

文章编号 1004-924X(2008)10-1793-07

# 用于 DVD 光学头的三焦点单片物镜设计

黄文浩, 雷双艳, 胡衍雷, 孟祥儒

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 为了兼容 CD、DVD、HD-DVD 3 种盘片, 设计了适用于 780、650、405 nm 3 个波长的二元衍射面和非球面相结合的单片物镜, 3 个波长对应的物镜数值孔径分别为 0.45、0.60 和 0.65。介绍了单物镜实现三焦点原理; 论述了二元衍射面和非球面的设计理论和结构参数, 即二元衍射面刻环区域被分割成两个同心环形区域, 根据谐衍射原理, 每个区域对不同的波长设定不同的衍射级次; 最后, 根据光学头物镜的性能评价参数, 应用 ZEMAX 软件进行理论模拟和公差分析。结果表明, 所设计的物镜波像、波前均方差分别  $< 0.07 \lambda$  和  $0.035 \lambda$ , 空间截止频率  $> 1\ 200$  cycle/mm, 曲率半径和厚度公差为 300 nm, 能满足实际应用的技术要求。

**关键词:** 光学头; 三焦点物镜; ZEMAX 软件

**中图分类号:** TH703; TP333.4 **文献标识码:** A

## Design of three-focus single objective lens used in DVD pick-up head

HUANG Wen-hao, LEI Shuang-yan, HU Yan-lei, MENG Xiang-ru

(*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

**Abstract:** In order to be compatible with CD, DVD and HD-DVD disc, a single objective lens with a binary diffractive surface and an aspherical surface was designed for three wavelengths of 780, 650 and 405 nm, and the numerical apertures are 0.45, 0.60 and 0.65, respectively. The working principle of the three-focus objective lens was presented. Then, the design theory of the aspheric objective lens and the parameters of the binary diffractive surface and aspherical surface were described in detail. The binary diffractive surface was divided into two concentric radial zones, each radial region set different diffraction orders for different wavelengths according to the harmonic diffraction theory. Finally, the ZEMAX was used in the theoretical simulation and tolerance analysis on the single objective lens based on the metewand of the aspheric objective lens. The simulation results show that OPD rms and wavefront rms are less than  $0.07 \lambda$  and  $0.035 \lambda$ , respectively. Spacial cutoff frequency is greater than 1 200 cycle/mm, and the tolerance of radial curvature and the thickness tolerance are 300 nm, which can satisfy practical requirement.

**Key words:** optical pick-up; three-focus objective lens; ZEMAX

收稿日期: 2007-12-25; 修订日期: 2008-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50335050); 国家 863 高技术研究发展计划基金资助项目 (No. 2006AA042311)

## 1 引言

随着信息技术的发展,光盘从 CD 到 HD-DVD,信息存储的密度和容量越来越高。为了适应这种需求,DVD 产业不断发展壮大。然而,至今国内各大 DVD 整机生产厂家使用的光学头全部依赖进口,严重地制约了我国 DVD 产业的发展。作为光学头关键元件之一的物镜的研究日趋成为焦点<sup>[1-2]</sup>,但对能兼容 CD、DVD、HD-DVD 3 种盘片的物镜设计,国内尚没有已发表的文献资料。

根据国家标准<sup>[3]</sup>,CD 的盘基厚度是 1.2 mm,读取激光器波长为 780 nm;DVD 的盘基厚度是 0.6 mm,读取激光器波长为 650 nm;蓝光 HD-DVD 的盘基厚度是 0.6 mm,读取激光器波长为 405 nm。为实现 CD、DVD 和 HD-DVD 3 个波长的兼容,各种物镜方案被提出。柯尼卡公司采用两个二元衍射面设计单片物镜<sup>[4]</sup>,Pentax 公司提出用一个二元衍射面,将其表面分割成 3 个同心环形区域,并采用独立的 3 个激光器实现三光束的兼容<sup>[5]</sup>。

本文提出一种采用一个二元衍射面<sup>[6]</sup>和偶次非球面相结合的单片透镜,将二元衍射表面分割成两个同心环形区域<sup>[7]</sup>,每个区域对不同的波长设定不同的衍射级次。介绍了三焦点物镜的基本结构和工作原理,详细论述二元衍射面和非球面的设计理论、结构参数以及物镜的性能评价参数。应用 ZEMAX 软件进行理论模拟和公差分析,结果表明,所设计的物镜性能达到了兼容 CD、DVD、HD-DVD 3 个波长的要求。

## 2 单物镜实现三焦点原理

三焦点物镜原理如图 1 所示:物镜入光表面被分割成 A、B 两个区域,根据衍射原理,每个区域对不同的波长设定不同的衍射级次。当物镜读 DVD/HD-DVD 时,穿过 A、B 两个区域的光线聚焦于 0.6 mm 的 DVD/HD-DVD 层,而物镜读 CD 时,穿过 A 区域的光线聚焦于 1.2 mm 的 CD 层,穿过 B 区的光线被发散,对读出信号不造成影响,以上情况相当于 A 区域为 CD 物镜,A+B 区域为 DVD 和 HD-DVD 物镜,从而实现了“三焦点”。

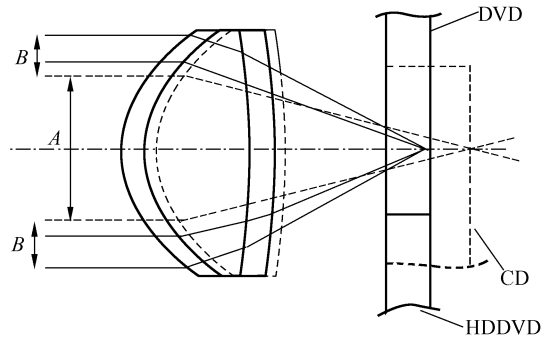


图 1 三焦点物镜原理图

Fig. 1 Principle diagram of three-focus objective lens

## 3 单物镜的设计

设计光学读取头时,出于成本的考虑,往往采用的都是单片的物镜。设计时要兼顾两种厚度的盘片、3 个波长,以及物镜在小视场范围内能达到衍射极限,并能严格地校正球面像差和彗差。但是根据三级像差理论可知,只有一面是非球面的物镜不能同时校正球面像差和彗差,而二元衍射面的衍射结构能兼顾 3 种波长的要求,对特定波长产生光程差,从而更好地校正像差<sup>[8]</sup>。所以,本文提出用二元衍射面和偶次非球面相结合的单片物镜来实现这一功能。

其中二元衍射面面型分为两个区域,内部区域的半径是  $A_1$ ,外部区域的半径是  $A_2$ ,满足  $0 < A_1 < A_2$ ,内、外部区域面型的表达式分别为式(1)、(2):

$$z_1 = \frac{c_1 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_1) c_1^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_{1i} r^{2i}, \quad (1)$$

$$z_2 = z_0 + \frac{c_2 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_2) c_2^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_{2i} r^{2i}, \quad (2)$$

其中, $c_1$ 、 $c_2$  为曲率, $r$  为径象长度, $k_1$ 、 $k_2$  为二次球面系数, $\alpha_{1i}$ 、 $\alpha_{2i}$  为高次非球面系数, $z_0$  为表面垂轴度补偿。

内、外部区域的衍射相位角表达式分别为式(3)、(4):

$$\phi_1 = M_1 \sum_{i=1}^N \beta_{1i} \rho_1^{2i}, \quad (3)$$

$$\phi_2 = \delta_0 + M_2 \sum_{i=1}^N \beta_{2i} \rho_2^{2i}, \quad (4)$$

其中, $\rho_1 = \frac{r}{A_1}$ 、 $\rho_2 = \frac{r}{A_2}$  为归一化半径, $M_1$ 、 $M_2$  为衍

射级次,  $\beta_{1i}, \beta_{2i}$  为衍射系数,  $\delta_0$  为相移补偿。

偶次非球面面形表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_i r^{2i}, \quad (5)$$

其中,  $c$  为曲率,  $r$  为径向长度,  $k$  为二次非球面系数,  $\alpha_i$  为高次非球面系数。

图 2(左)为所设计的物镜的前视图,二元衍射面看起来由同心圆环组成,图 2(右)为所设计物镜的截面图,二元衍射面成台阶状。

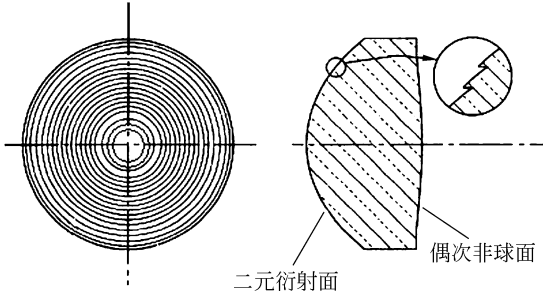


图 2 物镜的前视图(左)和截面图(右)

Fig. 2 Front view (left) and cross-sectional view (right) of objective lens

谐衍射元件也称为多级衍射元件,最早是在 1995 年由 Sweeney 与 Faklis 分别提出的<sup>[9-10]</sup>,其特征是衍射元件的设计波长相位高度为  $2\pi$  的整数倍,即相位高度因子  $M$  为  $>1$  的整数,使得整个波段内多个波长的光波的相位高度为  $2\pi$  的整数倍,衍射效率达到 100%。

衍射光学元件的相位高度为:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n-1) H = M2\pi, \quad (6)$$

其中,  $M$  是相位高度因子,  $M=1$  表示纯相位型菲涅尔衍射透镜,  $M>1$  则表示谐衍射光学元件,谐衍射光学元件各个波长的焦距为:

$$f(\lambda) = \frac{M\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (7)$$

若  $f(\lambda) = f_0$ , 则  $q\lambda = M\lambda_0$ , 谐振波长为:

$$\lambda = \frac{M\lambda_0}{m}, \quad (8)$$

谐衍射光学元件第  $m$  级衍射级次的衍射效率为:

$$\eta(\lambda) = \sin^2 \left\{ m - M \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[ \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] \right\}, \quad (9)$$

本文 A 区域中,设计波长为  $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$ , 相位高度因子  $M = 3$ , B 区域中,  $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$ ,

$M=2$ , 根据式(4)可得 3 种波长衍射效率最大时的衍射级次,如表 1 所示:

表 1  $\eta_{\max}$  时的衍射级次

Tab. 1 Diffraction orders at maximum diffraction efficiency

	780 nm	650 nm	405 nm
A 区域	2	3	5
B 区域		2	3

#### 4 三焦点物镜 ZEMAX 软件<sup>[11]</sup>模拟

图 3 是三波长的 DVD 光学头原理图,是在现有的双波长集成半导体激光器 DVD 光学头的基础上增加一个 405 nm 的蓝光激光器来读取 HD-DVD 盘片。

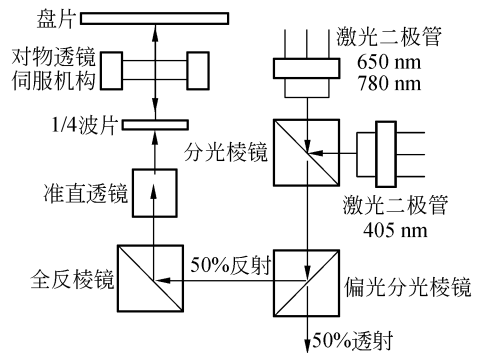


图 3 三波长的 DVD 光学头原理图

Fig. 3 Working principle diagram of DVD pickup head with three wavelengths

应用光学设计软件 ZEMAX 设计物镜时,初始值的选取非常重要。据相关文献<sup>[12]</sup>,选用光学塑料 Acrylic 作为物镜材料,选用 PMMA 作为盘基材料,并设定物镜轴向中心厚度为 2.4 mm,物镜直径为 5 mm,在读取 CD 盘片时,激光波长为 780 nm,物镜的数值孔径为 0.45,光盘盘基厚度为 1.2 mm,物镜的工作距离为 1 mm,初步确定后焦距为 3.0 mm。在读取 DVD 和 HD-DVD 盘片时,激光器波长分别为 650 nm 和 405 nm,物镜的数值孔径分别为 0.6 和 0.65,两者的工作距离均设为变量。

接下来对二元衍射面的高次非球面系数( $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}$ )和衍射相位角系数( $\beta_{1i}, \beta_{2i}$ ),以及偶次非球面

参数( $\alpha_i$ )进行优化。从上述三焦点原理中可以看出,所谓“三焦点”,实际上是利用同一物镜的不同数值孔径分别对 CD、DVD 和 HD-DVD 盘片实现信息重写,其不同之处仅仅在于应该同时考虑物镜在 3 个不同的工作距离、数值孔径以及两种盘片厚度的情况下进行像差的优化。

在优化过程中将非球面系数和衍射相位角系数定为变量;因物镜在实际工作中与盘片的距离是可调整的,故也设为变量;同时设定读取 CD 盘片时,物镜的通光孔径等于二元衍射面内部区域的直径。另外,还需要对物镜的波面像差、RMS 光斑尺寸和 MTF 曲线参数进行分析,及时调整某个非球面系数,并对优化函数中各个控制参数的权重进行调整,再进一步优化,经过不断调试,最终达到比较理想的结果。考虑到二元衍射面和偶次非球面的加工难度<sup>[13]</sup>,一般取最高次幂为 10,另外考虑到实际激光光源的大小,在设计时,将激光光源半物高定为  $5 \mu\text{m}$ 。

图 4 为光学成像系统光路图,其中图(a)、(b)、(c)分别对应于 zemax 软件中模拟的 HD-DVD、DVD 和 CD 系统。

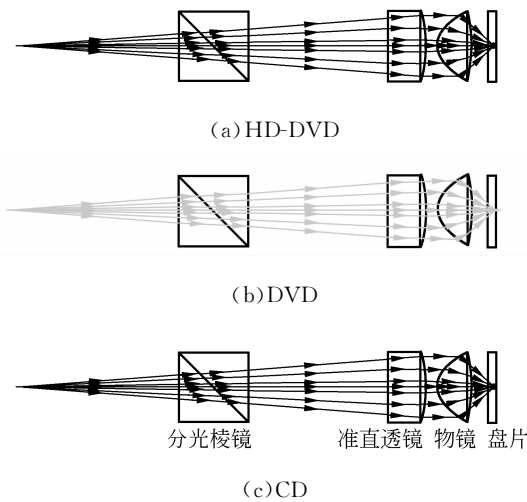


图 4 光学成像系统光路图

Fig. 4 Optical paths of imaging systems

## 5 优化结果及公差分析

光学头中物镜性能评价参数<sup>[14]</sup>主要有以下几个:

(1)波像均方差(OPD rms):在接近衍射极限

的光学系统中,波像均方差是像质的敏感函数。要使光学读取头物镜聚焦精确、像质好,必须对球差、慧差和像散进行校正,从而使得波像均方差在一定的允许范围内,一般要求波像均方差在  $0.07 \lambda$  以下。

(2)波前均方差(wavefront rms):光盘系统要求传递到光盘记录表面的光波基本为球面波,即从半导体激光器发出的球面波经过光学头系统各个元件后其全体的波前均方差在  $0.07 \lambda$  以下,其中物镜的波前均方差控制在  $0.035 \lambda$  以下。

(3)点列图:光盘系统通过物镜聚焦光斑读写信息,光斑大小、对称性等直接影响信息的存储密度和读写信号的质量。从点列图中可以比较直观地看出光斑的大小和成像质量,另外点列图可以显示系统计算的艾里斑圆环,一般认为弥散斑的 RMS 半径控制在艾里斑环内即表明光学系统是处于衍射极限状态的,是理想的光学系统。

(4)光学传递函数(MTF):光学系统是线性系统,而且在一定条件下还是线性空不变系统,因而可以用线性系统理论来研究它的性能,把输入信息分解成各种空间频率分量,研究系统的空间频率传递特性即光学传递函数,它能全面反映光学系统的成像性质。FFT MTF 是用快速傅立叶变化算法计算的 MTF,是一种物理传递函数,即考虑光学系统的衍射效应,一般的成像光学系统都可用它来评价。光学头系统要求光线在子午和弧矢两个方向的传递函数基本一致,要求物镜的空间截止频率  $> 1\ 200 \text{ cycle/mm}$ ,并着重考虑对中频的影响。

根据上面的评价标准,来评价所设计的物镜的特性,结果如表 2 所示。

表 2 波像均方差和波前均方差  
Tab. 2 OPD rms and wavefront rms

	波长	物高 0	物高 $5 \mu\text{m}$	参考值
波像	780 nm	0.017 003	0.024 876	$< 0.07 \lambda$
均方	650 nm	0.008 284	0.035 322	
差( $\lambda$ )	405 nm	0.010 582	0.059 347	
波前	780 nm	0.004 6	0.006 9	$< 0.035 \lambda$
均方	650 nm	0.001 9	0.013 3	
差( $\lambda$ )	405 nm	0.005 5	0.023 4	

从表 2 可以看出,物镜的波像均方差和波前

均方差都小于参考值。

图 5 列出的是系统的点列图,其中 CON-FIG1、CONFIG2、CONFIG3 分别对应读取 CD、DVD、HD-DVD 盘片时系统的光斑大小,其中第一行和第二行分别对应于物高为 0 和 0.5 μm 时系统的成像光斑,可以看出,6 种情况下的光斑均在艾里斑直径范围以内。

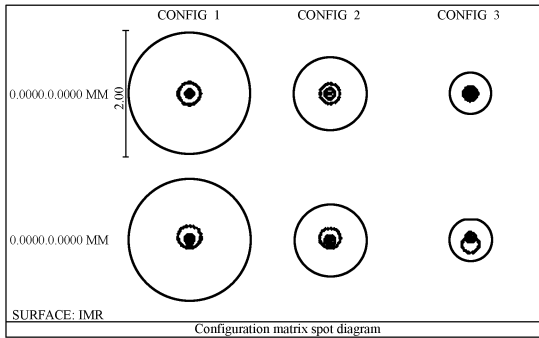
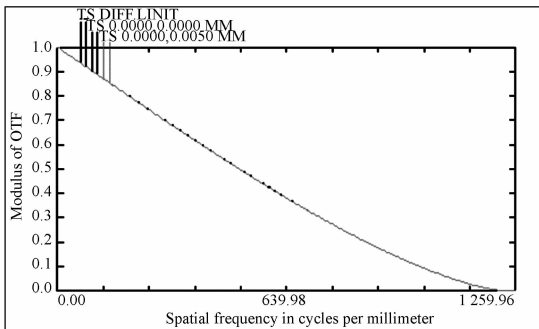


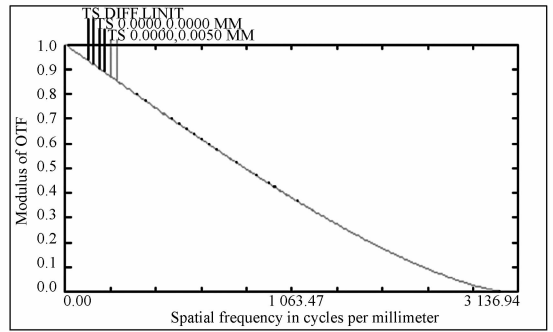
图 5 点列图  
Fig. 5 Spot diagram

图 6 列出的是系统的光学传递函数,图中显示,光学传递函数曲线和衍射极限时的光学传递函数曲线十分接近,其空间截止频率均 > 1 200 cycle/mm,且子午和弧矢方向的传递函数也重合很好,完全达到了光学头物镜设计的要求。

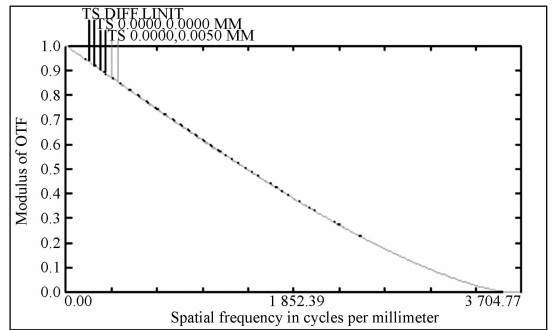
表 3 列出的是在曲率半径和厚度公差均为 300 nm 时物镜的波前均方差。从公差分析结果中可以看出,3 种波长的波前均方差基本控制在 0.035 λ 以下,且 300 nm 在现有超精密仪器加工精度范围内,该物镜具有加工可行性。



(a) 光学传递函数(780 nm)  
(a) MTF(780 nm)



(b) 光学传递函数(650 nm)  
(b) MTF(650 nm)



(c) 光学传递函数(405 nm)  
(c) MTF(405 nm)

图 6 光学传递函数  
Fig. 6 MTF

表 3 公差分析

Tab. 3 Tolerance analysis

测试波长	波前均方差(λ)
780 nm	90% ≤ 0.007 726 050
	50% ≤ 0.005 903 586
	10% ≤ 0.004 418 348
650 nm	90% ≤ 0.020 804 657
	50% ≤ 0.009 552 522
	10% ≤ 0.003 297 403
405 nm	90% ≤ 0.034 525 630
	50% ≤ 0.020 570 093
	10% ≤ 0.005 002 622

## 6 结 论

本文在现有的双波长集成半导体激光器 DVD 光学头的基础上,采用二元衍射面和偶次非

球面相结合的方式,设计了能适用于 CD、DVD、HD-DVD 3 个波长的单片物镜。介绍了单物镜实现三焦点原理;然后讨论了二元衍射面和偶次非球面的设计理论以及在光学软件 ZEMAX 中优化设计的方法;最后,根据光学头物镜的性能评价参数,应用 ZEMAX 软件进行理论模拟和公差

分析。结果表明,所设计的物镜波像、波前均方差分别  $<0.07 \lambda$ 、 $0.035 \lambda$ ,空间截止频率  $>1\ 200$  cycle/mm,曲率半径和厚度公差为 300 nm,在现有超精密仪器加工精度范围内。与现有的兼容三波长的物镜相比,该方案进一步简化了物镜结构,能达到实际应用的技术要求,具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 郭培基,余景池,樊仲维. DVD 读出物镜设计[J]. 光电子·激光,2001,12(1):4-6.  
GUO P J, YU J CH, FAN ZH W. Design of pick-up objective lens for DVD[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, 12(1):4-6. (in Chinese)
- [2] 陈丹,刘继桥,张广照,等. HD-DVD 光学系统物镜的设计与研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2003,40(7):9-12.  
CHEN D, LIU J Q, ZHANG G ZH, *et al.*. Progress in design and study of objective lens used in HD-DVD optical systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003,40(7):9-12. (in Chinese)
- [3] SJ/T 11321-2006. DVD/CD 只读光学头通用规范[S].  
SJ/T 11321-2006. General specification of DVD/CD read-only optical pick-up[S]. (in Chinese)
- [4] 荒井则一,小嶋俊之,桐木俊彦,等. 光学头装置:中华人民共和国,200410049103[P].  
HUANG J Z Y, XIAO W J ZH, TONG M J Y, *et al.*. Optical pick-up; PRC,200410049103[P]. (in Chinese)
- [5] MARUYAMA, KOICHI, KOREEDA, *et al.*. Objective lens for optical pickup:US,7038862[P].
- [6] 王肇圻,张轶楠,傅汝康,等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. 光学精密工程,2005,13(1):1-4.  
WANG ZH Q, ZHONG Y N, FU R L, *et al.*. Design of hybrid refractive/diffractive petzval objective in visible band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(1):1-4. (in Chinese)
- [7] YASUHIRO T, YOSHIKAKI K, YOSHIYUKI S, *et al.*. Lens design of compatible objective lens for blu-ray disc and digital versatile disk with diffractive optical element and phase steps[J]. *Jpn. J. Appl. Phys*, 2004, 43(7B):4742-4745.
- [8] 樊仲维. 光学系统中的二元光学元件[J]. 光学精密工程,1995,3(2):1-10.  
FAN ZH W. Binary optical elements in optical systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995,3(2):1-10. (in Chinese)
- [9] SWEENEY D W, SOMMARGREN G E. Harmonic diffractive lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(14): 2469-2475.
- [10] FAKLIS D, MORRIS G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(14): 2462-2468.
- [11] JOSEPH M G. *Introduction to Lens Design with Practical Zemax Examples*[M]. United States :Willmann-Bill. inc,2002.
- [12] 徐端颐. 光盘存储系统设计原理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.  
XU D Y. *Principle and Design of Optical Storage Systems*[M]. Beijing:National Defence Industry Press,2000. (in Chinese)
- [13] 欧阳渺安. 超精密非球面镜面模具直轴磨削的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):545-552.  
OUYANG M A. Study of ultra-precision vertical grinding for aspheric lens mould [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):545-552. (in Chinese)
- [14] 赵春梅,阮昊,何慧灵,等. 非球面镜在光学读取头中的应用[J]. 激光与光电子学展,2004,41(10):6-8.

ZHAO CH M, RUAN H, HE H L, *et al.*. Application of aspheric lens in optical pick-up[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41 (10):6-8. (in Chinese)

作者简介:黄文浩(1944—),男,江苏武进人,教授,博士生导师,主要从事纳米计量和飞秒激光双光子微加工技术的研究。E-mail: whuang@ustc.edu.cn

雷双艳(1984—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事光学读取头的研究。E-mail: leishuangyan1210@126.com

## ● 下期预告

# 棉-涤混纺面料中棉含量的近红外光谱分析

王动民<sup>1</sup>,金尚忠<sup>1</sup>,陈华才<sup>1</sup>,陈星旦<sup>2</sup>

(1. 中国计量学院 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

建立了分析精度较高的用于检测棉-涤混纺面料里含棉量的近红外光谱分析模型。首先,利用 50 个棉-涤混纺面料作为对象,自行设计采样装置,采集其近红外光谱,然后,经一阶、二阶导数,Savitzky-Golay 滤波等方法预处理,结合偏最小二乘法,建立了 4 个棉成分的定量分析模型。结果表明:Savitzky-Golay 滤波对定标结果几乎没有影响;经一阶导数预处理后的光谱数据结合偏最小二乘法建立的模型具有较高的分析精度,定标均方差和预测均方差分别达到了 0.022、0.018,分析误差控制在 $\pm 0.05$ 以内,基本满足了纺织领域快速定量检测的精度需求。同时还分析了近红外光谱技术在该应用领域的研究重点。