

文章编号 1004-924X(2010)01-0009-06

用于无模光刻的连续浮雕谐衍射透镜阵列设计

单明广^{1,2}, 钟志¹, 郭黎利¹

- (1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了获得实时调焦写入以及高的系统分辨力和衍射效率, 提出了一种基于连续浮雕谐衍射透镜阵列的无模光刻方法。该方法采用连续浮雕谐衍射透镜阵列作为无模光刻的物镜阵列, 在兼顾系统分辨力和衍射效率基础上, 由同一衍射透镜阵列实现聚焦写入和检焦; 同时利用谐衍射透镜的深浮雕特性调制透镜的环带宽度, 降低透镜的制作难度。在分析谐衍射透镜特点以及考虑激光直写制作工艺对连续深浮雕衍射聚焦特性影响的基础上, 设计、制作并测试了设计波长为 441.6 nm, F 数为 7.5 的连续浮雕谐衍射透镜阵列。测试结果表明, 该阵列同时具有聚焦写入和检焦功能, 且对写入激光和检焦激光的衍射效率均优于 70%, 有望改善无模光刻的制作质量。

关键词: 无模光刻; 连续浮雕谐衍射透镜; 谐衍射

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A

Design of continuous-relief harmonic diffractive microlens array for maskless lithography

SHAN Ming-guang^{1,2}, ZHONG Zhi¹, GUO Li-li¹

- (1. *Information and Communication Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;*
2. *Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: In order to achieve the focusing in real time and to obtain the high writing resolution and diffraction efficiency in the exposure process, a new maskless lithography based on a continuous-relief harmonic diffractive microlens (DMs) array is proposed. The lithography takes the continuous-relief harmonic diffractive microlens array as an objective array of the maskless lithography to integrate the defocus-detecting array and the writing array by taking both the writing resolution and diffraction efficiency into consideration, and to design the array with a deep relief to make the array fabrication easy. To verify its validity, the continuous-relief harmonic diffractive microlens array with $F/7.5$ and a design wavelength of 441.6 nm is designed, and fabricated after analysis on the characteristics of maskless lithography. Experimental results indicate that the developed array can be used to synchronously focus the writing laser and the autofocusing laser into the same spots, and can achieve a diffraction ef-

收稿日期: 2009-01-16; **修订日期:** 2009-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60878028); 黑龙江省博士后经费资助项目 (No. LBH-Z08214); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金资助项目 (No. 2008RFQXG024; No. 2009RFQXG055); 哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目 (No. HEUFT07079)

efficiency over 70% for both writing wavelength and defocus-detecting wavelength.

Key words: maskless lithography; continuous-relief diffractive microlens; harmonic diffraction

1 引言

随着激光直写^[1-2]、电子束直写^[3]、聚焦离子束直写^[4]等直写工艺的发展,高性能的连续浮雕衍射透镜制作已成为现实。相对于台阶式分布衍射透镜,连续浮雕衍射透镜由于具有更高的衍射效率,更适合大数值孔径制作等优点,在光纤耦合、共焦探测、分束器、多通道光互联和光传感器件^[4-6],尤其是在近年发展起来的无模光刻等领域更具有吸引力^[7-10]。但是普通的连续浮雕衍射透镜大多是在单波长条件下工作,使其在复色光系统中的应用受到限制;同时随着 $F/\#$ 的减小、波长的缩短,普通的连续浮雕衍射透镜的加工工艺难度也显著增大,甚至超出了现有的微细加工能力。另外,在无模光刻等应用中,为了获得高的分辨力,常采用小 $F/\#$ 的衍射透镜阵列^[7-10];而且为了获得实时调焦写入以提高写入质量^[7,11,12],也需要使聚焦写入和检焦由同一个衍射透镜阵列实现。因此,对普通连续浮雕衍射透镜的设计和加工进行改进很有必要。1995年,Sweeney和Sommargren^[13]及Faklis和Morris^[14]分别提出了谐衍射透镜的概念,它利用光在位相匹配因子恒定的深浮雕衍射透镜中传播的折射和衍射特性,可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度,在一定程度上克服了衍射器件存在大色差的缺点,同时利用透镜的深浮雕特性,优化了调制衍射透镜的浮雕深度和环带宽度,降低了透镜制作难度,因而在多光谱、宽视场及大数值孔径的光学成像系统中得到广泛应用^[13-16]。相对其他直写技术,激光直写技术除了技术成熟外,更适合大范围、深浮雕的连续浮雕衍射透镜制作,且成本较低,因而在连续深浮雕制作领域备受关注。

本文在分析谐衍射透镜特点基础上,考虑激光直写制作工艺对连续深浮雕衍射聚焦特性的影响,对无模光刻聚焦写入透镜阵列在检焦波长处进行谐衍射设计,使聚焦写入和检焦由同一个连续浮雕衍射透镜阵列实现。制作和测试了该衍射透镜阵列,以此兼顾系统的分辨力和衍射效率,并达到实时调焦写入的目的。

2 设计理论基础

谐衍射透镜的特点是相邻环带之间的光程差为设计波长 λ_0 的 p 倍 ($p \geq 2$),相当于设计波长为 $p\lambda_0$,焦距为 f_0 的普通衍射透镜。因为衍射透镜焦平面上的能量分布可看作光线通过各闪耀环带后在焦平面干涉的结果,若使用波长为 λ ,则其 q 级焦距为

$$f_{q,\lambda} = \frac{p\lambda_0}{q\lambda} f_0, \quad (1)$$

若要求 $f_{q,\lambda}$ 与设计焦距 f_0 重合,应满足:

$$\lambda = \frac{p\lambda_0}{q}, \quad (2)$$

式(2)表明,对于谐衍射透镜,凡波长满足式中整数 q 所对应的谐振光波均将会聚到共同的焦点 f_0 处,也就是说,可运用谐衍射原理,设计写入激光和检焦激光的波长和衍射级次,使衍射透镜阵列将写入激光和检焦激光会聚到同一焦点,从而为无模光刻系统达到实时同步调焦写入提供可能。

连续浮雕透镜的衍射效率除依赖于设计的合理性外,还依赖于具体制作技术的精度。相对电子束直写和聚焦离子束直写,激光直写因为具有制作精度高、成本低、适合深浮雕、大范围透镜制作等优点,在连续浮雕衍射透镜阵列制作领域备受关注。但由于高斯聚焦写入光斑尺寸有限的影响,很难生成激光直写制作的连续浮雕锐边过渡,而使获得的浮雕面型被匀化,形成卷积浮雕;同时,整个制作过程,包括机械控制(扫描运动)和化学(曝光、显影)过程,都不可避免存在误差,进而影响浮雕的蚀刻深度。增大浮雕深度,虽然可增大环带周期,降低制作难度,减小反向斜坡,增大衍射效率,但随着浮雕深度的增大,衍射效率受深度制作误差影响增大,并且需要厚的光刻胶,进一步加剧深度制作误差。研究表明,对于可接受的深度制作误差, p 选为 2 或 3 的衍射透镜聚焦性能是最优的,并可获得最大的衍射效率^[2]。

基于上述分析,假设无模光刻系统的写入激光为 HeCd 激光器,其波长为 $\lambda_0 = 441.6 \text{ nm}$,同

时考虑检焦激光常用对光刻胶不灵敏的红光,运用公式(2)优化设计检焦波长和谐振级次,可得写入激光的衍射级次 p 为 3,检焦激光波长为 $\lambda = 662.4 \text{ nm}$,其衍射级次为 $q = 2$ 。

在标量衍射理论中,衍射透镜被认为是理想的薄位相平面。为了保证并行写入的分辨率和减小像差,本设计阵列需采用非傍轴近似,其表面浮雕函数可表示为

$$S(r) = \frac{mp\lambda_0 + f_0 - \sqrt{f_0^2 + r^2}}{n_0 - 1}, \quad r_m \leq r \leq r_{m+1}, \quad (3)$$

其各环带半径为

$$r_m = \sqrt{2mp\lambda_0 f_0 + (mp\lambda_0)^2}, \quad 0 \leq m \leq M$$

式中, p 为位相匹配因子,可优化调整衍射透镜的浮雕深度和环带宽度,使环带特征尺寸大于制作工艺能够制作的最小线宽尺寸,以降低制作难度; m 为环带序号; M 为环带总数目; f_0 为设计波长 λ_0 入射时透镜的焦距; n_0 为设计波长 λ_0 入射时透镜材料的折射率。

假设准直扩束后的写入激光和检焦激光以均匀平面光波形式垂直入射透镜阵列,并考虑无模光刻系统光强调制分束设备—数字微镜(DMD)单元尺寸($16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$),基于公式(3)以及文献[8]优化阵列的 $F/\#$ 和中心距以抑制阵列中透镜间的聚焦串扰,从而设定连续浮雕谐衍射透镜阵列光学设计参量分别为:设计波长为 $\lambda_0 = 441.6 \text{ nm}$,位相匹配因子 $p = 3$;检焦激光波长为 $\lambda = 662.4 \text{ nm}$,谐衍射级次为 $q = 2$;透镜口径为圆形,半径 $R_0 = 64.0 \mu\text{m}$,焦距 $f_0 = 960.0 \mu\text{m}$,相邻透镜中心距为 $P = 192.3 \mu\text{m}$,阵列有效范围优于 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$;为了获得良好的光学性能和光通过率,基底材料选为熔融石英, $n_0 = 1.466$ 。设计的衍射透镜浮雕面型如图 1 所示,阵列布局如图 2 所示。

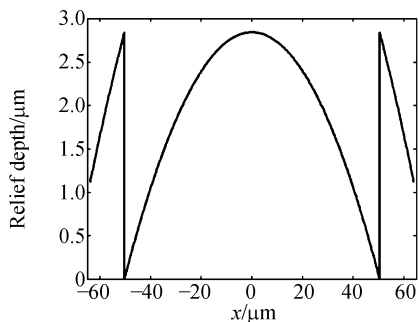


图 1 阵列中衍射透镜浮雕面型

Fig. 1 Designed continuous-relief DM in array

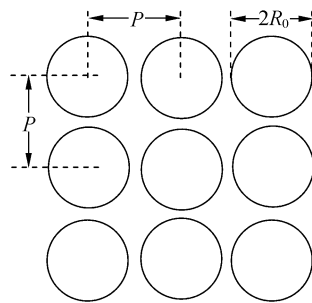


图 2 阵列设计布局示意图

Fig. 2 Layout of DMs in array

为了屏蔽掉非通过衍射透镜的写入激光对透镜聚焦的影响,在透镜间镀上一层铬(Cr);为了增加写入激光的透射率,同时抑制检焦激光的检焦信号与因阵列基底背面反射而产生的杂光信号之间产生干涉效应,在阵列基底的背面镀了一层增透膜,对于写入激光和检焦激光其透过率仿真值均优于 99.0%。

3 制作与测试分析

本课题组与俄罗斯科学院自动化和电工所合作,利用激光直写机 CLWS300 制作了本文的衍射透镜阵列。制作的阵列光学显微图如图 3 所示,阵列中任一透镜浮雕结构 AFM 测量结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,因为激光直写的卷积效应,环带的锐边过渡不再锐利,这不可避免地影响阵列的聚焦特性。

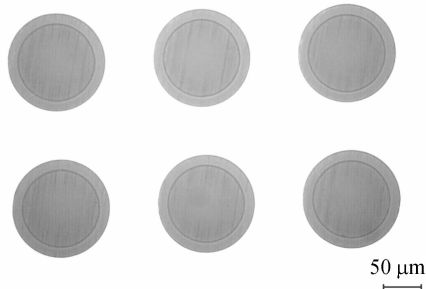


图 3 连续浮雕衍射透镜阵列光学显微图

Fig. 3 Micrograph of continuous-relief DMs array

为了评价所制作的衍射透镜阵列的聚焦特性,采用了如图 5 所示的测试系统。由激光器发出的激光,经过衰减、准直扩束后,垂直入射到衍射透镜阵列上,再经物镜的放大入射到 CCD 探测

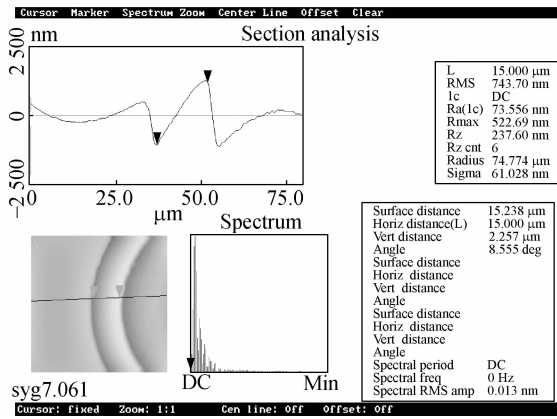
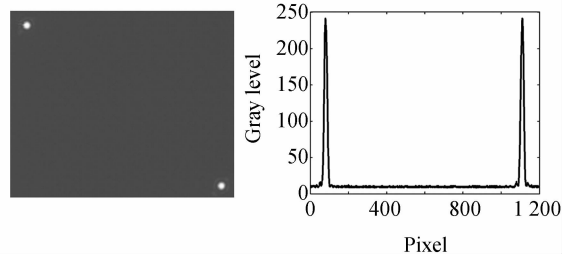
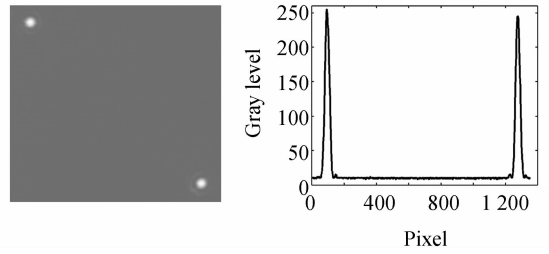


图 4 连续浮雕衍射透镜原子力显微镜扫描图
Fig. 4 AFM image of continuous-relief DMs

器上,再沿光轴方向调整微位移台,直至最锐利的聚焦光斑出现在与 CCD 连接的监视器上,从而得到阵列聚焦光斑如图 6 所示。其中,写入激光波长为 441.6 nm,实际使用检焦激光波长为 670 nm。



(a) at 441.6 nm



(b) at 670 nm

图 6 阵列聚焦光斑图

Fig. 6 Focal spots of array

因为无模光刻中更为关心的是镜阵列中各个衍射透镜的点扩散函数和衍射效率,放大阵列中任意一个衍射透镜分别在写入激光和检焦激光入射时的聚焦光斑如图 7 所示,其光斑尺寸 FWHM(半极值宽度)分别为 3.56 μm (441.6 nm

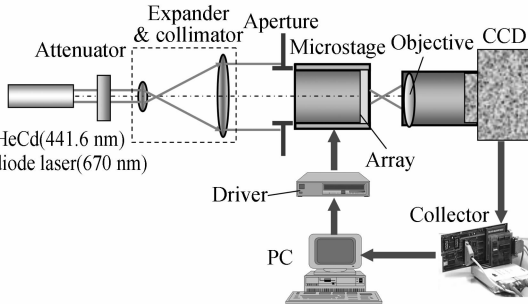
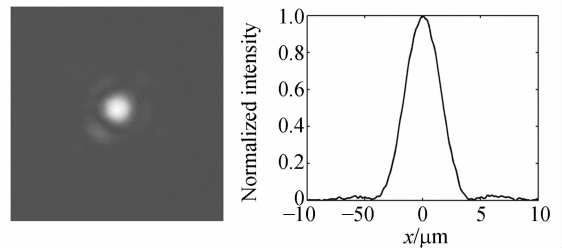
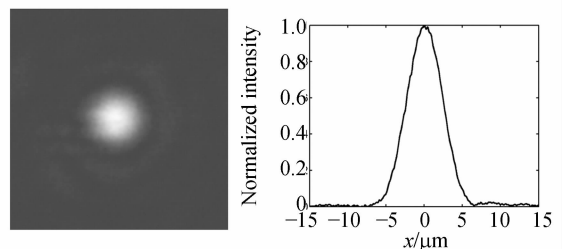


图 5 衍射透镜衍射聚焦性能测试实验系统原理框图
Fig. 5 Schematic diagram of experimental system used to measure the focusing property of DMs

从图 6 中可以看出,尽管因为准直扩束后激光光束质量(平面波特性的)不理想以及制作误差、测量误差的影响,测试的衍射透镜阵列聚焦光斑光强峰值略有差异,但每个单透镜的点扩散函数曲线仍十分接近,从而表明所制作的阵列的均匀性较好。在实际工作中,为了保证衍射透镜阵列聚焦光斑光强分布的均匀性,除了改善入射激光质量外,还可在无模光刻曝光过程中,用数字显微镜 DMD 调整阵列中各透镜的聚焦光斑光强,从而使衍射透镜阵列聚焦光强分布均匀。通过实验可得,阵列的相邻透镜中心距约为 192.1 μm ,与设计值符合。



(a) at 441.6nm



(b) at 670 nm

图 7 阵列中任一衍射透镜的点扩散函数

Fig. 7 PSF of one DM in array

处)和 $5.49 \mu\text{m}$ (670 nm 处), 分别与理论衍射极限值 $3.33 \mu\text{m}$ (441.6 nm 处)和 $5.18 \mu\text{m}$ (670 nm 处)相符(基于瑞利索莫非理论);同时,衍射效率(定义为焦平面上焦斑(FWHM 处)内的功率与焦平面内全部功率的百分比值)分别为 74.1% (441.6 nm 处)和 74.8% (670 nm 处),分别与理论衍射极限值 77.5% (441.6 nm 处)和 75.4% (670 nm 处)相符,从而证明了制作的谐衍射透镜的良好聚焦性能,且具有聚焦写入和检焦功能。

4 结 论

本文在分析谐衍射透镜特点基础上,考虑激

光直写制作工艺对连续深浮雕衍射聚焦特性的影响,设计、制作并测试了用于无模光刻的连续浮雕谐衍射透镜阵列。实验结果表明,制作的 F 数为 7.5 衍射透镜阵列对写入激光和检焦激光的衍射效率均优于 70% ,且同时具有聚焦写入和检焦功能,从而有望改善无模光刻的制作质量。

感谢瑞士纳沙泰尔大学 H. P. 赫尔齐克教授、Heptagon Oy 公司 Markus Rossi 博士的热情帮助;感谢俄罗斯科学院 Victor P. Korolkov 工程师的有益讨论。

参考文献:

- [1] GALE M T, ROSSI M, PEDERSEN J, *et al.*. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists[J]. *Opt. Eng.*, 1994,33:3556-3566.
- [2] KOROLKOV V P, NASYROV R K, SHIMANSKY R V. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements[J]. *Appl. Opt.*, 2006,45(1):53-62.
- [3] OKANO M, KIKUTA H, HIRAI Y, *et al.*. Optimization of diffraction grating profiles in fabrication by electron-beam lithography[J]. *Appl. Opt.*, 2004,43:5137-5142.
- [4] FU Y, BRYAN N K A. Hybrid micro-diffractive-refractive optical element with continuous relief fabricated by focused ion beam for single-mode coupling[J]. *Appl. Opt.*, 2001,40(32):5872-5876.
- [5] TIZIANI H J, UHDE H. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. *Appl. Opt.*, 1994,33(4):567-572.
- [6] FENG D, YAN Y, JIN G, *et al.*. Design and fabrication of continuous-profile diffractive micro-optical elements as a beam splitter[J]. *Appl. Opt.*, 2004,43:5476-5480.
- [7] GIL D, CARTER D J D, MENON R, *et al.*. Lithographic patterning and confocal imaging with zone plates[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2000,18(6):2881-2885.
- [8] TAN J B, SHAN M G, LIU J, *et al.*. Model analysis of effect of diffraction focus characteristics of microlens arrays on parallel laser direct writing quality[J]. *Opt. Commun.*, 2007,277:237-240.
- [9] 佟军民,胡松,李爱敏,等. 衍射光学元件在无掩模光刻中的应用[J]. *微细加工技术*, 2006(5):18-23.
- TONG J M, HU S, LI A M, *et al.*. Application of diffractive optics elements in maskless lithography[J]. *Microfabrication Technology*, 2006(5):18-23. (in Chinese)
- [10] 方亮,段茜,郭小伟,等. 多光点扫描数字光刻制作 DOE 的方法研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2007,44(6):1315-1320.
- FANG L, DUAN X, GUO X W, *et al.*. Research on the method of fabricating DOE by digital lithography system with mutipedots scanning[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2007,44(6):1315-1320. (in Chinese)
- [11] 熊木地,肖文礼,邢忠宝. 激光直写设备调焦伺服控制系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2000,8(1):79-82.
- XIONG M D, XIAO W L, XINAG ZH B. Focusing servo system of laser direct writing device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(1):79-82. (in Chinese)
- [12] 梁凤超,胡君,续志军. 激光直写凹球面网栅的电控实现[J]. *光学精密工程*, 2006,14(5):792-796.
- LIANG F CH, HU J, XU ZH J. Realization of electric control of laser direct writing mesh on concave spherical substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):792-796. (in Chinese)
- [13] SWEENCY D W, SOMMARGREN G. Harmonic diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1995,34(14):

2469-2475.

- [14] FAKLIS D, MORRIS G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1995,34(14):2462-2468.

- [15] 黄文浩,雷双艳,胡衍雷,等. 用于 DVD 光学头的三焦点单片物镜设计[J]. *光学精密工程*,2008,16(10):1793-1799.

HUANG W H, LEI SH Y, HU Y L, *et al.*. Design of three-focus single objective lens used in

DVD pick-up head [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1793-1799. (in Chinese)

- [16] 刘英,潘玉龙,王学进,等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. *光学精密工程*,2008,16(11):2065-2071.

LIU Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Design of imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2065-2071. (in Chinese)

作者简介:



单明广(1979—),男,辽宁普兰店人,博士后,讲师,分别于 2002 年、2005 年和 2008 年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位,主要从事微结构光学元件设计、制作与应用以及超精密光电检测等方面的研究。E-mail: smgsir@gmail.com



郭黎利(1955—),男,山西方山人,教授,博士生导师,1982 年于哈尔滨船舶工程学院获得学士学位,2002 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为哈尔滨工程大学信息与通信工程学院院长,主要从事数字通信系统、信号处理及光电检测等方面的研究。E-mail: guolili@hrbeu.edu.cn



钟志(1976—),男,湖南岳阳人,博士,副教授,分别于 1999 年、2001 年和 2005 年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位,主要从事光电检测、光电信号信息处理及仪器等方面的研究。E-mail: zhongzhi@hrbeu.edu.cn

● 下期预告

离轴三反空间光学望远系统杂散光分析

颜昌翔¹,许杰^{1,2},彭岩^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学部,吉林长春 130033;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

以点源透过率(PST)为评价标准,给出了一个离轴三反空间望远系统的杂散光分析结果。通过建立系统的实体模型,确定了一次、二次散射路径,采用改进型的蒙特卡洛法,对 20°之间各离轴角分别进行光线追迹。对模型的分析结果表明,系统杂散光产生的主要因素为一次散射,与光学系统结构密切相关。0.1°离轴角 PST 分别等于 3.56 和 4.02,20°离轴角 PST 等于 6.63×10^{-5} 和 4.58×10^{-5} ,可通过加入遮光罩及减小镜面散射率进行改进。与离轴两反望远系统相比,三反系统的杂散光水平在大离轴角时偏大 1 到 2 个数量级,但满足使用要求。