

文章编号:1001-9014(2004)04-0308-05

## 制作在非球面基底上的红外衍射光学元件

刘莉萍<sup>1</sup>, 王涌天<sup>1</sup>, 李荣刚<sup>2</sup>, 焦明印<sup>3</sup>

- (1. 北京理工大学 光电工程系, 北京 100081;  
2. 北京航空航天大学 理学院, 北京 100083;  
3. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**用金刚石车床车削的方法在锗材料上成功地加工了折射-衍射混合式红外光学透镜, 其中的衍射面制作在非球面的基底上, 是国内首个制作在曲面基底上的混合成像元件. 对折-衍射混合透镜和不带衍射环带的对比透镜的测试结果表明, 衍射面加工效果良好, 有效地减小了此单片镜系统的色差, 明显提高了系统的成像质量, 与设计结果吻合较好.

**关键词:**衍射光学元件; 金刚石车削; 非球面基底; 红外成像系统  
**中图分类号:**TN2, O439 **文献标识码:**A

## INFRARED DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT FABRICATED ON ASPHERIC SUBSTRATE

LIU Li-Ping<sup>1</sup>, WANG Yong-Tian<sup>1</sup>, LI Rong-Gang<sup>2</sup>, JIAO Ming-Yin<sup>3</sup>

- (1. Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. School of Sciences, Beihang University, Beijing 100083, China;  
3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A hybrid diffractive-refractive infrared lens of Germanium was fabricated by means of diamond turning, in which the diffractive surface was produced on an aspheric substrate. Test results for the hybrid lens and a comparative lens without the diffractive structure showed that the diffractive surface was fabricated with good accuracy. It effectively reduced the chromatic aberration of the single lens system, and significantly improved the image quality of the system, which corresponds well to the design result.

**Key words:** diffractive optical element; diamond turning; aspheric substrate; infrared imaging system

### 引言

自二十世纪80年代美国麻省理工学院林肯实验室提出二元光学的概念后<sup>[1]</sup>, 衍射光学元件在国际上得到迅速发展. 在成像系统中, 衍射光学元件与传统的折射、反射元件混合使用, 综合平衡, 给系统的设计引入了新的自由度, 为提高系统性能、简化系统结构、减轻系统重量提供了新的可能性<sup>[2,3]</sup>. 对于衍射光学元件在成像系统中的应用, 我国学者也做了大量探讨<sup>[4-8]</sup>, 其中多数为对设计方案的研究. 在实际完成研制的少数几个系统中, 对衍射光学元件的制作分别采用了多层掩模刻蚀<sup>[6]</sup>、多层掩模镀

膜<sup>[7]</sup>、旋转掩模镀膜<sup>[8]</sup>等工艺. 这些工艺都要求衍射面的基底为平面. 因此上述各个设计虽然通过加入衍射元件获得了新的优化自由度, 却由于衍射结构(通常为环带)所在的光学面的曲率需要固定为0, 不得不损失这一对系统像质有重要影响的设计变量. 对于可见光系统, 可以通过中国科学院长春光机所正在探讨的激光直写工艺<sup>[9]</sup>解决这一问题, 但该工艺较为复杂, 在成像系统中实用尚有待时日.

对于红外热成像系统, 由于对锗、硅、硫化锌、碲化镓等常用红外材料都可以采用金刚石车床车削工艺加工<sup>[10]</sup>, 因此可以相对容易地将衍射元件制作在曲面基底上. 在国际上, 衍射光学元件首先在红外成

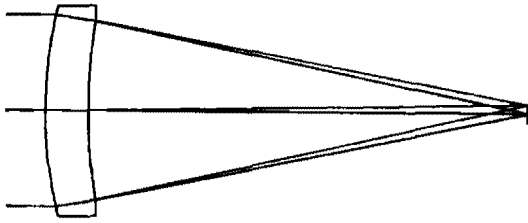


图1 混合式红外光学透镜光路图  
Fig.1 Layout of the hybrid infrared lens

像系统中实现广泛应用<sup>[11,12]</sup>,除了金刚石车削可提供便利的加工条件外,更是因为红外波段可供设计者选择的材料种类不多,色差的校正比较困难,而具有相同符号光焦度的折射元件和衍射元件产生的色差符号相反,可以利用这一特性帮助校正系统色差;此外,红外材料的价格高,比重大,衍射元件的应用可以有效降低成本,减轻系统重量.近年来,我国已有多个研究和生产单位引进了金刚石车床设备,然而对红外折-衍射混合系统的研究至今却停留在设计阶段<sup>[13]</sup>.

本文在国内率先用金刚石车床车削实现了对具有非球面基底的红外衍射元件的加工,测试结果与设计预期吻合良好,充分验证了衍射光学元件的优越性和金刚石车削工艺的实用性.

## 1 设计

为本文中的实验我们设计了  $f = 50\text{mm}$ 、 $F/2.5$  (有效通光孔径 20mm) 的折-衍射混合红外成像单

透镜,其工作波段为  $3 \sim 5\mu\text{m}$ ,视场为  $\pm 1^\circ$ ,如图 1 所示.

该透镜的材料为锗,第 1 面为球面,第 2 面为以非球面为基底的衍射面.从图 2 给出的波像差曲线可以看出:如果第 2 面采用简单的球面,系统带有少量的球差和较大的色差;采用非球面可以完全消除球差的影响,但对影响系统像质的主要矛盾—色差—没有明显的改善;在该面上加入描述衍射元件相位分布的变量进一步优化,则可利用衍射元件特殊的色散特性,有效地校正系统色差.图 3 绘出了上述非球面透镜和折-衍射混合透镜的轴上像点的点扩散函数,图 4 是两者的轴上像点的“圈内能量”(Encircled energy:随着以光轴为中心的假想圆形接收器件的直径  $\varphi$  的增大,被其接收的有效能量占像点全部能量的百分比)曲线的比较,从中可以看出衍射元件明显地改善了像点的能量分布.

按照薄透镜理论,折-衍射混合单透镜的总光焦度是折射元件的光焦度和衍射元件的光焦度之和,即:

$$\phi = \phi_r + \phi_d \quad (1)$$

按照初级像差理论,为消除色差,  $\phi_r$  和  $\phi_d$  应满足以下关系<sup>[15]</sup>

$$\phi_r = \left( \frac{v_r}{v_r - v_d} \right) \phi, \quad \phi_d = \left( \frac{v_d}{v_d - v_r} \right) \phi \quad (2)$$

式中  $v_r$  是折射元件材料的阿贝数,  $v_d$  是衍射元件的阿贝数,分别用以下公式计算

$$v_r = \frac{n_M - 1}{n_s - n_L}, \quad v_d = \frac{\lambda_M}{\lambda_s - \lambda_L} \quad (3)$$

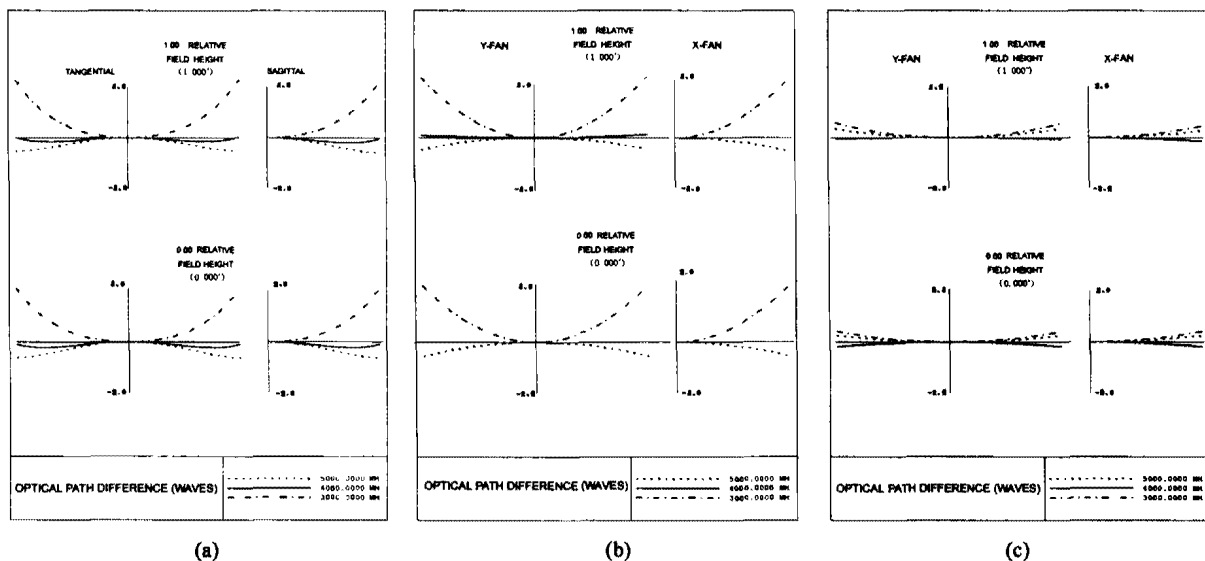


图2 当第二光学面为球面(a)、非球面(b)、以非球面为基底的衍射面(c)时,透镜的波像差曲线  
Fig.2 Wave aberration curves for the lens with the second surface as (a) a spherical surface, (b) an aspheric surface and (c) a diffractive surface made on the aspheric substrate

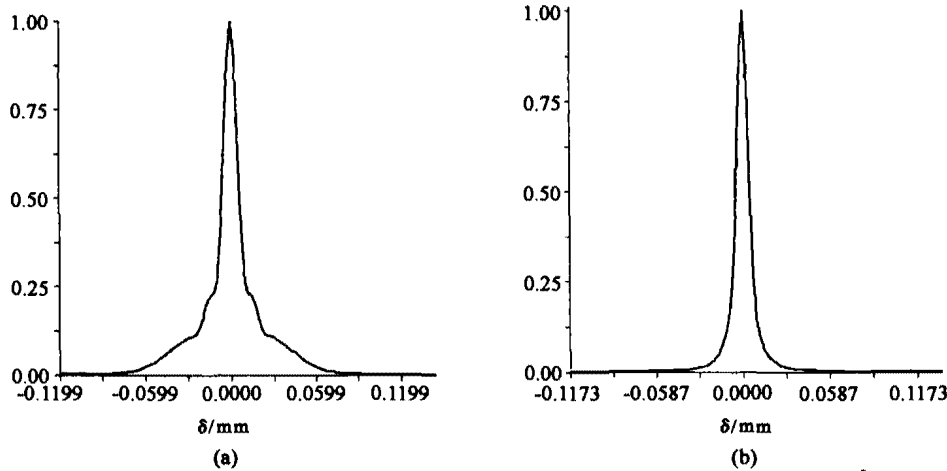


图3 非球面透镜(a)、折-衍混合透镜(b)轴上像点的点扩散函数  
Fig.3 Point spread function curves for (a) the aspheric lens and (b) the hybrid lens

其中,  $\lambda_M, \lambda_L, \lambda_S$  分别是系统的中心波长和接收谱段的长、短波长, 对于本文中的系统,  $\lambda_M = 4, \lambda_L = 5, \lambda_S = 3$ , 故此  $v_d = -2$ ;  $n_M, n_L, n_s$  分别是折射元件材料对应上述波长的折射率, 对于锗,  $n_M = 0.0245, \lambda_L = 4.016, \lambda_s = 0.0451$ , 故此  $v_r = 103.935$ . 用式(2)计算出当  $\phi = 1/f = 0.02$  时,  $\phi_r = 0.0196224, \phi_d = 0.0003776$ ; 而本文的优化结果为  $\phi = 0.02, \phi_r = 0.0195988, \phi_d = 0.0004324$ . 其中的些小差异是由于该元件并非理想的薄透镜以及校正高级像差等原因所致.

在设计中, 有意把衍射面放在第二面的非球面基底上, 而保持单透镜的第一面为球面. 这是考虑到在透镜加工时, 衍射面由其相位要求造成与球面矢

高的偏离, 需要用数控金刚石车床加工, 无论其基底是球面或是非球面, 工艺的复杂性没有很大的差别; 而第一面仍可采用传统的球面研磨工艺, 则可降低加工成本.

## 2 加工

在使用 CODE V<sup>[15]</sup> 或 GOLD<sup>[16]</sup> 等光学设计软件优化浮雕型衍射元件时, 得到的是在面型坐标系  $(X, Y, Z)$  下描述衍射相位分布的多项式的系数, 其单位为毫米. 相位多项式的形式为

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_M} (D_1 r^2 + D_2 r^4 + D_3 r^6 + \dots), \quad (4)$$

其中  $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ .  $D_1, D_2, D_3, \dots$  为优化得到的系数. 本文的设计中采用了 2 次、4 次、6 次衍射相位多项式系数, 衍射元件的相位分布如图 5 中实线所示, 其纵轴的单位为  $\lambda_M$  (或  $2\pi$ ). 图中的虚线是在  $\Phi(r_i) = 2\pi * i$  ( $i = -1, -2, \dots -5$ ) 处使相位突变得得到衍射环带后, 相位的实际分布情况.

将相位的实际分布转化到曲面的矢高变化, 可用以下公式表示

$$\delta Z(r) = \frac{1}{n_M - 1} \left[ D_1 r^2 + D_2 r^4 + D_3 r^6 - \text{Int} \left( \frac{\Phi(r)}{2\pi} \right) \lambda_M \right]. \quad (5)$$

式中  $\text{Int}(x)$  的含义为对  $x$  取整数, 对本文设计来说该项表明在以下  $r_i$  值处有矢高突变:

$$r_1 = 4.3007; r_2 = 6.0811; r_3 = 7.4468; r_4 = 8.5979; r_5 = 9.6120$$

每次的突变深度为

$$\delta Z = \frac{\lambda_M}{n_M - 1} = 1.32 \mu\text{m}.$$

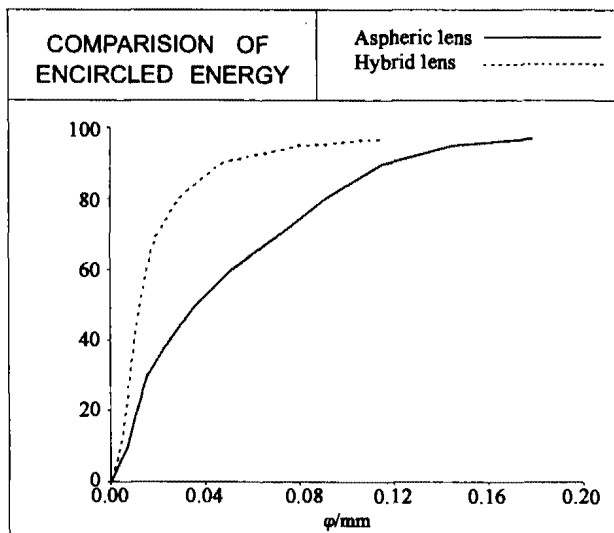


图4 非球面透镜(实线)、折-衍混合透镜(点线)轴上像点的“圈内能量”  
Fig.4 Encircled energy curves for the aspheric lens and the hybrid lens

本文的设计在第 2 面上还采用了 4 次、6 次和 8 次非球面系数,故此其面型方程为

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2r^2}} + A_1r^4 + A_2r^6 + A_3r^8 + \frac{1}{n_M - 1} [D_1r^2 + D_2r^4 + D_3r^6 - \text{Int}(\frac{\Phi(r)}{2\pi})\lambda_M] \quad (6)$$

式中  $c = 1/R$ , 为曲面的顶点曲率. 将此方程输入金刚石车床的数控程序,用刀口半径为 0.2mm 的刀具加工,完成了衍射面加工. 同时,为方便对比测试,还完成了一块具有同样面型但不带衍射环带的非球面透镜的加工.

### 3 测试

利用 Ealing Electro-Optics 红外/可见光学传递函数测量仪对折-衍射混合红外透镜和对比透镜进行了测试,为此配做了专用镜筒,在其设计和加工中保证了透镜在测试中的定位精度. 测试在常温下进行,条件为:热丝宽度 0.127mm,采用规格为  $4 \pm 0.1 \mu\text{m}$  的窄带滤光片和规格为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  的宽带滤光片,狭缝宽度 0.01mm.

#### 3.1 焦距

首先利用窄带滤光片对透镜的焦距进行了测量,得到折-衍射混合透镜的焦距为 50.320mm,对比非球面透镜的焦距为 51.052mm. 与  $f = 50\text{mm}$ ,  $f_r = 1/\phi_r = 51.024$  吻合较好.

#### 3.2 传递函数(MTF)

然后利用宽带滤光片分别测试了对比透镜与混

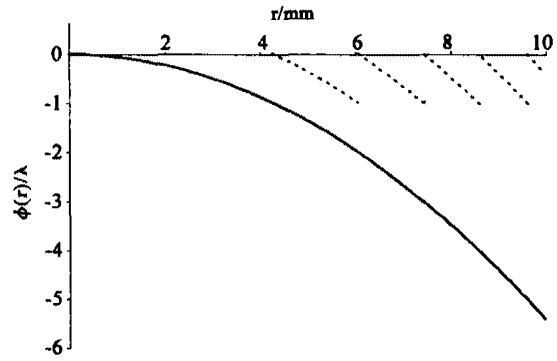
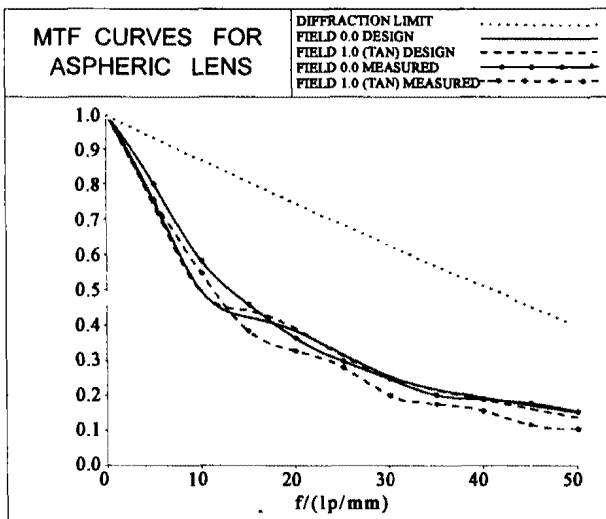


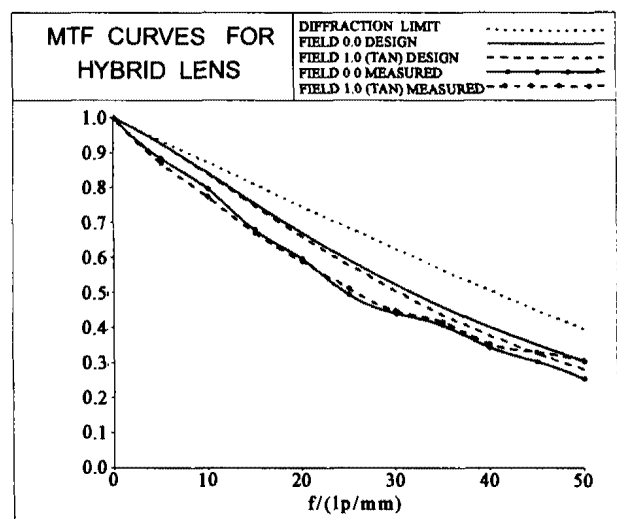
图 5 衍射面的相位分布  
Fig. 5 Phase distribution on the diffractive surface

合透镜的轴上与轴外  $1^\circ$  视场(子午方向)的传递函数,结果如图 7 所示,图中给出了设计值与测试值以便比较.

如第 2 节所述,影响本文中  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段上的红外成像单透镜像质的主要矛盾是色差. 受色差的影响,图 7(a)所示的非球面对比透镜的传递函数的设计值和测试值都不高. 混合透镜加入了衍射环带,有效地减小了工作波段上的色差. 故此,图 7(b)中的传递函数曲线在各个空间频率上相对对比透镜均有大幅度的提高. 以空间频率每毫米 30 线对处的 MTF 值为例:非球面对比透镜轴上和轴外  $1^\circ$  视场子午方向的设计值分别为 0.26 和 0.25,测试值分别显 0.25 和 0.20;混合透镜相应的设计值分别为 0.52 和 0.51,测试值分别为 0.44 和 0.45,均提高了一倍左右. 说明在成熟的工艺条件保障下,利用衍射元件校正红外系统中的色差是一种切实可行的方



(a)



(b)

图 6 非球面透镜(a)、折-衍混合透镜(b)的传递函数设计值和实测值  
Fig. 6 Design and measured MTF for (a) the aspheric lens and (b) the hybrid lens

案,可以有效地提高系统像质,简化系统结构。

对本文试制的混合透镜而言,MTF 的测试值普遍低于设计值,最大误差为 0.10,出现在轴上视场 25 线对处。经分析,误差源主要在于加工环节,例如,加工中使用的金刚砂刀具的刀口半径为有限值,使得衍射面相位突变环带处的台阶不是理想的直角,而是半径为 0.2mm 圆弧,使此区域中的衍射相位值与设计值不符。减小刀口半径可以减小上述误差,但实验发现刀口半经过小时会影响加工面的表面粗糙度。目前采用的工艺方案是在现有刀具库的基础上,通过实验确定刀具和控制参数的合理组合。

### 3.3 线扩散函数(LSF)

利用标量理论的近似计算公式<sup>[16]</sup>

$$\varepsilon \cong 1 - \frac{\pi^2}{36} \left( \frac{\Delta\lambda}{\lambda_M} \right)^2 \quad (7)$$

可以求出工作在 3~5 $\mu\text{m}$  波段的衍射光学元件( $\Delta\lambda = 2, \lambda_M = 4$ )的衍射效率为 93%。

由于不具备直接测量红外混合透镜衍射效率的手段,用英国 Ealing 公司生产的红外光学传函仪对其线扩散函数进行了测试。得到其轴上和轴外 1° 像点 90% 能量的弥散尺寸分别为 0.044mm 和 0.05 mm,基本符合图 3 所示“圈内能量”的计算结果。这从侧面说明本文采用的金刚石车削工艺加工的衍射面表面质量好,可以提供具有很高衍射效率的实用化红外混合透镜。

## 4 结论

利用金刚石车床车削工艺在国内首次试制成功衍射面在非球面基底上的折-衍射混合红外成像透镜。本文实验提供的数据充分表明,衍射面的加入有效地校正了透镜的色差,提高了其成像质量,在光学材料种类匮乏的红外波段应用有着显著的优越性;在正确的刀具选择和工艺条件下,金刚石车削材料衍射元件的表面粗糙度好,衍射效率高,是一种实用化的加工工艺。下一步的工作是探讨充分利用衍射光学元件的优点,改进现有红外成像系统的设计,提高像质,简化结构。

## REFERENCES

- [1] Veldkamp W B, Swanson G J. Binary optics: a new approach to optical design and fabrication[J]. *Optics News*, 1988, **12**: 29—30.

- [2] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, **27** (14): 2960—2971.
- [3] Missing M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design [J]. *Applied Optics*, 1995, **34** (14): 2452—2461.
- [4] Weng Zhicheng, Zhang Xin, Cong Xiaojie. Design of zoom lens with binary optics [J]. *Proc. SPIE*, 1995, **2539**: 118—127.
- [5] Wang Zhaoqi, Zhang Huijuan, Fu Rulian, et al. Hybrid diffractive-refractive ultra-wide angle eyepieces [J]. *Optik*, 2002, **113**(4): 159—162.
- [6] CUI Qing-Feng. Realization of three-color achromats with binary optical elements [J]. *Optical Acta Sinica* (崔庆丰. 用二元光学元件实现消复色差, *光学学报*), 1994, **14** (8): 877—881.
- [7] Weng Zhicheng, Lu Zhenwu, Zhang Xin. Lightweight remote-sensing CCD camera with binary optical element [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**: 616—626.
- [8] Wang Yongtian, Cui Fang, Sun Yunan, et al. A new approach for the fabrication of diffractive optical elements with rotationally symmetric phase distribution [J]. *Proc. SPIE*, 1997, **3348**: 94—97.
- [9] Xie Yongjun, Lu Zhenwu, Li Fengyou, et al. Lithographic fabrication of large diffractive optical elements on a concave lens surface [J]. *Optics Express*, 2002, **10** (20): 1043—1047.
- [10] Clark P P, Londono C. Production of kinoforms by single point diamond machining [J]. *Optics News*, 1989, **15**: 353—358.
- [11] Riedl M J. Predesign of diamond turned diffractive/refractive elements for IR objectives [J]. *SPIE Critical Review*, 1992, **CR41**: 140—156.
- [12] Wood A P, Rogers O J. Hybrid optics in dual waveband infrared systems [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**: 602—613.
- [13] SUN Qiang, WANG Zhao-Qi, LI Feng-You, et al. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5 $\mu\text{m}$  [J]. *Optics and Precision Engineering*. (孙强,王肇圻,李凤有,等. 红外 3.2~4.5 $\mu\text{m}$  波段折射/衍射光学系统的减热差设计. *光学精密工程*), 2002, **10**(2): 121—124.
- [14] Riedl M J. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems* [M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- [15] CODE V Reference Manual. Optical Research Associates, 2002.
- [16] WANG Yong-Tian, HE Ding, ZHANG Si-Jiong. GOLD—new CAD software package for complex optical systems [J]. *Opto-electronic Engineering* (王涌天,何定,张思炯. GOLD—新一代复杂光学系统分析优化软件包. *光电工程*), 1997, **24**(3): 42—48.