

文章编号: 1001-3806(2005)02-0116-03

0.85 数值孔径双非球面单片物镜的设计

田静怡, 巩马理*, 闫平, 崔瑞桢, 韦宁

(清华大学 精密仪器系 光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

摘要: 设计了超高密度光盘存储的核心元器件——0.85 数值孔径的单片物镜。设计中采用了 3 种方法, 即两种商业软件 Zemax 和 CodeV 以及新型的 CEDDA (离散定义非球面) 算法。设计采用国际最新的单片双非球面的物镜形式, 在考虑了偏心误差、视场倾斜角等实际制造工艺与使用条件的情况下, 在合理的结构范围内, 设计出的透镜波像差的 RMS 值可控制在 $1/30\lambda$ 以下, 达到了实际应用的技术要求。

关键词: 光盘; 单片物镜; 非球面; 数值孔径

中图分类号: O435.2 **文献标识码:** A

The design of bi-aspherical single objective lens with numerical aperture of 0.85

TIAN Jing-yi, GONG Ma-li, YAN Ping, CUI Rui-zhen, WEI Ning

(Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A single objective lens with numerical aperture of 0.85 is designed as the coral component of the super high-density optical disk system, which is done with three tools respectively, i.e. two business optical design softwares Zemax and CodeV and the latest CEDDA (characteristic equations discretely defined aspherics) method. The design adopts the latest form of the single bi-aspherical lens in the world with the consideration of decenter error in the manufacture, field error in the application and a reasonable structure in practical application. So that the objective lens has a RMS wavefront error less than $1/30\lambda$ and meets the technical requirement.

Key words: optical disk; single lens; aspheric; NA

引 言

光盘的存储容量主要取决于激光光源的波长 λ 和物镜的数值孔径 (NA)。光盘读出光斑的大小与 λ/NA 成正比, 而光斑的大小直接决定了存储容量的大小, 因此, 在光盘发展史上这两个参数具有举足轻重的地位。2002 年 2 月 19 日, 索尼、飞利浦、松下 3 家公司联合日立、先锋、三星、LG、夏普和汤姆逊共同发布了 0.9 版的 Blue-ray Disc (简称 BD) 技术标准, 正式表明了下一代 DVD 候选人——蓝光光盘的诞生。蓝光光盘系统采用波长 405nm 的半导体激光器作为光源, 物镜的数值孔径高达 0.85, 最小记录坑点长度为 $0.138\mu\text{m}$, 沟槽记录轨距 $0.32\mu\text{m}$ 。目前, BD 最为可行的最高容量 (27Gbit) 大约相当于现行 DVD 的 5 倍。这一容量足以保证在画质不变的情况下, 录制两个多小时的 HDTV 节目。为了尽快进入蓝光光盘产业化市场, 需要掌握包括 BD 高数值孔径物镜在内的各项关键技术, 形成自主知识产权的产业化体系。由于高

NA 单片物镜的设计与制作存在较大难度, BD 物镜的发展经历了由双片物镜向单片物镜的艰难历程。索尼公司早在 1996 年就设计出了数值孔径达 0.8 的双片物镜, 但是单片物镜的设计直到最近才有了重大突破^[1]。

本文中就对 BD 单片 NA = 0.85 物镜的设计进行了讨论, 介绍了非球面物镜的设计理论和计算机设计过程, 给出了传统商业软件和新型的 CEDDA 算法的设计结果, 并对镜头性能进行了评价和对比。

1 光学头单片物镜的设计理论

数字光盘的数字记录, 通过离散坑点的长度序列进行编码, 这些编码将通过高精度的电信号复原, 即信号的读出必须是高保真的。因此用于光学头数据读写的物镜, 在一定视场内至少应该达到衍射极限性能^[2]。这里所谓的衍射极限是指经过认真校正像差后, 波面像差的均方根 (RMS) 小于 $\lambda/14$ 或 0.07λ 的状态。衍射极限下的光学系统剩余像差中主要包含球面像差和彗差, 对于光学头的物镜来说, 必须对这两种像差进行特别校正, 以获得优质的读出信号^[3]。

非球面是实现像差校正的有效方法, 但是, 根据三级像差理论, 只有一个非球面的物镜不能同时校正球面像差和彗差。此外, 由于镜头制造中通常用的材料

作者简介: 田静怡 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计、光学精密测试、光学信息处理等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gongml@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-03-31; 收到修改稿日期: 2004-06-17

(包括玻璃和塑料)折射率较低,在 1.45~1.9 之间,而在折射率较低的情况下需要采用两面非球面的物镜形式才能获得足够的像场直径^[2]。综合以上因素,高数值孔径的单片物镜以采用双非球面的形式为宜。

这种对像差进行特别校正后的物镜称为消球差物镜。但由于加工过程中伴有误差,消球差条件很少能够维持。因为对于非球面物镜来说,如果偶数曲面之间产生偏心,则产生轴上彗差,消球差条件随之崩溃。所以,在大批生产单片物镜的注塑成型过程中,加工的偏心误差不能超过最大允许值,以限制彗差于最小允许范围内。研究显示,对于双非球面物镜来说,彗差的大小与物镜中心厚度大小密切相关。高级别的彗差在透镜中心厚度较小的范围内变化不大,而三级彗差的变化却很大。因此,可以调整物镜厚度,消除高级次的彗差而仅仅保留少量的三级彗差,这种操作方法称为像差补偿。基于以上理论,在设计中要努力找到合适的厚度值,使其偏心误差灵敏度达到最小。

2 蓝光光盘物镜的计算机设计

按照 0.9 版本的 BD 技术标准,系统的固定参量有:数值孔径 $NA=0.85$,光盘盘基折射率 $n_d=1.58$,光盘盘基厚度 $t_d=0.1\text{mm}$ 。其物镜-光盘系统工作结构如图 1 所示。其中, C_1 、 C_2 分别为物镜前后两表面的一次曲率; D 为物镜前表面通光口径; t 为物镜轴向中心厚度;工作距离为 L 。

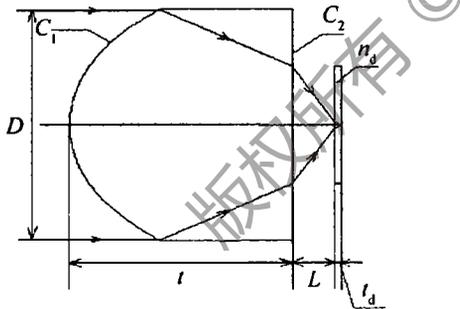


Fig 1 Working configuration of lens-disc system

从以上系统基本参数可知,用于 BD 系统的物镜数值孔径从传统 DVD 的 0.6 提高到了 0.85,提升比率为 1.42。由于球面像差和数值孔径的 4 次方大致成正比,因此,BD 系统单片镜头的允许误差限是传统 DVD 镜头的 4 倍,为物镜的设计造成了很大的困难。因此,设计人员不仅要物镜的焦距、工作距、尺寸控制在实际应用所要求的合理范围内,而且要使镜头具有更好的光学特性和更为严格的制造误差灵敏度。

2.1 一般商业软件的设计

利用商业软件设计的初始系统不必是一个特别良好的镜头,往往可以采用一个和期待系统接近的粗糙系统。设计结果的好坏关键在于设计人员的经验以及

对参数的分析和及时调整。此外,在优化过程中还要根据像差和像质的分析结果来确定自变量的数目和有效性,以便及时进行工作方向的调整。下面就初始参数的确定及优化变量的选取做一讨论。

根据国外相关文献和 BD 系统实际构造的要求,初步确定镜头后焦距 $f'=2.286\text{mm}$,物镜材料折射率 $n=1.78$ (材料为玻璃,目前,尚无此折射率的塑料可供选择),物镜自由工作距离 $L=0.6\text{mm}$,物镜轴向中心厚度 $t=3\text{mm}$ 。根据这些已知条件,可以通过以下公式确定物镜前后两表面的一次曲率 C_1 、 C_2 和一次曲率半径 r_1 、 r_2 。

$$C_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{t} \times 1 - \frac{L + t_d/n_d}{f'} \times \frac{n}{n-1} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{\frac{f'}{n} \times n - \frac{n}{n-1} \times r_1}{f' \times n \times r_1 - f' \times (n-1) \times t} \quad (2)$$

式中, n_d 为光盘盘基折射率, t_d 为光盘盘基厚度。

在优化过程中,二次曲面系数和高次非球面系数应当作为变量;其次,对近轴曲率半径等参数应当进行适当的修正。因物镜在实际工作中与盘片的距离是可调的,故应该定为变量。值得注意的是,根据笔者经验,镜头的中心厚度不能在优化过程中定为变量,否则可能会导致无法预期的计算结果。另外,物镜是在一定视场内工作的,需要同时优化轴上和轴外性能,一般可将半视场角定为 0.5。考虑到补偿物镜制造过程中由于偏心造成的轴外像差,可将偏心量定为 $\pm 5\mu\text{m}$ 。

2.2 CEDDA 法的设计

由于光学头装配过程中存在误差,并且物镜在实际工作中不断地由力矩器带动而进行高速的寻迹和聚焦,不可避免会产生晃动。这些因素造成了光学系统的非轴上成像,所以,需要物镜在一定的视场角度中都具有良好的光学性能。为了解决大数值孔径物镜的视场不足问题,笔者提出了一种新的设计非球面的方法^[4],离散定义非球面特性方程。该方法采用离散的定来取代解析定义,因而任意的非球面面形可以自动的逐点求解。该方法系统初始参数的确定与前面大致相同,程序运行时对球面镜的近轴区域进行光线追迹,确定相关关键点的坐标,而后用含参数的牛顿算法进行自动迭代,逐点确定面形。其最后结果和采样点数的设定和迭代初始值的确定密切相关。

3 设计结果与讨论

两种商业软件与 CEDDA 设计的物镜面形对比图见图 2。

由图可知,在入瞳高度 y 取值较小的区域,相应的面形几乎完全重合,当 y 增加的时候,面形间的差异逐

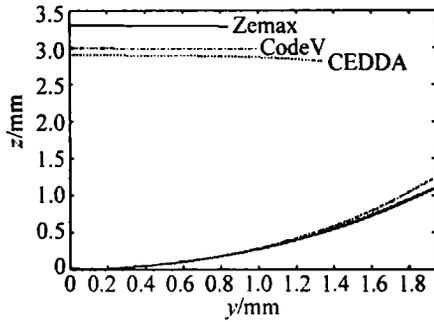


Fig 2 Contrast of the lens surface shape designed by three methods
 渐增大。后续对于光斑半径和 RMS的分析对比显示, CEDDA 法的设计结果更接近理想成像的情况。故如果把 CEDDA 设计出来的物镜面形作为“理想面形”的话,上述现象可以解释为,在小口径的情况下理想面形可以用高次多项式的形式得以表达,随着口径的增大和面形的加深,常规方法规定的非球面解析式不能充分逼近实际所需的目标曲线。CEDDA 方法与常规方法在设计原理和思想上的差异导致了最终设计结果的差异。

Zemax和 CodeV 物镜的主要参数列于表 1。

Table 1 Lens parameters with Zemax and CodeV

| software | Zemax | CodeV |
|---------------------------------------|-------------|-------------|
| NA | 0.85 | 0.85 |
| focal length | 2.26mm | 2.26mm |
| working distance | 0.47mm | 0.60mm |
| thickness | 3.30mm | 2.99mm |
| aberration on axis | <0.004λ RMS | <0.028λ RMS |
| aberration out of axis(0.5half field) | <0.040λ RMS | <0.060λ RMS |
| aberration by decenter(±5μm) | <0.035λ RMS | <0.075λ RMS |
| facula radius RMS | 0.6773μm | 1.4095μm |
| facula radius | <2.663μm | <5.163μm |

从表中可以看出,物镜的轴上性能很好,轴外像差也达到了衍射极限的要求。表中有一项由偏心误差导致的波像差稍大于 0.07λ。实际上,在进行光学头装配的时候,往往需要通过对于力矩器的倾斜,使物镜光轴与系统光轴之间旋转一个角度,以此来补偿偏心误差。

CEDDA 设计的物镜参数列于表 2。

Table 2 Lens parameters with CEDDA

| | |
|-----------------------|--------------|
| NA | 0.85 |
| focal length | 2.29mm |
| working distance | 0.7mm |
| thickness | 2.9mm |
| facula radius RMS | 3.25E - 3μm |
| facula radius | <8.67E - 4μm |
| iteration start value | 0.0025 |
| sampling number | 20000 |

从表 2 列出的评价结果来看,在零视场的情况下,光斑半径 RMS 值非常小,完全满足了实际应用的要求;且光斑半径小于 0.32μm (蓝光光盘信道最小距

离),这意味着物镜在此条件下工作时不会产生信号串扰,此结果好于 Zemax和 CodeV 的设计。

图 3 和图 4 分别显示了商业软件设计的物镜波像差与视场角度和物镜偏心量关系。

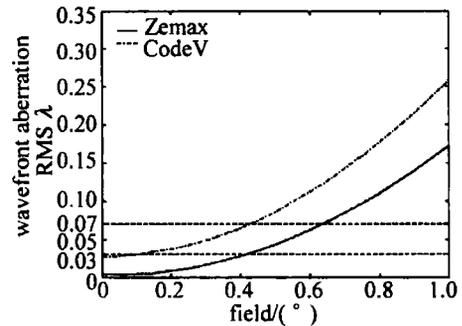


Fig 3 Wavefront aberration vs field

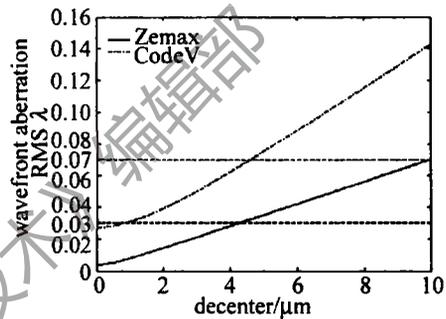


Fig 4 Wavefront aberration vs decenter

曲线在波像差 RMS 0.03λ 和 0.07λ 处所对应的视场角度或偏心值,决定了物镜在应用中能够适用的视场角和制造偏心误差的范围。若只考虑视场和偏心量所引入的像差,则采用 0.07λ 的标准,即 Marechal 准则。若将视场和偏心误差值以外的各种因素引入的误差都考虑进来,则采用更为严格的 0.03λ 的标准来衡量。从图中可以看出,用 Zemax 设计的物镜具有较大的工作视场角和较小的偏心误差灵敏度,适合于大规模注塑成型加工。

4 结论

从解析和离散两条思路出发,采用多种方法,设计了用于蓝光光盘 (BD) 系统的单片物镜,并对各种方法的设计结果进行了对比和讨论,证明了设计的可行性和实用性。

参考文献

- [1] IIONAGA M, ITO F, MATSUZAKI K *et al* Single objective lens having numerical aperture of 0.85 for a high density optical system [J]. Japan J A P, 2002, 41: 1798~1803.
- [2] BRAAT J J M, SM D A, W IJNAKKER M M B. Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems [J]. Appl Opt, 1985, 24: 1853~1855.
- [3] KUBOTA S A lens design for optical disk systems [J]. SPIE, 1985, 554: 282~288.
- [4] WEIN, GONG M L. Designing an optical disk lens without analytical definition of aspheric surface [J]. Appl Opt, 2002, 41 (25): 5334~5340.