

引用格式: MENG Yu-tong, PIAO Ming-xu, WANG Qi. Design of Refractive Diffraction Hybrid Annular Aperture Ultrathin Imaging Optical System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1211003

孟禹彤, 朴明旭, 王琦. 折衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(12): 1211003

# 折衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计

孟禹彤, 朴明旭, 王琦

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:** 为了突破基底材料的选择局限性, 实现成像波段范围内的高质量成像, 在环形孔径超薄成像系统引入成像衍射光学元件, 设计了以光学塑料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为基底材料、焦距为 35 mm、有效孔径为 29 mm 的 4 次反射结构的折衍射混合环形孔径超薄成像系统. 该系统倍率色差小于  $2.2 \mu\text{m}$ , 在空间频率为 166 lp/mm 时的 MTF 值大于 0.4, 实现了高质量成像. 对环形孔径成像系统分别进行了公差分析与热分析, 结果表明, 在空间频率为 166 lp/mm 时, 各视场的子午和弧矢衍射 MTF 值大于 0.2, 在温度  $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  时, 各视场的子午和弧矢 MTF 值大于 0.28.

**关键词:** 环形孔径超薄成像系统; 成像衍射光学元件; 光学设计; 倍率色差

中图分类号: O435

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1211003

## Design of Refractive Diffraction Hybrid Annular Aperture Ultrathin Imaging Optical System

MENG Yu-tong, PIAO Ming-xu, WANG Qi

(Changchun University of Science and Technology, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to break through the selection limitation of substrate materials and achieve high imaging quality in the imaging wave band, the imaging diffractive optical elements is introduced to the ultrathin annular aperture imaging system. A hybrid refractive-diffractive ultrathin annular aperture imaging system is designed with four reflection structure, and the results of image quality evaluation and tolerance analysis are given. The substrate material of the hybrid refractive-diffractive ultrathin annular aperture imaging system is polymethyl methacrylate (PMMA), focal length is 35 mm, and effective aperture is 29 mm. The results show that the lateral color aberration is less than  $2.2 \mu\text{m}$  and the Modulation Transfer Function (MTF) is more than 0.4 at the spatial frequency of 166 lp/mm, thus high imaging quality is achieved. The tolerance analysis and thermal analysis of the annular aperture imaging system are given. The MTFs of tangential and sagittal direction are greater than 0.2 for each field of view when the spatial frequency is 166 lp/mm. The MTFs of tangential and sagittal direction are greater than 0.28 for each field of view at  $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  when the spatial frequency is 166 lp/mm.

**Key words:** Ultrathin annular aperture imaging system; Imaging diffractive optical element; Optical design; Lateral color aberration

**OCIS Codes:** 110.1220; 050.1970; 220.3620; 220.1000

## 0 引言

环形孔径超薄成像系统与传统光学成像系统相比, 具有体积小、结构紧凑等优点, 是一种基于传统反射

基金项目: 吉林省科技厅优秀青年人才基金项目(No.20190103134JH), 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(No.JJKH20181110KJ)

第一作者: 孟禹彤(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计. Email: 18604414914@163.com

导师(通讯作者): 朴明旭(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学设计、成像衍射光学. Email: piaomingxu123@126.com

收稿日期: 2019-06-19; 录用日期: 2019-10-08

<http://www.photon.ac.cn>

物镜和平板镜头设计的超薄型镜头<sup>[1]</sup>. 环形孔径超薄成像系统利用同心的反射面多次折叠光路, 在减小镜头的光学长度的同时确保了镜头的分辨率和光收集率. 由于环形孔径超薄成像系统加工在单一基底材料上, 导致光学系统产生的色差无法得到校正. 为了减小色差对系统成像质量的影响, TREMBLAY E J, ZHANG Rui-rui 等<sup>[2-3]</sup>以氟化钙作为基底材料设计环形孔径超薄成像系统. 主要是因为氟化钙在可见光波段的阿贝数较大, 光学系统产生的色差量值小, 可以结合后期处理的方式进一步消除色差的影响. 然而, 氟化钙材料的加工成本较高, 无法实现大规模批量化加工. DU Ke 等<sup>[4]</sup>提出了一种以空气为间隔的四次反射红外成像系统, 虽然该光学系统不会产生色差, 但其具有四个同心的反射面, 加工和装调较为困难. ZHANG Rui-rui 等<sup>[5]</sup>和 LI Lei 等<sup>[6]</sup>通过在环形孔径超薄成像系统后面加入校正器的方法来提高成像质量, 但使用校正器校正色差, 会导致光学系统结构复杂.

目前环形孔径超薄成像系统设计中, 材料选择单一, 且系统存在色差. 为了校正色差, 使用以空气为间隔结构的加工和装调较为困难, 使用校正器校正色差会导致系统结构复杂. 为了使环形孔径超薄成像系统实现消色差的同时简化系统结构, 突破基底材料选择局限性, 本文将成像衍射光学元件引入环形孔径超薄成像系统中, 设计了衍射混合环形孔径成像光学系统. 系统的基底材料为光学塑料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 此种材料通过注塑加工降低系统的成本.

## 1 环形孔径超薄成像光学系统设计

### 1.1 设计原理

环形孔径超薄成像光学系统的结构类似于反射式光学系统, 其原理结构如图 1. 多个圆环反射面分别加工在同一基底材料的前后表面上, 光线通过入射环带进入系统, 通过反射镜多次反射, 最终成像在探测器上.

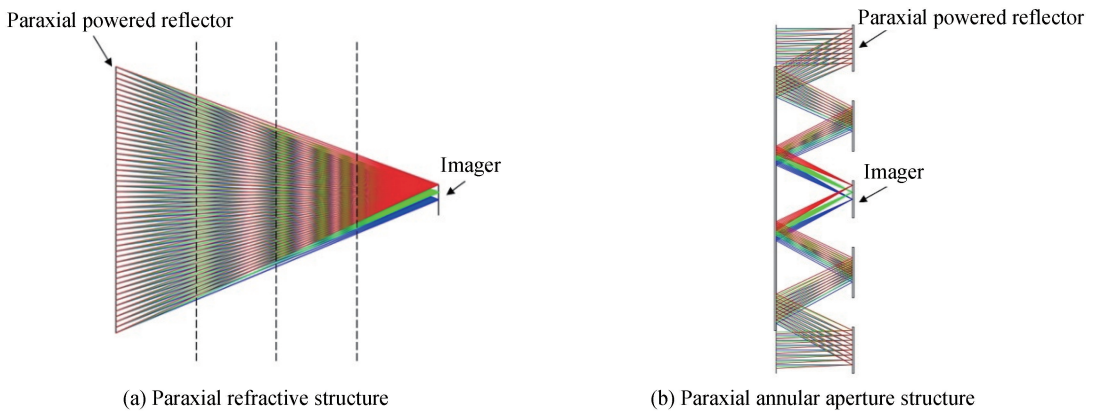


图 1 环形孔径超薄成像光学系统原理结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of ultrathin annular aperture imaging optical system

由图 1 可知, 当焦距相同时环形孔径的系统长度明显小于传统的光学系统, 比较环形孔径成像系统与传统镜头发现, 环形孔径成像系统的外直径增大, 且存在中心遮拦. 为了对比环形孔径光学系统和传统折射式光学系统的光线收集率, 给出了环形孔径的有效孔径直径<sup>[1]</sup>, 其表达式为

$$D_{\text{eff}} = D \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (1)$$

式中,  $D_{\text{eff}}$  为环形孔径超薄成像光学系统等效的传统光学系统口径直径,  $D$  为环形孔径光学系统的外直径,  $\alpha$  为遮拦比(环形孔径的内直径与外直径之比).

环形孔径的系统长度可由系统的焦距、环形孔径基底的折射率和光线反射次数计算得出

$$T = \frac{F \cdot n_s}{N} \quad (2)$$

式中,  $F$  为环形孔径超薄成像系统的有效焦距,  $n_s$  为系统基底的折射率,  $N$  为系统的反射次数. 由式(2)可知, 当焦距为一确定值时, 环形孔径超薄成像系统的厚度与反射次数和基底材料的折射率有关.

表 1 中传统光学系统的焦距为 35 mm、 $F/1.2$ , 为了便于比较, 其体积可以看作是一个底面直径为 29 mm 的圆, 高为 35 mm 的圆柱体的体积. 系统的有效孔径为 29 mm. 表 1 给出了环形孔径超薄成像系统和

传统光学系统的比较,由于环形孔径超薄成像系统存在中心遮拦,为了保证一定的有效孔径,所以系统的外直径增加.可以看出环形孔径超薄成像系统的系统长度与传统光学系统相比减少到 0.19~0.37 倍,但是系统的外直径增加到 1.4~2.3 倍.

表 1 环形孔径超薄成像光学系统与  $F/1.2$ 、焦距为 35mm 的传统光学系统尺寸对比

Table 1 Size comparison of ultrathin annular aperture imaging optical system and  $F/1.2$  traditional optical system with focal length 35 mm

Structural type	Track	Diameter	Volume
Conventional	1.00	1.0	1.00
Four reflection (PMMA)	0.37	1.4	0.72
Six reflection (PMMA)	0.25	1.7	0.73
Eight reflection (PMMA)	0.19	2.3	1.00

表 1 中还给出了以 PMMA 为基底的四次到八次反射的环形孔径成像系统的比较.可以看出八次反射环形孔径成像系统的系统长度约为四次反射环形孔径成像系统的 0.5 倍,系统的外直径约为四次反射环形孔径成像系统的 1.6 倍.当环形孔径成像系统的反射次数增加时,系统长度减小,但系统的外直径和体积明显增大.

## 1.2 初始结构设计

根据环形孔径超薄成像系统的设计原理,设计一个焦距  $f$  为 35 mm,  $F$  数为 1.2,基底为光学塑料 PMMA 的四次反射环形孔径超薄成像系统,根据式(1)可以计算得出,透镜的厚度  $T$  约为 13 mm.环形孔径超薄成像系统设计指标如表 2.

表 2 环形孔径超薄成像系统设计指标

Table 2 Design index of ultrathin annular aperture imaging system

Parameter	Value
Effective Focal length	35 mm
Thickness	$\leq 15$ mm
Field of view	$5.4^\circ$
Outer diameter	40.6 mm
Effective aperture diameter	29 mm
Detector	Omnivision 3 620

根据表 1 中对环形孔径成像系统反射次数的分析可知,当系统的有效孔径为 29 mm 时,使用四次反射环形孔径结构的系统长度为 13 mm,外直径为 40.6 mm.六次和八次反射结构的系统长度分别为 8.7 mm 和 6.5 mm,外直径分别为 49.3 mm 和 66.7 mm.虽然系统长度都小于 15 mm,但是六次和八次反射结构的口径和体积大于四次反射结构.综合考虑环形孔径成像系统的设计指标,本文采用四次反射结构的方式设计环形孔径超薄成像系统的初始结构.

环形孔径超薄成像系统的有效孔径为 29 mm 时,外直径和遮拦比的关系如图 2.可知当遮拦比为 0.7 时,通过式(1)可以求出环形孔径成像系统的

外直径为 40.6 mm,中心遮拦的直径为 28.4 mm.当环形孔径超薄成像系统的遮拦比大于 0.7 时,系统的外直径迅速增大,导致系统的体积和重量明显增加.当系统的遮拦比小于 0.7 时,系统的外直径变化较小,导致进入系统的光线不能全部通过第二个反射环带,最终使系统实际的有效孔径减小,无法满足系统的设计指标.因此环形孔径成像系统初始结构的遮拦比设定为 0.7,此时系统外直径和中心遮拦相对较小,且满足系统的设计指标.

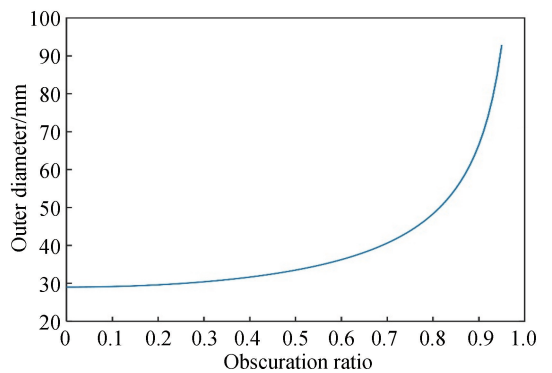


图 2 环形孔径超薄成像系统外直径和遮拦比关系  
Fig.2 Diagram of outer diameter and obscuration ratio of ultrathin annular aperture imaging system

为了满足设计指标,根据计算得到的结构参数,在 Zemax 中采用理想模型进行搭建<sup>[7]</sup>,然后将反射面替换成偶次非球面,进一步优化得到环形孔径超薄成像系统初始结构参数如表 3.

表 3 环形孔径超薄成像系统初始结构参数

Table 3 Initial structural parameters of ultrathin annular aperture imaging system

Surface	Radius	Thickness	Glass
Obj	$\infty$	$\infty$	—
Stop	-229.8	14.8	PMMA
Even Asphere	-70.8	-14.1	MIRROR
Even Asphere	-140.3	12.4	MIRROR
Even Asphere	156.3	-12.7	MIRROR
Even Asphere	82.3	12.3	MIRROR
6	-14.3	0.4	—
IMA	$\infty$	—	—

环形孔径超薄成像光学系统的前后反射面均使用偶次非球面设计,偶次非球面的曲面方程为<sup>[8]</sup>

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10} + a_6r^{12} + a_7r^{14} + a_8r^{16} \quad (3)$$

式中, $c$  为非球面顶点的曲率, $k$  为二次曲面系数, $a_1 \sim a_8$  为非球面系数.非球面可以有效校正单色像差,改善成像质量.然而,环形孔径超薄成像系统初始结构的成像质量并不理想,系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)如图 3,可以看出系统的弧矢方向 MTF 曲线接近系统的衍射极限,子午方向轴外视场的 MTF 较差.

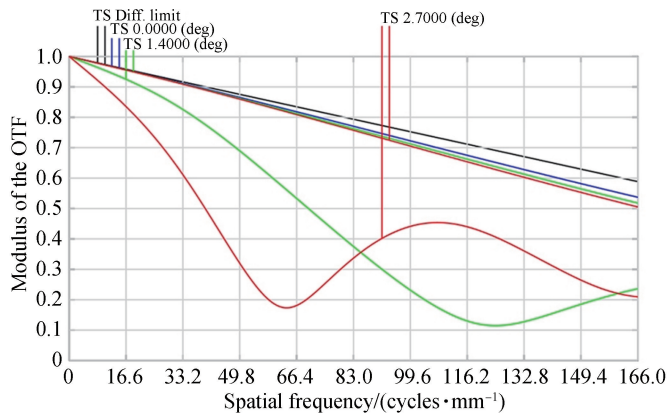


图 3 环形孔径超薄成像系统初始结构调制传递函数

Fig.3 Initial structure modulation transfer function of ultrathin annular aperture imaging system

环形孔径超薄成像系统初始结构的点列图如图 4(a),零视场的均方根(Root Mean Square, RMS)半径为  $0.76 \mu\text{m}$ ,最大视场的 RMS 半径为  $4.076 \mu\text{m}$ ,图中除了轴上点,轴外视场不同波长的弥散斑中心并不重

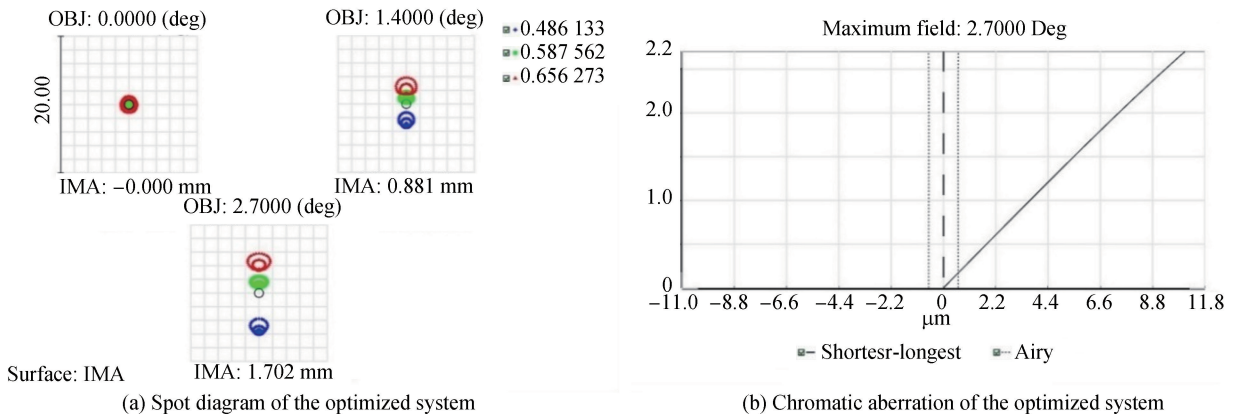


图 4 环形孔径超薄成像系统初始结构的点列图和倍率色差

Fig.4 Initial structure geometric of ultrathin annular aperture imaging system spot diagram and chromatic aberration



合,存在明显的倍率色差.环形孔径超薄成像系统初始结构的倍率色差如图 4(b),随着视场增大,系统的倍率色差也随之增大,且最大视场处的倍率色差为  $10.16 \mu\text{m}$ .经分析可知倍率色差是影响系统成像质量的主要因素.由于系统使用单一材料作为基底,所以系统的倍率色差无法得到校正.

## 2 折衍射混合环形孔径超薄成像系统设计

### 2.1 校正色差原理

成像衍射光学元件实质上是一个变周期光栅,与传统的折射和反射成像光学元件相比,成像衍射光学元件有很多独特的性质<sup>[9]</sup>.利用成像衍射光学元件特殊的色散性质<sup>[10]</sup>,可以实现对光学系统实现消色差.对于光学材料,通常用阿贝数  $\nu_D$  和相对部分色散  $P_{FD}$  表示其色散性质.同样,成像衍射光学元件的色散性质用等效阿贝数  $\nu_D^{\text{DOE}}$  和等效部分色散  $P_{FD}^{\text{DOE}}$  来表示.成像衍射光学元件的色散性质表达式为

$$\nu_D^{\text{DOE}} = \frac{n_D^{\text{DOE}} - 1}{n_F^{\text{DOE}} - n_C^{\text{DOE}}} = -\frac{\lambda_D}{\lambda_C - \lambda_F} \quad (4)$$

$$P_{FD}^{\text{DOE}} = \frac{n_F^{\text{DOE}} - n_D^{\text{DOE}}}{n_F^{\text{DOE}} - n_C^{\text{DOE}}} = -\frac{\lambda_D - \lambda_F}{\lambda_C - \lambda_F} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知成像衍射元件的色散性质与波长有关,与使用的基底材料无关.将  $\lambda_F = 0.486 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_D = 0.587 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_C = 0.656 \mu\text{m}$  代入式(4)和式(5)得到成像衍射光学元件的等效阿贝数  $\nu^{\text{DOE}} = -3.46$  和等效部分色散  $P_{FD}^{\text{DOE}} = 0.6063$ .由于成像衍射光学元件具有负阿贝数性质,将其与传统折射元件组合,可以实现单一折衍射混合光学元件消色差<sup>[11]</sup>.

在 1.2 节中设计的以 PMMA 为基底材料的环形孔径超薄成像系统,经过像差分析后发现影响其成像质量主要像差是倍率色差.可以引入成像衍射光学元件,进行倍率色差的校正.环形孔径超薄成像系统光路结构只有两个折射面,分别是系统的入射环带和距离探测器最近的出射面.由于成像衍射光学元件的入射环带与光阑重合,无法校正倍率色差,所以只能在距离探测器最近的出射面引入成像衍射光学元件.

### 2.2 设计结果分析

将环形孔径超薄成像系统的出射面引入成像衍射光学元件,并和环形孔径超薄成像系统构成折衍射混合光学系统用来校正色差.在 Zemax 中使用二元光学元件 2(Binary 2)面型<sup>[12-13]</sup>作为成像衍射光学元件进行设计, Binary 2 面型的作用是根据多项式(6)将位相添加到光路设计中.

$$\phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i} \quad (6)$$

式中,  $M$  为衍射级次,  $N$  为多项式的项数,  $A_i$  是为  $\rho$  的第  $2i$  次幂的系数,  $\rho$  是为归一化的径向孔径坐标.当  $N=1$  时,二次项系数  $A_1$  确定了衍射面的光焦度.

$$K_D = \frac{-m\lambda A_1}{\pi} \quad (7)$$

式中,  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  为波长,系数  $A_1$  用来校正光学系统的色差,其他项系数的作用相当于非球面<sup>[14-15]</sup>.将第六个面设为成像衍射光学元件,经过优化后,光学系统结构参数如表 4.

表 4 折衍射混合环形孔径超薄成像系统优化后光学系统参数

Table 4 Parameters of optimized refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

Surface	Radius	Thickness	Glass
Obj	$\infty$	$\infty$	—
1 stop	-1 805.51	15	PMMA
2	-74.27	-15	MIRROR
3	-120.68	12.6	MIRROR
4	443.55	-12.7	MIRROR
5	118.54	12.2	MIRROR
6 DOE	-9.29	0.4	—
IMA	$\infty$	—	—

加入成像衍射光学元件后,折衍射混合环形孔径超薄成像系统的结构如图 5.光线通过入射环带 1 进入光学系统,经过 2,3,4,5 非球面反射环带,透过成像衍射光学元件面,最后成像到探测器处.其中非球面均为偶次非球面,相应系数如表 5.

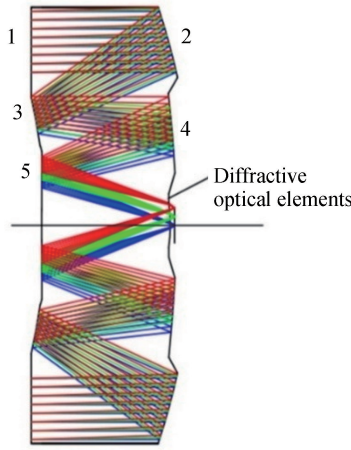


图 5 折衍射混合环形孔径超薄成像系统结构

Fig.5 Structure of refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

表 5 折衍射混合环形孔径超薄成像系统的非球面系数

Table 5 Aspheric coefficient of refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

Surface	Aspheric correction coefficient		
	A4	A6	A8
1	$2.39 \times 10^{-6}$	$-5.34 \times 10^{-9}$	$3.65 \times 10^{-12}$
2	$-7.14 \times 10^{-7}$	$-1.83 \times 10^{-9}$	$1.75 \times 10^{-12}$
3	$-1.76 \times 10^{-5}$	$-2.95 \times 10^{-8}$	$-1.74 \times 10^{-10}$
4	$-5.38 \times 10^{-5}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$-1.61 \times 10^{-10}$
5	$-6.44 \times 10^{-5}$	$-6.36 \times 10^{-7}$	$4.93 \times 10^{-9}$
6 DOE	$1.4 \times 10^{-2}$	$-3.22 \times 10^{-3}$	$3.01 \times 10^{-4}$

折衍射混合环形孔径超薄成像系统的点列图如图 6(a),艾里斑大小为  $0.6157 \mu\text{m}$ ,最大视场的 RMS 半径为  $1.69 \mu\text{m}$ ,与图 4(a)中初始结构最大视场的 RMS 半径相比减少了  $2.37 \mu\text{m}$ ,且所有视场各波长光斑中心基本重合.加入衍射元件优化后的倍率色差如图 6(b),光学系统的倍率色差最大为  $2.2 \mu\text{m}$ ,相比初始结构倍率色差( $10.16 \mu\text{m}$ ),折衍射混合环形孔径超薄成像系统的倍率色差减少了  $7.96 \mu\text{m}$ ,可以看出系统的倍率色差明显减少,倍率色差得到了很好的校正.

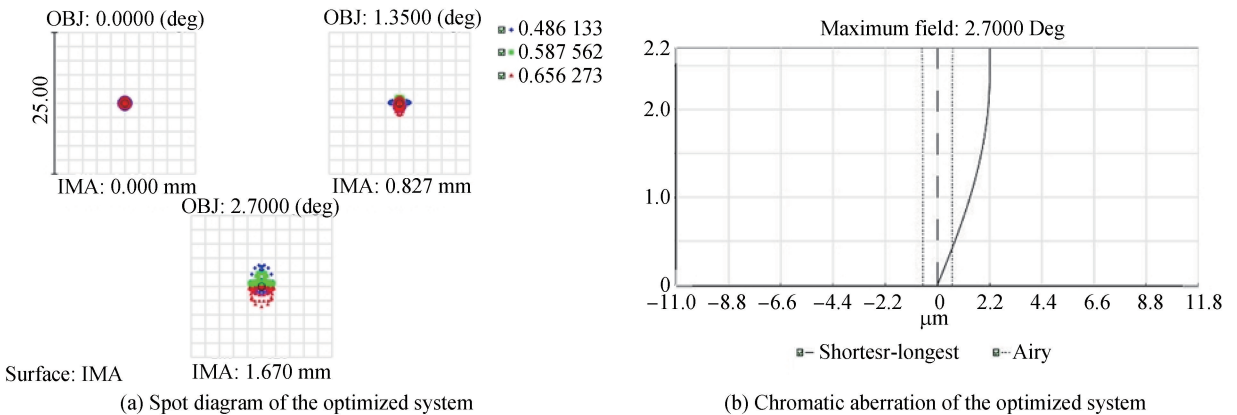


图 6 优化后折衍射混合环形孔径超薄成像系统的点列图和倍率色差

Fig.6 Comparison of lateral color between the initial structure and optimized refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

环形孔径超薄成像系统的调制传递函数如图 7,可以看出轴外各视场的 MTF 均靠近零度视场 MTF,且在空间频率  $166 \text{ lp/mm}$  处不同视场的 MTF 值大于 0.4,实现高质量成像.

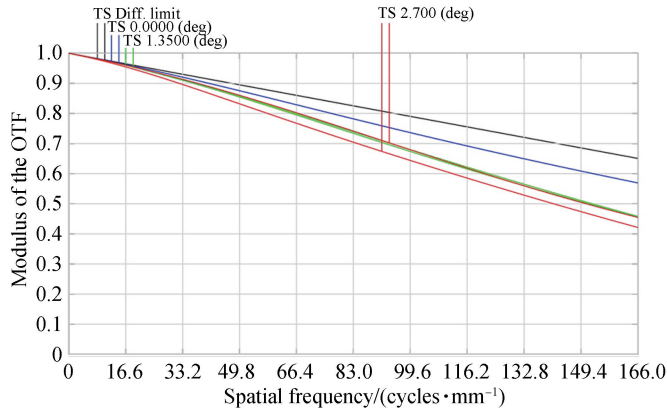


图 7 折衍射混合环形孔径超薄成像系统调制传递函数

Fig.7 MTF of the designed refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

成像衍射光学元件的特征参量曲线如图 8,其中曲线 II 表示衍射面相位随着实际径向坐标的变化,用周期数 (periods) 表示;曲线 I 表示衍射面每毫米周期数 (period/mm) 随着实际径向坐标的变化.从图中可以看出,随着径向坐标的增加,衍射面每毫米的周期数增加.在衍射面边缘处,每毫米环带周期数为 115,对应最小周期宽度为  $8.7 \mu\text{m}$ .

### 2.3 公差分析

折衍射混合环形孔径超薄成像系统是由单个基底材料加工而成,所以应该主要分析各个表面的顶点曲率半径公差、厚度公差、偏心 and 倾斜公差.折衍射混合环形孔径超薄成像系统具有多个高次非球面反射镜,面型加工精度要求较高.对折衍射混合环形孔径超薄成像系统的设计结果进行公差分析,得到影响系统综合性能的所有公差分配如表 6.

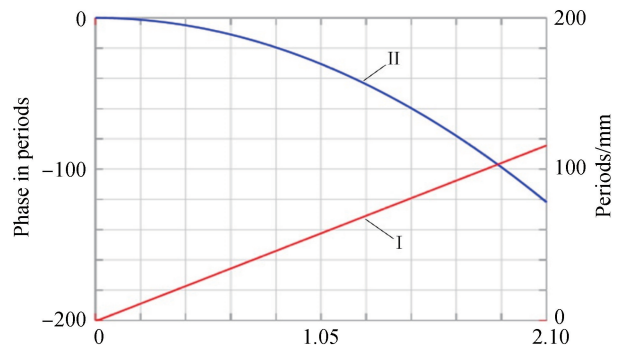


图 8 折衍射混合环形孔径超薄成像系统衍射面特征参量曲线

Fig.8 Characteristic parameter curve of the diffraction plane of refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

表 6 折衍射混合环形孔径超薄成像系统加工公差

Table 6 Fabrication tolerance for refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

Tolerance	1	2	3	4	5	6
Vertex radius of curvature/mm	$\pm 0.05$	$\pm 0.005$	$\pm 0.005$	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	$\pm 0.01$
Thickness/ $\mu\text{m}$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	
DEC/ $\mu\text{m}$	$\pm 7.5$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$
Tilt	$\pm 1.8'$	$\pm 15''$	$\pm 15''$	$\pm 20''$	$\pm 20''$	$\pm 2'$
PV at 546 nm	$0.40\lambda$	$0.2\lambda$	$0.2\lambda$	$0.40\lambda$	$0.40\lambda$	$0.40\lambda$

系统采用焦点位置作为补偿,焦点补偿范围为  $\pm 3.6 \mu\text{m}$ .给出 PMMA 折射率公差为  $\pm 0.0005$ ,阿贝数公差为  $\pm 0.8\%$ .使用表 6 中制定的公差对系统进行分析,当空间频率为  $166 \text{ lp/mm}$  时,所有视场的衍射 MTF 值大于 0.2.折衍射混合环形孔径超薄成像系统所有视场 MTF 值如表 7.

表 7 折衍射混合环形孔径超薄成像系统所有视场 MTF 值

Table 7 MTF values of all fields for refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

Field	Diffraction MTF tangential		Diffraction MTF sagittal	
	Nominal	Estimated	Nominal	Estimated
$0^\circ$	0.545	0.31	0.524	0.35
$1.35^\circ$	0.463	0.21	0.451	0.2
$2.7^\circ$	0.452	0.26	0.502	0.33

### 2.4 热分析

PMMA 的折射率随温度的变化为  $\frac{dn}{dt} = 8.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , 热膨胀系数为  $6 \times 10^{-5}$ , 热膨胀系数是无机光学玻璃的 8~10 倍, 所以光学系统的成像质量对温度变化比较敏感. 折衍射混合环形孔径超薄成像系统使用 PMMA 为基底, 温度的变化引起基底厚度、表面曲率半径和材料折射率等参数变化. 对折衍射混合环形孔径超薄成像系统进行  $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  的热分析, 并对系统的结构参数进行了优化调整, 光学系统不同温度的 MTF 曲线如图 9.

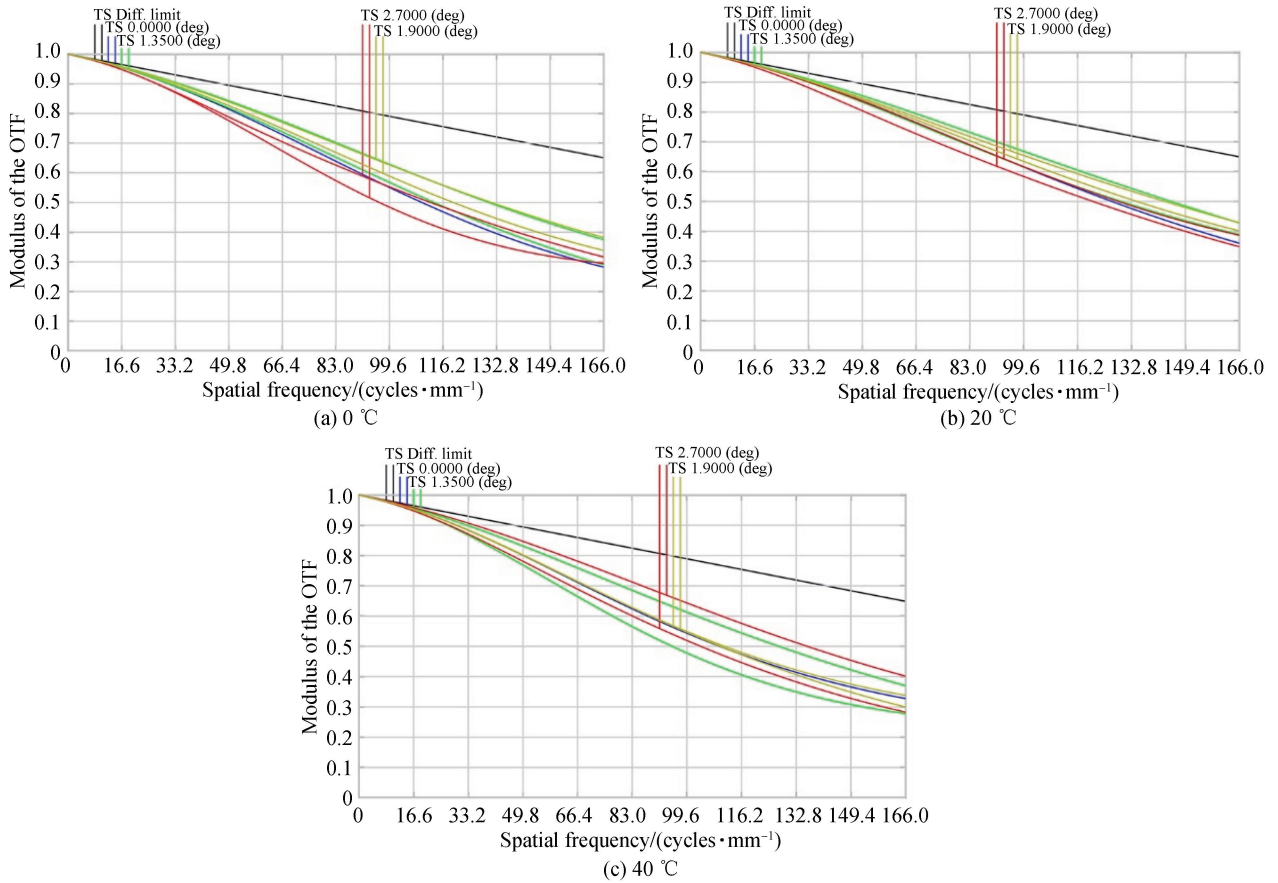


图 9 折衍射混合环形孔径超薄成像系统不同温度下的 MTF 曲线

Fig.9 MTF curves of refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

当空间频率为 166 lp/mm 时, 光学系统  $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  所有视场的 MTF 值大于 0.28, 折衍射混合环形孔径超薄成像系统不同温度下的各视场 MTF 值如表 8.

表 8 不同温度下的各视场 MTF 值

Table 8 Value of MTF of each field of view at different temperatures

Field of view/( $^\circ$ )	0 $^\circ\text{C}$		20 $^\circ\text{C}$		40 $^\circ\text{C}$	
	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal
0	0.28	0.28	0.36	0.36	0.32	0.32
1.35	0.29	0.37	0.42	0.39	0.36	0.28
1.9	0.37	0.33	0.43	0.4	0.3	0.33
2.7	0.31	0.3	0.36	0.39	0.29	0.39

折衍射混合环形孔径超薄成像系统在不同温度下的倍率色差如图 10. 当温度为  $0^\circ\text{C}$  时系统的倍率色差最大值为  $1.618 \mu\text{m}$ ,  $20^\circ\text{C}$  时系统的倍率色差最大值为  $1.607 \mu\text{m}$ ,  $40^\circ\text{C}$  时系统的倍率色差最大值为  $1.598 \mu\text{m}$ . 从图中可以看出温度变化对折衍射混合环形孔径超薄成像系统的倍率色差影响较小.



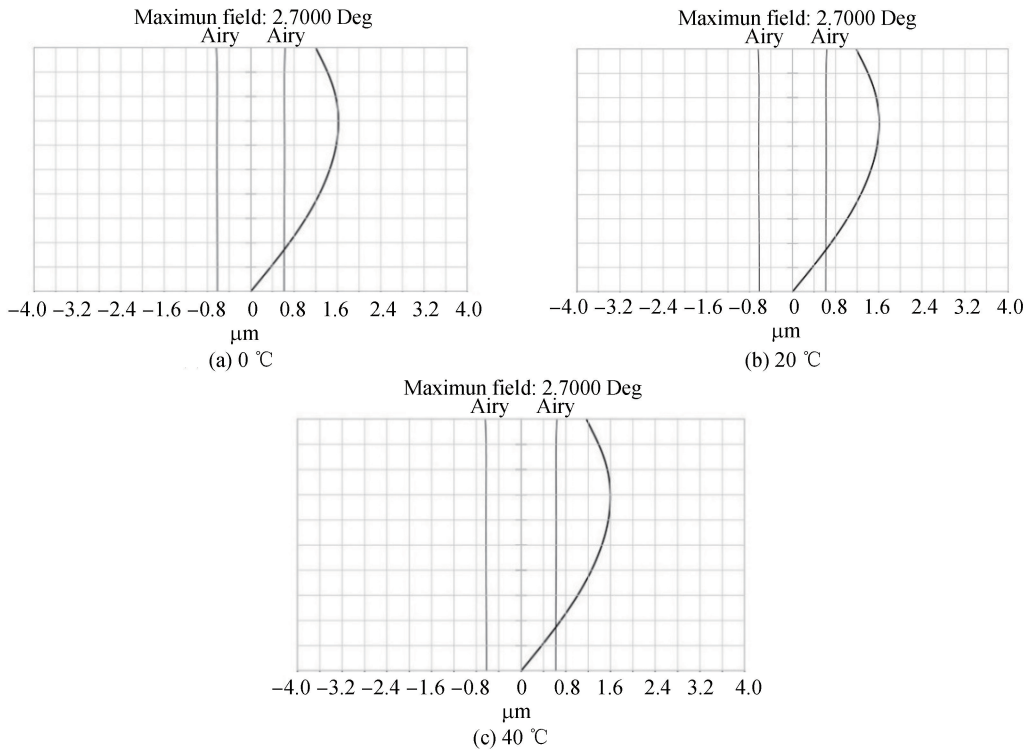


图 10 折衍射混合环形孔径超薄成像系统不同温度下的倍率色差

Fig.10 Lateral color aberration of refractive diffraction hybrid ultrathin annular aperture imaging optical system

由于折衍射混合环形孔径超薄成像系统的像方数值孔径较大,焦深范围相对较小,因此光学系统对温度变化相对较敏感,公差较严格.目前利用波前编码技术可以大幅度增加系统的焦深,减少温度对系统成像质量的影响,并放宽系统的公差<sup>[16]</sup>.

### 3 结论

本文设计了一种折衍射混合环形孔径超薄成像系统.设计结果表明,以 PMMA 为基底的环形孔径超薄成像光学系统,在加入成像衍射光学元件后,其倍率色差从  $10.16 \mu\text{m}$  减小到  $2.2 \mu\text{m}$ ,MTF 曲线在空间频率  $166 \text{ lp/mm}$  处的 MTF 大于 0.4.该环形孔径超薄成像光学系统解决了过去使用氟化钙基底成本高的问题.在系统中使用成像衍射光学元件,使成像系统不用加校正器就能实现系统的消色差,并实现高质量成像要求.对折衍射混合环形孔径成像系统进行了公差分析,可知空间频率  $166 \text{ lp/mm}$  时,各视场的子午和弧矢衍射 MTF 值大于 0.21.对折衍射混合环形孔径成像系统进行了热分析,在空间频率为  $166 \text{ lp/mm}$ , $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  的各视场的子午和弧矢 MTF 值大于 0.28.

### 参考文献

- [1] TREMBLAY E J, STACK R A, MORRISON R L, *et al.* Ultrathin cameras using annular folded optics[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(4): 463-471.
- [2] TREMBLAY E J, RUTKOWSKI J, TAMAYO I, *et al.* Relaxing the alignment and fabrication tolerances of thin annular folded imaging systems using wavefront coding[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(27): 6751-6758.
- [3] ZHANG Rui-rui, SHEN Wei-min. Ultrathin lenses using annular folded optics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(5): 1306-1310.  
张蕊蕊,沈为民. 环形孔径折叠型超薄镜头[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(5): 1306-1310.
- [4] DU Ke, CHENG Xue-min, LV Qi-chao, *et al.* Design of an ultra-thin dual band infrared system[C]. SPIE, 2014, **9272**: 92720U1-92720U6
- [5] ZHANG Rui-rui, SHEN Wei-min. Long focal-length optical system using annular aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1140-1143  
张蕊蕊,沈为民. 环形孔径长焦距光学系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1140-1143.
- [6] LI Lei, WANG Di, LIU Chao, *et al.* Ultrathin zoom telescopic objective[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(16): 18674-18684.

- [7] ZEMAX Development Corporation, ZEMAX Optical Design Program User's Guide[EB/OL]. [2018-02-03]. <http://www.zemax.com>.
- [8] LIU Qiang, WANG Xin, HUANG Geng-hua, *et al.* Optical design of wide field view and large relative aperture off-axis three-mirror reflective system with tilted optical axis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(3): 0322002  
刘强,王欣,黄庚华,等. 大视场大相对孔径斜轴离轴三反望远镜的光学设计[J]. 光子学报, 2019, **48**(3):0322002
- [9] ZHANG Dong. Research on hybrid diffractive-refractive telescope system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010: 11-17.  
张栋. 折衍射混合望远镜系统的研究[D]. 长春:长春理工大学, 2010:11-17.
- [10] CUI Qing-feng. Realization of three-color achromats with binary optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 877-881  
崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. 光学学报, 1994, **14**(8):877-881
- [11] CUI Qing-feng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 12-35.  
崔庆丰. 折衍射混合成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(1):12-35.
- [12] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, *et al.* Design of off-axial optical system for binary optic infrared imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **34**(4): 573-576.  
杨新军,王肇圻,孙强,等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(4):573-576.
- [13] WU Huan-bao, WANG Zhao-qi, FU Ru-lian. Design of a hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric  $f-\theta$  lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **34**(12): 1818-1821.  
吴环宝,王肇圻,傅汝廉. 折/衍混合远心消色差  $f-\theta$  物镜系统设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1818-1821.
- [14] LENG Jia-kai. Research on hybrid diffractive-refractive optical system with long focal length and high resolution[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 21-29.  
冷家开. 长焦距高分辨率折衍射混合光学系统的研究[D]. 长春:长春理工大学, 2008:21-29
- [15] LENG Jia-kai, CUI Qing-feng, PEI Xue-dan, *et al.* Spherochromatism of hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 981-987  
冷家开,崔庆丰,裴雪丹,等. 折衍射混合复消色差望远镜中的色球差[J]. 光学学报, 2008, **28**(5):981-987
- [16] ZHANG Wen-zi, CHEN Yan-ping, ZHAO Ting-yu, *et al.* Simple OTF stability based method for pupil phase mask's optimization in wavefront coding system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2017-2021.  
张文字,陈燕萍,赵廷玉,等. 一种基于 OTF 稳定性的波前编码相位板优化方法[J]. 光子学报, 2007, **36**(11):2017-2021.