させる効果と回折効率は、輪帯段差部で与える光路長差に左右される。2つの波長の光が回折面を通過するとき、段差部で与えられる光路長差が両方の波長の整数倍(公倍数)の場合、両方の波長で100%の回折効率が得られるが、どちらの波長に対しても同じ波面収差を与えるため波面収差の補正効果はない。逆に、段差部で与えられる光路長差が両方の波長の

Fig. 7 Alteration of the wave-front via the diffractive surface.

(Upper) When 2nd-order diffraction light strongly appears at the wavelength of 405 nm (Left figure), 1st-order diffraction light of the same diffraction angle strongly appears at the wavelength of 780 nm (Right figure).

(Lower) When the 3rd-order diffraction light strongly appears at the wavelength of 405 nm (Left figure), the wave-front of the adjacent zones do not adjust at 780 nm. And then, the light of the wavelength of 780 nm is separated to 1st-order and 2nd-order diffraction light. The diffraction angles are different from the 3rd-order diffraction angle of the wavelength of 405 nm both (Right figure).

公倍数からずれている場合は、波面収差の補正効果は高くなるが、光が複数の次数に分配されてしまい回折効率は低くなる。DVDとCDの場合は、輪帯段差部で与える光路長差を両波長の中間に選ぶと、回折効率が高い上に波面収差の補正効果が十分に得られた。ところが、青色光(405 nm付近)と赤(650 nm付近)、赤外(780 nm付近)では適当なバランスとなる次数の組み合わせが存在しない。特に、青と赤外とは、波長の比がほぼ1対2である。そのため、青で偶数倍の光路長差を選ぶと赤外でも整数倍となり回折による波面収差の補正効果が得られず、青で奇数の光路長差にすると赤外では整数から約0.5ずれて光が完全に分配される。したがって回折作用だけでは、高い回折効率を持ちながら波面収差を補正することができず、これが3波長対応の難しさにつながっている。生産量の少ない写真用レンズでは、回折効率と収差補正効果を両立した積層型回折素子¹⁰⁾が実用化されているが、生産数が年間で数億台に上る光ディスク装置にこの技術をそのまま適用するのは容易ではない。

6. おわりに

光ディスク用対物レンズは、樹脂レンズ化による大幅な軽量化、低価格化がCDの普及を後押しし、回折レンズ化による下位互換の実現がDVDの普及に貢献した。このように、光ディスク装置の普及と市場拡大には対物レンズの新たな進歩が重要な要素となっている。青色光を使った光ディスク装置の普及も、対物レンズの改良が鍵となる可能性は高い。それが、回折現象を利用したもの

Table 2 Comparison of the optical specification between BD and HD DVD.

	BD	HD DVD
Wavelength nm	405	405
NA	0.85	0.65
Disc cover layer thickness mm	0.10	0.60

になるのかはわからないが、今後、どのような技術が対物レンズを進歩させていくか注目される。

参考文献

- 1) T. Stone and N. George: Appl. Opt. **27** (1988) 2960.
- 2) D. A. Buralli, G. M. Morris, and J. R. Rogers: Appl. Opt. **28** (1989) 976.
- 3) 丸山 晃一：第41回応物関係連合講演会予稿集 29a-L-11 (1994).
- 4) K. Maruyama and J. Kamikubo: ODF'98 TuA3 (1998).
- 5) Y. Komma, S. Nishino, and S. Mizuno: Opti. Rev. **1** (1994) 27.
- 6) 丸山 晃一：Optics Japan '99 23Aa6 (2000).
- 7) 大田 耕平, 小嶋 俊之：特開2001-338431.
- 8) K. Maruyama, S. Takeuchi, and R. Ogawa: ISOM'01 We-C-06 (2001).
- 9) S. Takeuchi, K. Maruyama, and K. Yamanaka: ISOM'04 We-G-05 (2004).
- 10) 小川 秀樹, 中井 武彦：写真工業 **58** (2000) 72.

レーザーワード

ハイブリッドレンズ(hybrid lens)

屈折作用と回折作用とを併せ持つ光学面を持ったレンズのことで、より詳しくは「屈折一回折ハイブリッドレンズ」という。回折作用を持つことに注目し、単に回折レンズと呼ぶ場合もあるが、平板上に回折構造を形成し屈折作用を持たない純粋な回折レンズと区別するために、ハイブリッドレンズと呼ぶほうが好ましい。屈折と回折という二つの光学作用を複合することから多機能化が可能

だが、製造上の制約から光ディスク用対物レンズで実用化される以前はあまり利用されていなかった。

なお、ガラスの球面レンズに非球面性を持たせた薄い樹脂層を乗せることにより、ガラスの対候性と非球面効果を両立させたレンズもハイブリッドレンズ(ハイブリッド非球面レンズ)と呼ぶので注意が必要である。

(竹内 修一)