

ホログラフィックメモリー用対物レンズの開発

Development of an Objective Lens for Holographic Data Storage

橋 村 淳 司*
Hashimura, Junji

野 口 一 能**
Noguchi, Kazutaka

要旨

次世代の大容量光メモリーとして期待される技術にホログラフィックメモリーがある。ホログラフィックメモリーは2次元のページデータを記録媒体の同じ場所に複数記録する多重記録が可能で、大容量かつデータ転送速度の速いメモリーが実現できる。ホログラフィックメモリーに用いられる対物レンズの設計では、2次元の画像データを3次元のホログラムとして記録するため、像面性が特に重視される。我々は、ホログラフィックメモリー用の対物レンズをいくつかの構成枚数で設計し、その特性を比較した。またホログラフィックメモリーの中で最も注目されるコリニアTM方式の対物レンズの設計と試作を進め、お客様に記録・再生の評価を頂いた。本稿ではこれらの結果について報告する。

Abstract

Holographic data storage may well provide the next-generation high-capacity data storage technology. Holographic data storage allows recording of two-dimensional page data into a volumetric recording layer, thereby delivering high storage capacity and high data transfer rates. In designing objective lenses for such systems, image-height characteristics are especially important because two-dimensional image data is recorded as a three-dimensional hologram. With this in mind, we designed several pairs of objective lenses or lens groups and compared their characteristics. We also designed an objective lens for Optware Corporation's CollinearTM holography system, which employs co-axially aligned information and reference beams, and we furnished them with sample objective lenses for their evaluation of read/write characteristics. Details of these developments are reported here.

1 はじめに

次世代の光メモリーでは、データの記録や保管用途として信頼性の確保や更なる大容量化・転送速度の高速化が要望されている。大容量化ニーズに応える現行DVD/CD技術トレンドでのキーワードには、光源の短波長化、対物レンズの高NA化、メディアの多層化がある。これらについては青色レーザー（波長405 nm）や、NA0.85対物レンズ、2層ディスクといった技術が実用化され世に出始めている。市場では2011年の地上波デジタルへの完全移行に向けた次世代ブルー用光ディスクとしてBlu-ray Disc¹⁾とHD DVD²⁾の2つの規格が凌ぎを削っており、膨大な情報を扱うことが当たり前となりつつある。大容量化の波は今後も続くと考えられ、現行の技術トレンドを打破し更なる大容量化を目指した次世代の更に次の世代を担う技術が待望されている。

その大容量（高密度）化技術キーワードは何か？という問いに対し現在いくつかの技術が提案されている。それらは以下のような分類が出来る。³⁾

(1)スポット径の更なる極小化

近接場, SIL, Super-RENSなど

(2)多値化, 多重化

多値化, 波長多重, 量子メモリーなど

(3)多層化, 体積記録

3次元多層記録（2光子吸収）, ホログラフィックメモリーなど

それぞれの技術が現在のディスク容量から1桁も2桁も上の高密度化の可能性を秘めている。

これら技術の中でホログラフィックメモリーはブレイクスルーの有力候補として近年注目を集めている。その歴史は古く、1948年のGaborによるホログラム⁴⁾の発明当時からメモリー用途が想定されていた。1970年代まで研究開発が活発化した時期もあったが、ここに来て再び脚光を浴びている。

我々はホログラフィックメモリーに用いる対物レンズの設計を行った。ホログラフィックメモリーの原理から、対物レンズは、軸外の像面性を重視して設計しなければならないなど、従来の光ピックアップ用対物レンズと違った設計要件を満たす必要がある。これにより、従来1枚、または多くとも2枚であった対物レンズの構成枚

* コニカミノルタオプト株
C&Dソリューションズ事業本部 OC事業部
** コニカミノルタオプト株 研究開発センター 基盤技術部

数が3枚、4枚と増加する。そこで対物レンズの構成枚数を変えた設計の特性を比較した。またホログラフィックメモリーの中で注目されているコリニアTM方式^{5),6),7)}（コアキシャル）の対物レンズ設計と、試作を行った。対物レンズは3枚構成でプラスチックレンズを2枚使用しており、重量とコストにおいて優位性をもっている。本稿ではこれらの設計・試作の結果について報告する。

2 ホログラフィックメモリーの原理

ホログラフィックメモリーは、2次元のページデータを、記録媒体にホログラム画像として記録し、再生する、3次元メモリーである。その記録・再生の原理をFig.1に示す。

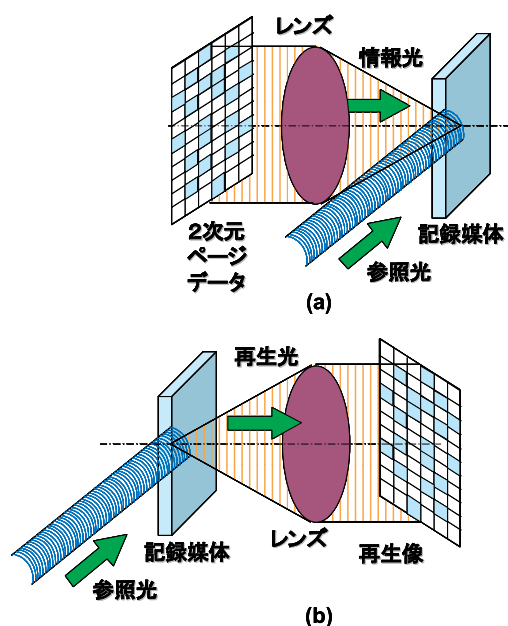


Fig.1 Principle of holographic data storage: (a) record, (b) playback

情報の記録は2次元のページデータを物体光として記録媒体に照射して行う。ページデータは一般に液晶やDigital Micromirror Device (DMD)⁸⁾等の空間光変調器 (SLM) によって作成される2次元イメージである。この2次元イメージを（多くの場合）レンズによって記録媒体に結像させる。ホログラム記録を行うにはこの物体からの光（物体光）と同時に参照光が必要となる。2つの光束を記録媒体中で干渉させ、出来た干渉縞の明暗をホログラムとして記録するものである（Fig.1(a)参照）。一方、情報の再生はFig.1(b)に示すように、Fig.1(a)の方法で記録されたデータに記録の時と同じ系を用いて参照光のみを照射することによって行う。ホログラムによって回折された参照光がレンズを介して元の2次元ページデータ画像として結像し、再生される。更に参照光の入射角度を少しずつ変える、使用波長を変える、等を行う

ことで、記録媒体の同じ場所に複数ページを記録し再生する、いわゆる多重記録・再生も可能となる。

以下の項では、ホログラフィックメモリーに用いる対物レンズについて述べる。対物レンズの設計に必要な要件を明らかにし、レンズ構成枚数を変えたいくつかの設計例を示す。

3 対物レンズへの要求事項

3.1 物体側NA(空間光変調器による回折)

第2項で述べたようにホログラフィックメモリーの2次元ページデータの表示には一般的にSLMが用いられることが多い。ここでFig.2に示すように、SLMにレーザー光が平面波として入射すると、光はSLMの各画素で回折される。その回折角 θ は、以下の関係で表される。

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (1)$$

ここで、 d はSLMの1画素の大きさ、 λ は入射光の波長、 m は回折次数である。この関係より、SLMで回折された光の内どの回折次数の光までを結像に寄与させるかが、対物レンズの物体側NAを決める、ということが分かる。

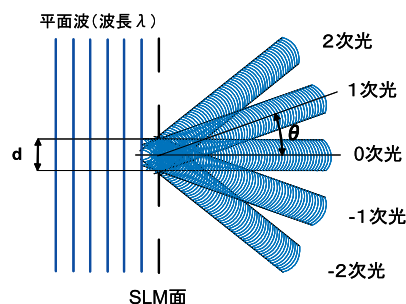


Fig.2 Diffraction of incident wave by SLM pixel. d: pixel size

Fig.3にコヒーレント光でSLMの各画素を照明し、0次と ± 1 次の回折光を対物レンズで集光した場合の像の光強度分布を示す。

低次の回折光のみが結像に寄与する場合、SLMの矩形強度分布が正確に再現できない。SLMの矩形像を正確に

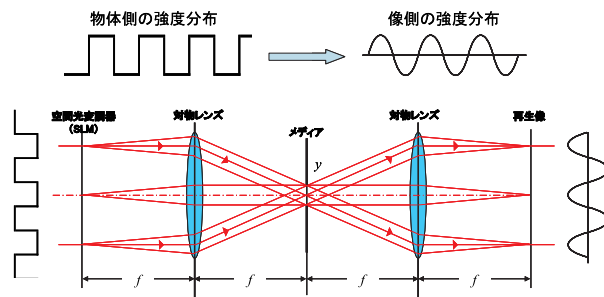


Fig.3 Coherent image of diffracted light source into 0, +1st, and -1st order

再現するには、高次の回折光が必要となる。しかし、高次回折光を考慮すると、NAが大きくなることで対物レンズの構成枚数が増えてしまう。また、高次の回折光は低次の回折光に比べ回折効率が低く、対物レンズの物体側のNAを上げたとしても効率的に強度分布が再現されない、という問題もある。そこで我々は、レンズの構成枚数を重視して、 ± 2 次より高次の回折光は考慮せず、0次、 ± 1 次光のみが結像に寄与する仕様で対物レンズの設計を行った。

3. 2 補正すべき収差

CDやDVDに代表される従来の光ディスク用の対物レンズは情報記録面上に微小スポットを形成するために、球面収差と正弦条件を補正した設計となっている。それに対し、ホログラフィックメモリー用の対物レンズは2次元ページデータをホログラム記録媒体中に記録し、再生された光をCCDやCMOS等の2次元光検出器上の一つの像面に結像しなくてはならない。そのため、像面性も含めた収差の補正が必要となり、従来の光ディスク用対物レンズよりも、ステッパレンズやカメラレンズといった2次元画像を2次元の像面に投影する光学系に近い構成となる。以下では、ホログラフィックメモリー用の対物レンズで、球面収差と正弦条件以外に補正すべき収差について述べる。

3. 2. 1 像面湾曲

上で述べたようにホログラフィックメモリー用対物レンズは2次元のページデータを、2次元の像面（光検出器上）に結像させるため、像高特性が重視される。また記録と再生を考慮して光学系を展開してFig. 4のようなタンデム配置とすると、レンズの像面湾曲は、それぞれのレンズが持つ像面湾曲の足し合わせとなる。通常の像面は平面なので全像高で像面湾曲を補正する必要がある。

3. 2. 2 歪曲収差

SLMの画素位置とセンサ上の結像位置は、1対1の関

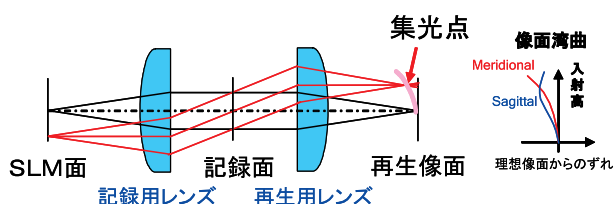


Fig.4 Field curvature obtained with identical objective lenses arranged in tandem

係にある。従って光学系に歪曲収差があると、本来結像すべき位置に別の画素で回折された光が結像して、それがエラーとなってしまふ。このようなエラーを無くすため、ホログラフィックメモリー用対物レンズの歪曲収差は、小さくしなければならず、製造において特に厳しい精度が求められる。

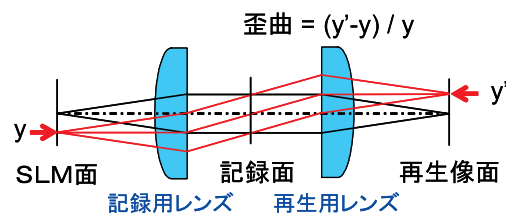


Fig.5 Distortion obtained with identical objective lenses arranged in tandem

但し、Fig. 5 のようなタンデム配置では、設計上の歪曲収差をレンズ同士でほとんど打ち消すことが出来る。

4 ホログラフィックメモリー用対物レンズの設計例

我々は、第3項の設計要件を満たしながら、構成枚数の低減を意識して、3群以下という構成でレンズ枚数を変えた設計を行った。Fig. 6 は1群、2群、3群のレンズ構成を示す図である。また、それぞれの像面湾曲、ペッツバル和（PTZ）をFig. 7 に示す。各レンズの正弦条件違

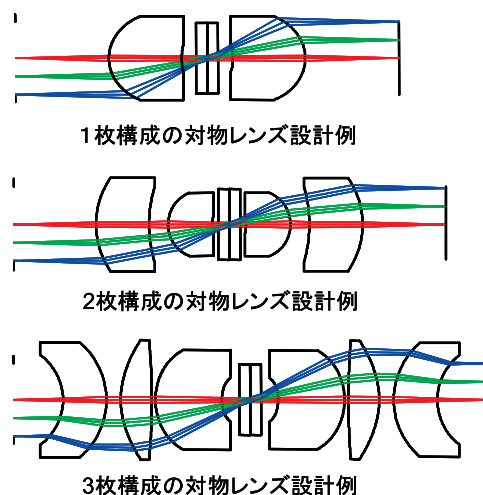


Fig.6 Cross-section views of lenses designed. (f5mm, NA of objective side is 0.03.)

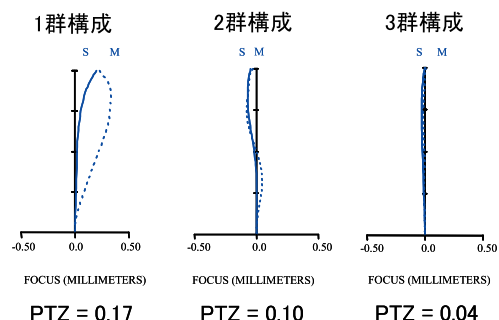


Fig.7 Field curvature and Petzval sum of each pair of lenses or lens groups in Fig.6

反量は、1群構成-0.004、2群構成+0.004、3群構成-0.001である。正弦条件違反量を同程度にした場合、レンズ構成枚数が増えるほど像面湾曲を小さく設計することが可能となる。

Fig. 8は各レンズのタンデム配置での歪曲収差を示している。全てのレンズタイプで歪曲収差が補正されている。

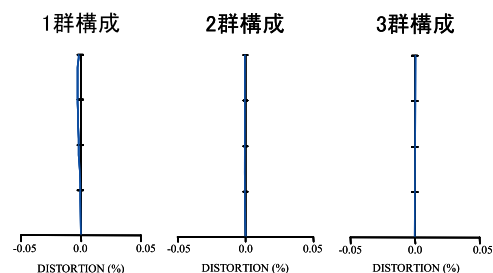


Fig.8 Distortion of each pair of lenses or lens groups in Fig.6

5 ホログラフィックメモリー用対物レンズの設計・試作

5.1 対物レンズの仕様

Fig. 9はコリニアTM方式のホログラフィックメモリー用光学系の構成である。我々はこの光学系に用いる対物レンズの設計と試作を進めた。

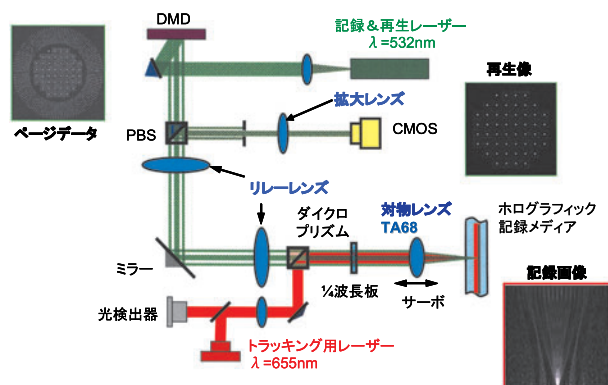


Fig.9 Optical configuration of CollinearTM holography

コリニアTM方式は参照光と物体光が同軸状に配置していることと反射型としていることが特徴で、1つの対物レンズで記録と再生を行うことが出来るので、システムの簡素・小型化が達成できる。またフォーカシング/トラッキングサーボは、同じ対物レンズを用いて、異なる波長の光を、ディスク表面からの深さが異なるサーボ用ピット上に集光することで行う。これについては、対物レンズの共役長を変えることで対応が可能である。Table 1に対物レンズの設計仕様を示す。

Table 1 Specifications of objective lens designed for CollinearTM holography

レンズ構成	3群3枚
レンズ重量	1.8g
波長	532nm
物体側テレセントリック使用時	物体高 ±2.50mm
	物体NA 0.035
	焦点距離 5mm
	ディスク基板厚 1.2mm
物体間距離∞での単体使用時	NA 0.5
	NA 0.49
サーボ用波長での単体使用時	波長 655nm
	焦点距離 5.08mm
	ディスク基板厚 1.3mm

5.2 対物レンズの設計

対物レンズを設計するに当たって、我々は、レンズのコスト、アクチュエータへの搭載を考慮した軽量化、を意識して、以下の2点に重きを置いた。

- ・レンズ構成枚数の削減
- ・レンズのプラスチック化

設計した対物レンズ構成をFig.10に示す。目標の設計特性とするため、少なくとも3枚構成とする必要があった。また、出来るだけプラ化を考え、光源側から順に、第1レンズにガラス、第2、第3レンズにプラスチックを採用した。物体からの光束の幅が第1レンズ面上で特に細く、モールドレンズの金型加工時に発生するツールマークが局所的な歪曲収差の要因となって問題となると考えたため、第1レンズのみをガラス球面の研磨レンズとした。

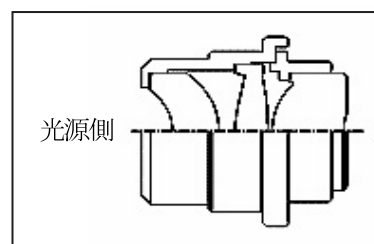


Fig.10 Cross-section view of objective lens designed for CollinearTM holography

5.3 対物レンズの試作結果

次に本レンズの試作結果について述べる。試作したレンズの外観写真をFig.11(a)に、その干渉計測定波面をFig.11(b)に示す。ここで波面測定は、波長405nmの光を用いて行った。またお客様（オプトウエア社様）での記録・再生実験の結果をFig.12に示す。本試作レンズを用いて正常に記録・再生が出来ていることが分る。

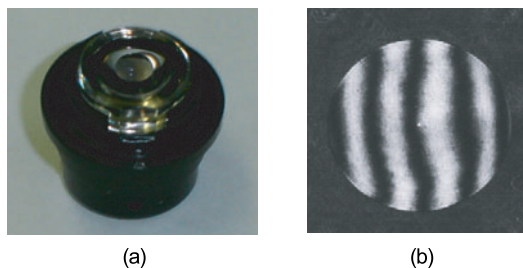


Fig.11 Test sample appearance and wavefront aberration:
(a) appearance, (b) wavefront aberration (0.03λ
ms@ $\lambda = 405\text{nm}$)

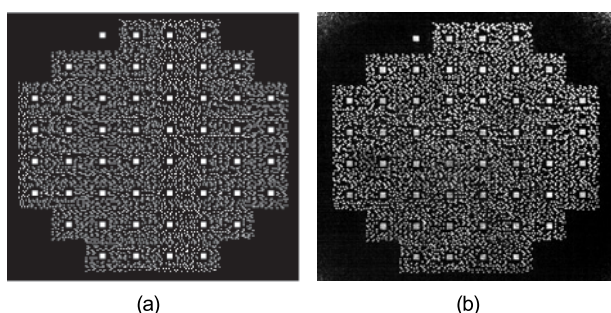


Fig.12 Test sample read/write evaluation: (a) incident 2D
page data, (b) reconstructed page data

6 まとめ

我々はホログラフィックメモリーに用いる対物レンズとして必要となる要件を加味しながら構成枚数を変えた設計を実施し、特性の違いを調べた。構成枚数が多ければ特性が良くなるのは当然の結果であるが、レンズ仕様や許容レベルによって最適な枚数を選択するための指標が出来たと考えている。また、今回試作したコリニアTM方式のホログラフィックメモリー用対物レンズは、一次試作として十分な結果を得たと考えている。製品化に向けてクリアすべき課題がまだまだ多いと思われるが、今後も各課題をクリアしながらお客様ニーズに見合った対物レンズの開発を進めていく。

●参考文献

- 1) [http:// www.blu-raydisc.com/jp/index.html#](http://www.blu-raydisc.com/jp/index.html#)
- 2) <http://www.hddvdprg.com/jpn/hddvd/index.html>
- 3) 志村 努 監修, “ホログラフィックメモリーのシステムと材料”, シーエムシー出版(2006)
- 4) D.Gabor, Naure, **161**, 777 (1948)
- 5) H.Horimai, and X. Tan., Optical Review, **12**(2), 90 (2005)
- 6) 堀米 秀嘉, 譚 小地, 北崎 信幸, 金子 和, 李 駿, 日経エレクトロニクス, **2005.1.17**号, 105 (2005)
- 7) H.Horimai, X.Tan, and J.Li, Applied Optics, **44**(13), 2575 (2005)
- 8) [http:// www.dlp.com/](http://www.dlp.com/)