

文章编号: 1001-3806(2006)01-0031-03

## CD 物镜工程化设计中的若干问题

田静怡, 巩马理\*, 闫平, 崔瑞桢

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 介绍了 CD 光学系统的工作原理和光学评价准则, 讨论了设计和装配中应当注意的主要问题。从工程化的角度设计了一款可用于批量生产的 CD 物镜, 通过对设计实例的计算分析, 给出了激光器像散、制造误差、系统误差影响下物镜的光学特性曲线。设计结果不仅可以承受各种制造误差, 而且能够在聚焦误差、光盘倾斜等其它误差存在的情况下, 于较大寻迹范围内保持良好的光学特性, 证明了该设计的实用性。

**关键词:** 光学设计与制造; CD 物镜; 波像差; 公差; 光学特性

**中图分类号:** O435.2      **文献标识码:** A

### Some issues in the design of CD lens for practical application

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

(Photonics and Electronics Technology Research Center, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The working theory and optical criterion for the CD optical system is introduced then some main issues for the design and assembling are discussed. A kind of CD lens for practical use and mass production have been designed. Based on the calculation of the lens, the optical performance curves affected by the LD astigmatism, manufacturing errors and system errors are presented. The design can endure various manufacture errors. Even the focusing error and disk tilt occur, excellent optical performance can be obtained within the whole tracking area which shows the design is practical.

**Key words** optical design and fabrication; CD lens; wavefront error; tolerance; optical performance

### 引 言

光盘是信息基础设施产品, 中国作为光盘产品的生产和消费大国, 掌握的核心技术却非常之少。目前国内光头组装厂商使用的物镜几乎全部依赖国外进口。日本是我国物镜的主要进口国, 他们是实现 CD 物镜量产化的国家, 其 DVD 物镜的量产技术也早已成熟, 柯尼卡、索尼及富士公司至今仍在这一领域处于世界领先地位。国内在光存储低端产品 CD 物镜的量产化方面还处于探索阶段, 至今未达到光头厂商批量装配的要求。

达到批量生产要求的物镜设计具有相当的难度, 设计者一方面需要对物镜的加工环节和光头装配环节有充分的了解, 同时还要掌握力矩器以及伺服系统的工作特性。在设计中既要考虑物镜本身制造误差又要考虑系统误差对物镜特性的影响。因此, 必须在设计过程中合理分配非球面的校正力度, 使这些误差对物镜性能的影响最小化。作者从量产化的角度对 CD 物

镜的设计进行了全面深入的研究, 成功地设计出了可用于批量生产的 CD 物镜, 为我国光头产业的发展积累了宝贵的技术经验。

### 1 CD 物镜工作原理及光路系统

用 ZEMAX 软件模拟的光路系统如图 1 所示。激

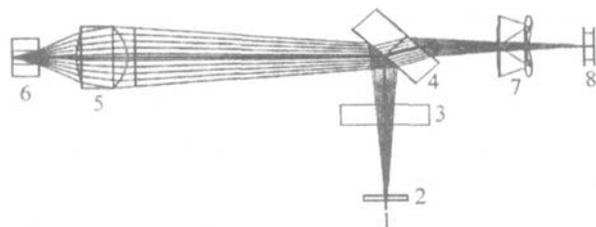


Fig 1 CD pick-up lens optical system

光管 1 发射的激光透过盖玻片 2 和光栅 3, 经半透半反镜 4 的反射面反射后, 被物镜 5 经过光盘盘基 6 聚焦为衍射极限大小的光斑, 照射在光盘信息面读取记录信息。从光盘信息面反射回来的激光透过物镜、半透半反镜、柱面镜 7 入射到光电探测器 (PDIC) 8 上, 以接受反射回来的记录信息。其中, 光栅起分光作用, 将产生的两条副光束照射到 PDIC 的光电二极管上, 通过计算两个二极管的光强之差, 检测出光斑寻迹位置的偏离情况, 从而进行寻迹控制。柱面镜一方面用于校

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: gongm@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-10-09; 收到修改稿日期: 2005-08-21

正半透半反镜引入的像差,一方面自身产生像散,使入射到 PDC 的四象限探测器上的光斑在物镜离焦时失对称,通过对四象限光强分布的计算,检测出物镜聚焦位置的偏离情况,从而进行聚焦控制。

## 2 光学系统特性指标

用于信息存储的光学系统,最重要的功能是将入射的激光光束会聚成衍射受限的光斑。若要全面考察光头在实际工作中的光学特性,需要从以下 3 个方面进行评价。

### 2.1 波像差 RMS 值

像差的存在导致聚焦光斑最大功率点从光斑几何中心偏移到边缘上<sup>[1]</sup>,如果像差足够小,归一化的扫描光点轴向强度为:

$$I_0 = 1 - 4\pi^2 V_w \quad (1)$$

式中,  $V_w$  为波像差方差,以单位  $\lambda^2$  表示。除衍射影响外,如果存在的像差值使轴向强度  $I_0$  降到 0.8,那么扫描光点就为衍射受限的,此时:

$$4\pi^2 V_w = 0.2 \rightarrow V_w = 0.005\lambda^2 \quad (2)$$

即  $V_w$  的平方根也就是波像差的方均根  $O_{RMS}$  值不得超过:

$$O_{RMS} < (0.005\lambda^2)^{1/2} = 0.07\lambda \quad (3)$$

### 2.2 光斑半功率直径

汇聚在光盘信息面上的高斯光点可以用下式表示:

$$I(r) = \frac{P}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中,  $I(r)$  为位置  $r$  处的功率密度,  $\sigma$  为聚焦光点方均根半径,  $P$  为总功率。则由 (4) 式,光点半功率直径,即高斯分布的半高宽为:

$$\Phi_s = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.35\sigma \quad (5)$$

在衍射受限情况下,经推算可得  $\sigma$  与系统的各参数关系如下:

$$\sigma^2 \approx \frac{\alpha(1 + e^{-\alpha/2})}{8\pi^2(1 - e^{-\alpha/2})} \left(\frac{\lambda}{NA}\right)^2 \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  为激光器波长,  $\alpha$  为激光光束切趾系数,  $NA$  为物镜数值孔径。当  $\alpha = 2.5$  时,聚焦点中心强度最大。当切趾系数在这个值左右一定范围内取值的情况下,读出光斑有效直径  $\Phi_s$  (半峰值宽度) 应在:

$$\Phi_s = \frac{(0.5 \sim 0.6)\lambda}{NA} = 0.87\mu\text{m} \sim 1.06\mu\text{m} \quad (7)$$

范围内<sup>[2]</sup>。

### 2.3 抖晃

抖晃 (jitter) 定义为信号脉冲边沿分布的统计,它表示网眼扩张的程度。当抖晃存在时,可观察到网眼线宽度的增加。网眼菱形的宽度与数字信号的窗口长度相等。当网眼线宽增加到与窗口的长度相等时,就无法看到菱形开口。由于网眼的中心用于判断信号的高低电平,即信号的采样。因此当开口不存在时就无

法挑出 bit 信号,产生误码。目前 CD 标准中要求抖晃小于  $35n_s$ 。

## 2.4 评价标准讨论

在以上 3 种指标中,第 2 种即光斑的半功率直径同光学系统的像差、光能损耗以及激光器的辐射分布情况均有关联。并且由于光学软件对于光点大小的仿真仅限于几何光学的追迹结果,对于达到衍射极限的光存储光斑来说,光子波动性的影响占到主导地位,因此,用光学软件模拟的光点大小来评价物镜的性能是不正确的。故只能通过实际测量才能得到可靠的光斑尺寸数据。第 3 种评价指标即抖晃值则和整个光头系统 (包括伺服系统、光学系统、执行系统即力矩器) 的特性均密不可分,也是整体光头出厂性能的评价标准,需用专门的设备才可以准确测量。只有第 1 种也就是波像差 RMS 值与物镜的设计制造联系最为密切,在软件仿真中的可操作性也最强。只要物镜的这一特性能够达到标准也就完成了设计目标,因此,后续的设计结果一律以此为评价标准。

## 3 设计和装配中应注意的问题

实际使用的批量注塑物镜的设计与理论设计有很大差别。为了保证物镜的成品质量和工作稳定性,在设计时需要考虑物镜的制造误差和工作条件的波动对其光学特性的影响。研究经验表明,物镜自身承担的像差校正主要包括:物镜寻迹产生的彗差,制造偏心 and 斜模产生的彗差,激光器像散等。伺服系统辅助的像差校正主要包括,各元件折射率、厚度变化产生的离焦,光路装配、盘片面振造成的共轭距变化等。根据 CD 标准、激光器以及物镜注塑厂家提供的数据,将影响物镜特性的主要误差范围总结于表 1、表 2 中<sup>[3]</sup>。

Table 1 Working conditions errors

working temperature	10°C ~ 40°C
LD wavelength	760 nm ~ 800 nm
LD astigmatism	14.5 μm
disk substrate index error	< ±0.1
disk substrate thickness error	< ±100 μm
disk tilt error	< ±5°
disk decenter error	< ±100 μm
focus error	< ±1.2 μm

Table 2 Lens manufacture errors

decenter error	< 10 μm
die tilt error	< 1 mrad
lens thickness error	< ±20 μm
surface precision error	< 0.2 λ
lens index error (cause by temperature or λ)	< ±0.002

此外,在物镜光路设计和装配时,需要特别注意激光器的摆放角度。由于半导体激光器在其异质结面上垂直方向和水平方向的发光点位置错开,光束在这两个方向上的发散角度不同。为了防止与相邻光道的串扰,在设计 and 实际组装时应使衍射环强度较小(光束发散角较小)的异质结水平方向与物镜的循迹方向(光盘径向)一致<sup>[4]</sup>。

## 4 设计实例及其光学特性分析

### 4.1 基本技术参数

以前述设计思想为基础,使用 CODE V 软件成功地设计出一款适用于批量注塑生产的 CD 物镜,其基本参数以及标准情况下(不含制造和系统误差)整个寻迹范围内的波像差 RMS 值分别列于表 3 和表 4 中。

Table 3 Lens basic parameter

wavelength $\lambda$	780 nm $\pm$ 20 nm
numerical aperture NA	0.45
conjugate $U$	24.773 mm
focal length $f$	3.04 mm $\pm$ 0.1 mm
work distance WD	1.67 mm
magnification $m$	-1/1.55

Table 4 Wavefront aberration RMS for various tracking

tracking/ $\mu$ m	0	100	200	300	400	500
RMS/ $\lambda$	0.013	0.015	0.018	0.024	0.033	0.044

目前,承载物镜的力矩器及伺服系统的循迹范围最大为 500 $\mu$ m。从表中的数据可以看出,在没有各种误差影响的情况下,物镜的波像差特性在整个循迹范围内都很好。由于制造误差和系统误差在实际中难以避免,如果初始像差的均方根值已经接近衍射极限,则在实际中物镜的读出特性可能是不可靠的,因此,必须在设计中留出充分的余量。

### 4.2 公差分析

一个合格的物镜设计要同时考虑制造工艺容差和系统容差两个方面。下面将分别就这两个方面对设计结果做一讨论<sup>[5]</sup>。不同寻迹情况下,物镜对各种误差的灵敏度各不相同,这里给出 0 $\mu$ m 寻迹幅度,即物镜不做寻迹动作,在光轴上的灵敏度分析见表 5。

Table 5 Tolerance for 0 $\mu$ m tracking

parameter	plus deflection	$\Delta W_{RMS}$	minus deflection	$\Delta W_{RMS}$
lens index $n_1$	0.002	0.0017	0.002	0.0073
disk index $n_2$	0.1	0.0022	0.1	-0.0006
thickness $t/\mu$ m	20	0.0007	20	-0.0001
surface precision $1/\lambda$	0.2	0.0133	0.2	0.0133

continue

parameter	plus deflection	$\Delta W_{RMS}$	minus deflection	$\Delta W_{RMS}$
surface precision $2/\lambda$	0.2	0.0152	0.2	0.0152
decenter $x/\mu$ m	10	0.0055	10	0.0055
decenter $y/\mu$ m	10	0.0055	10	0.0055
die tilt $x/m$ rad	1	0.0261	1	0.0261
die tilt $y/m$ rad	1	0.0261	1	0.0261
disk radial tilt/ $^\circ$	0.5	0.0158	0.5	0.0187
disk tangent tilt/ $^\circ$	0.5	0.0170	0.5	0.0170
disk thickness error/ $\mu$ m	100	0.0152	100	0.0084
focus error/ $\mu$ m	1.2	0.0295	1.2	0.036

从表中可以看出,物镜的面形误差、斜模误差,光盘倾斜误差、盘基厚度误差、聚焦误差对物镜的光学特性影响最大。因此,在注塑加工时,应该严格控制物镜的面形误差、斜模误差。并且在设计时保证物镜对非制造误差即系统误差不敏感,从而在误差存在时保证波像差仍能够达到衍射极限。

### 4.3 光学特性分析

首先在不考虑制造误差情况下,给出物镜对聚焦伺服及光盘倾斜误差的灵敏度特性曲线见图 2 和图 3。从图中可以看出,物镜在这两种最坏情况下也能够使聚焦光斑达到衍射极限,并为制造误差可能造成的波像差恶化留有一定空间。

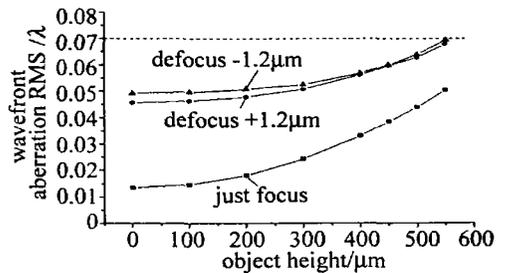


Fig 2 Wavefront error performance for maximum focus error

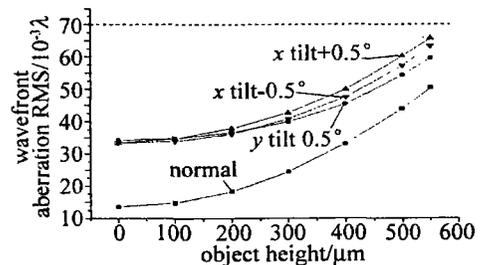


Fig 3 Wavefront error performance for maximum disk tilt

### 4.4 物镜质量统计分析

下面对目前设计物镜的质量分布情况做一统计模拟。对于物镜制造中的一维误差,假定其概率密度函数在误差限范围内均匀分布;对于二维误差,假定其概

(下转第 49 页)

0.02g/L~0.05g/L; 双氧水 (30%) 0.5mL; pH 值 3.5~4.5; 温度 60℃; 电流密度 13A/dm<sup>2</sup>; 镀液循环速度 100L/h。

## 2 试验结果

在上述试验条件下电铸即可得到相应微结构,如图 3 所示。

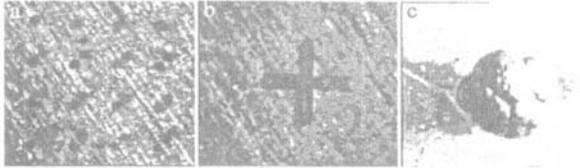


Fig 3 Photograph of electroformed structure

图 3a 中是用光刻胶为模具电铸的微柱状结构,直径为 1μm。图 3b 为十字形结构,线宽 25μm,厚 10μm,是 MEMS 工艺中电枢驱动结构的基本单元,为以后进一步试验打下了基础。图 3c 是利用准分子激光加工的微孔为模具电铸的结构,直径为 400μm、长 2000μm,有较大的深宽比,利用此工艺适当地改进镀液的分散力,可以得到直径为 32μm、长 2000μm 的微结构。表面较粗糙,是由于镀液循环系统不十分完善、脉动性较大的缘故,需要进一步改进以实现更好的表面质量。

## 3 结 论

通过这次试验得到了一些基本的结构,其最小线

宽达到了 11μm,而通过准分子激光加工 PMMA 做模具,深孔达到了线宽 400μm,长 2000μm。而且适当地提高镀液的分散能力,很容易加工出直径为 32μm、深 2000μm 的结构。电镀液配方简单,便于维护,容易实现,并且该试验适合快速电镀,实验中采用的喷射电镀镀速可以达到常规电镀的 90 倍左右<sup>[8]</sup>。对微结构电镀有很好的借鉴意义。

## 参 考 文 献

- [1] EHRFLD W, MUNCHMEYE D. 3-d in ensional micro fabrication using synchrotron radiation [ J ]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1991, A303: 523~ 526.
- [2] CHEN D. Three-d in ensional microstructure machining technology without Si [ J ]. Electronic Science and Technology Review, 1999(9): 32~ 36( in Chinese).
- [3] WEIR X. Relationship between etching identities and laser pulse parameters in excimer direct etching fabrication [ J ]. Laser Technology 2004, 28(1): 85~ 87( in Chinese).
- [4] SUN K N, XU M, ZHANG G W *et al*. Bright nickel plating on parts with deep hole [ J ]. Plating and Environment Protection 1995, 15(4): 3~ 6( in Chinese).
- [5] LOWENHEM F A. Modern plating [ M ]. Beijing Machine Industry Publishing Company 1982. 344~ 410( in Chinese).
- [6] CHEN H F, JIN W R, QUAN R X. Electroosmotic flow in capillary zone electrophoresis [ J ]. Journal of Analytical Science, 1998, 14(3): 257~ 262( in Chinese).
- [7] LIM H, YUAN Sh P, HUANG W Ch. Fast plating [ M ]. Chengdu Sichuan Peoples Publish House 1980. 30~ 43, 73~ 77( in Chinese).
- [8] XIONG Y, JING T F. A study of jet electrodepositing nanometer crystalline nickel [ J ]. Plating and Finishing 2000, 22(5): 1~ 4( in Chinese).

(上接第 33 页)

率密度函数在误差限范围内正态分布<sup>[9]</sup>。采用 3 种不同误差限所得到的物镜质量分布情况见图 4。由于波

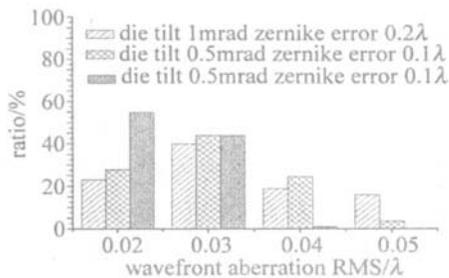


Fig 4 Lens quality distribution for various tolerance

像差将会缩小实际播放中离焦和光盘缺陷的公差,所以必须将汇聚光束的像差水平限制在 0.05λRMS 内<sup>[1]</sup>。对于较大离焦和其它缺陷的纠正可以用信号的处理方法如数字信号中的误差纠正,且这种情况很少出现。可以看出,若能很好地控制斜模和面形误差,物镜的出厂质量可以达到很高的水平。

## 5 小 结

总结了 CD 物镜在实际设计过程中应当考虑的多因素。以设计实例为基础,给出了物镜在各种误差条件下的光学特性。该设计不仅达到了批量注塑生产的要求,而且在工程上具有较高的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] BOUWHUIS G, BRAAT J. Principles of optical disc systems [ M ]. UK: Adam Hilger Ltd 1985. 34, 47.
- [2] STAN S G. The CD-ROM drive a brief system description [ M ]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers 1998. 15~ 16.
- [3] YAMAZAKI H, MATSUMARU T. Optical system for recording and reproduction device [ P ]. China Patent CN1071471C, 2001-09-19( in Chinese).
- [4] WANG Y X. The characteristic of inclination servo of optical disc and auto test method [ D ]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 44( in Chinese).
- [5] PAN J H. The design, manufacture and testing of aspheric surface [ M ]. Beijing: Science Press 1994. 50( in Chinese).
- [6] YUAN X C. Optical design [ M ]. Beijing: Science Press 1985. 241( in Chinese).