

## 基于可见光的多波长衍射透镜的设计与分析

郑书镛<sup>1,2</sup>, 范斌<sup>\*</sup>, 何一苇<sup>1</sup>, 杨虎<sup>1</sup>, 张豪<sup>1,2</sup>, 赵玺竣<sup>1,2</sup>, 钟烁<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所薄膜光学相机总体室, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对传统衍射透镜在可见光波段工作波长单一、色散严重等问题,提出一种能同时在多个波长工作的衍射透镜的设计方法,该设计方法可以让衍射透镜在几个波长处具有相同位置的焦点,解决了传统衍射透镜在成像时焦点偏移的问题,将所设计的透镜命名为多波长衍射透镜。通过最小化一个目标函数来寻找衍射透镜表面每一个位置的最佳微结构高度,该目标函数描述了多波长衍射透镜在工作波长处的复透射函数与传统衍射透镜的复透射函数的偏差。基于该方法设计了适用于三波段的衍射透镜,并采用标量衍射理论进行仿真分析,结果显示其在设计波段内具有良好的消色差效果。

**关键词** 衍射; 衍射透镜; 消色差; 点扩散函数; 衍射效率

**中图分类号** O439 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221819

## 1 引言

传统的折射透镜通常具有较大的厚度,这限制了它们在某些小型光学系统中的应用,衍射透镜具有比折射透镜小得多的厚度,因此多应用于轻量化系统中。然而,衍射透镜通常被设计在单一波段工作,这使得它们相对于折射透镜具有更大的色差。实际上,传统折射透镜的色差通常仅由材料色散决定,而对于衍射透镜来说,色差的产生主要是因为不同位置的微结构衍射角的变化,而衍射角与入射光的波长成正比,它们的变化所导致的色散比材料色散要强得多。

为减少衍射透镜的色差,国内外许多单位对此开展了研究。目前常用的消色差技术包括色散补偿、折衍混合技术、相位编码孔径及超表面等。色散补偿是指在系统中采用几种色散特性相反的材料作为透镜材料来实现色差补偿<sup>[1-3]</sup>,然而这种方案所需材料的数量与消色差的波长数量成正比,额外的材料使得系统的整体结构更复杂、质量更大<sup>[2-3]</sup>。相比之下,折衍混合透镜的消色差性能更好,利用折射透镜与衍射透镜色散特性相反的特点,将折射透镜的其中一个面设计为衍射面,这种做法可以在减轻系统质量的前提下将色差保持在一个较低的水平,但它们的复杂度也更高<sup>[4-6]</sup>,且对于系统整体质量的改善也十分有限。另一种减少衍射透镜色差的方法是相位编码孔径方法<sup>[7]</sup>,该方法在系统中引入相位板,使其对光波进行编码调

制,拓宽各个波长的焦深从而减小色差,这需要对玻璃表面进行精确抛光,这对于目前的工艺条件来说是一个极大的难题。此外,超表面技术近些年来也一直备受国内外研究人员关注<sup>[8-11]</sup>,利用表面等离子体或纳米光子现象来赋予入射光一个相位突变,从而实现自由控制衍射光分布。超表面在消色差的应用中表现十分出色,但超表面对于制造的要求相较于衍射元件而言要严格得多。综上所述,目前的衍射透镜消色差技术大多存在结构复杂、加工难度大等缺点,因此,设计一种结构简单且容易加工的消色差衍射透镜是衍射透镜得到广泛应用的关键。

近年来,国内外许多单位针对衍射透镜的消色差开展了许多研究。2020年,Russian Academy of Sciences的Daskalov等<sup>[12]</sup>采用环形激光直写设备制备出适用于五波段的消色差衍射透镜,该透镜的孔径为4 mm,焦距为100 mm,最大微结构高度为6  $\mu\text{m}$ ,实际制备的微结构可量化为256个台阶。2021年,中国科学院光电技术研究所的巩畅畅等<sup>[13]</sup>设计了两块基于RGB三波段的消色差衍射透镜,使得3个波长时衍射效率标准偏差由传统衍射透镜的0.6607下降到0.1519和0.0592。2022年,中国科学院光电技术研究所的赵玺竣等<sup>[14]</sup>设计出一种基于编码优化的消色差衍射透镜,对衍射透镜的微结构高度进行编码后,利用粒子群优化算法进行优化,取得了预期的实验效果。2023年,成都信息工程大学的周健文等<sup>[15]</sup>为实现超振

收稿日期: 2022-10-13; 修回日期: 2022-10-24; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 快速扶持项目二阶段基金(61404150410)

通信作者: \*fanbin@ioe.ac.cn

荡望远镜在大气湍流干扰下的超衍射成像,采用光学超振荡原理局部衍射压缩光学系统点扩散函数(PSF),实现了超振荡望远系统约 80% 瑞利衍射极限的超分辨成像效果,为衍射成像在高精度、超分辨等领域的应用提供了新思路。

本文提出一种多波长衍射透镜(MDL)的设计方法,通过调控优化平面基底上衍射微结构的分布,使一系列波长光谱的 PSF 分布几乎相同。该方法在平衡各波长光谱 PSF 分布、减小色差的同时,降低了宽波段成像系统的复杂程度,为衍射成像系统的应用与发展提供了一种新的思路。

## 2 基本原理

### 2.1 传统衍射透镜

传统衍射透镜通常被视为纯相位型衍射光学元件(DOE),通过相位调制函数来实现对光场的控制。典型的衍射透镜如菲涅耳透镜的一面为平面,另一面根据相位调制函数刻录了一系列同心圆环形状的微结构,如图 1(b)所示,以此来弥补不同径向位置的相位滞后。在傍轴近似的条件下,衍射透镜的相位调制函数可写为

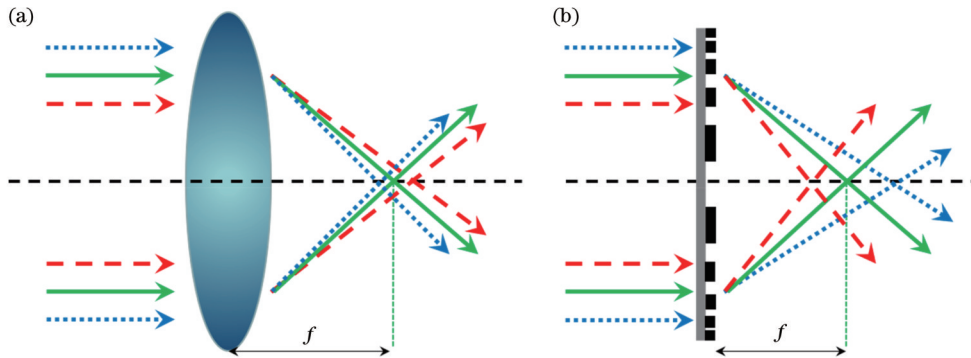


图 1 不同透镜的成像示意图。(a)折射透镜;(b)DOE

Fig. 1 Imaging schematic of different lenses. (a) Refraction lens; (b) DOE

### 2.2 MDL

将衍射透镜微结构的高度离散化,并假设它们在一个宽度区间  $\Delta$  内是不变的,即

$$h_j \in \left\{ h_{\max} \cdot \frac{1}{Q}, h_{\max} \cdot \frac{2}{Q}, \dots, h_{\max} \cdot \left( \frac{Q-1}{Q} \right), h_{\max} \right\}, \quad (4)$$

式中:  $h_j$  为第  $j$  个区间的微结构高度;  $Q$  为微结构台阶数。

构造一个目标函数

$$X = \sum_{k=1}^K \omega_k |T(h; \lambda_k) - L(r; \lambda_k)|^2, \quad (5)$$

式中:  $\omega_k$  表示各波长在优化过程中的权重;  $T(h; \lambda_k)$  表示在微结构高度  $h$  下衍射透镜对光的透过能力;  $L(r; \lambda_k)$  表示 DOE 在该径向位置  $r$  处的透光能力。该目标函数描述了 MDL 在各个工作波长处的复透射函

$$\varphi(r) = \sum_{i=1}^N A_{2i} r^{2i}, \quad (1)$$

式中:  $r$  为衍射透镜的径向坐标;  $N$  为相位函数的级数;  $A_{2i}$  为第  $2i$  次项的系数。

在设计衍射透镜的过程中,通常把相位区间压缩在  $[0, 2\pi]$ , 即

$$\Phi_0(r) = \text{mod}_{2\pi}[\varphi(r)]. \quad (2)$$

如果选用的材料在波长  $\lambda_0$  处的折射率为  $n_0$ , 则衍射透镜对应位置的微结构高度为

$$h_0(r) = \frac{\lambda_0}{n_0 - 1} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \Phi_0(r), \quad (3)$$

可以得到衍射透镜的最大微结构高度为  $h_{\max} = \frac{\lambda_0}{n_0 - 1}$ , 这一数值相较于折射透镜小了几个数量级,使得衍射光学系统的体积和质量都远小于传统光学系统。

传统折射透镜的焦距随波长的增加而增大,如图 1(a)所示,而衍射透镜的色散是由透镜表面微结构对光的衍射分光作用不同导致的,其色散特性与折射透镜相反,且相较于衍射透镜具有更强的色散能力,如图 1(b)所示。

数与 DOE 的复透射函数的偏差总和。

$$T(h, \lambda) = \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)h\right], \quad (6)$$

$$L(r, \lambda) = \exp\left\{\frac{-i\pi r^2}{\lambda f}\right\}, \quad (7)$$

式中:  $n$  为透镜折射率;  $f$  为透镜焦距;  $\lambda$  为工作波长;  $i$  为虚数单位。遍历集合  $h_j$  找到使得径向位置  $r$  处的  $X$  最小的微结构高度  $h$ , 即

$$h(r) = \text{argmin} X = \text{argmin} \left[ \sum_{k=1}^K \omega_k |T(h; \lambda_k) - L(r; \lambda_k)|^2 \right]. \quad (8)$$

在整个透镜表面重复这一过程,调整 DOE 微结构的高度分布,并根据仿真的结果调整评价函数  $X$  中各

波长的权重  $\omega_k$ , 使各波长的 PSF ( $g_{\text{PSF}}$ ) 趋于一致, 优化的基本流程如图 2 所示。图 3 为 MDL 的成像示意图

及设计原理图。

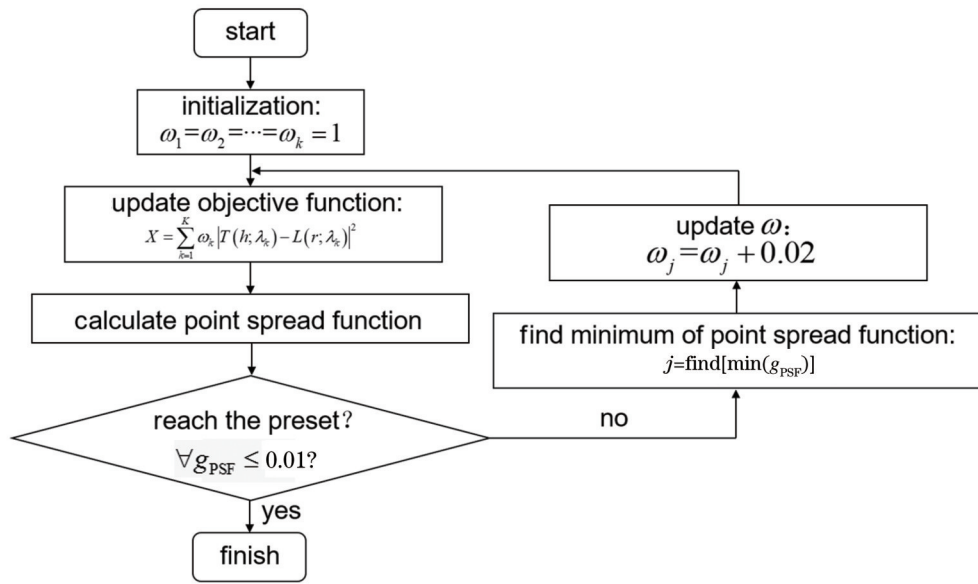


图 2 MDL 的优化模型

Fig. 2 MDL optimization model

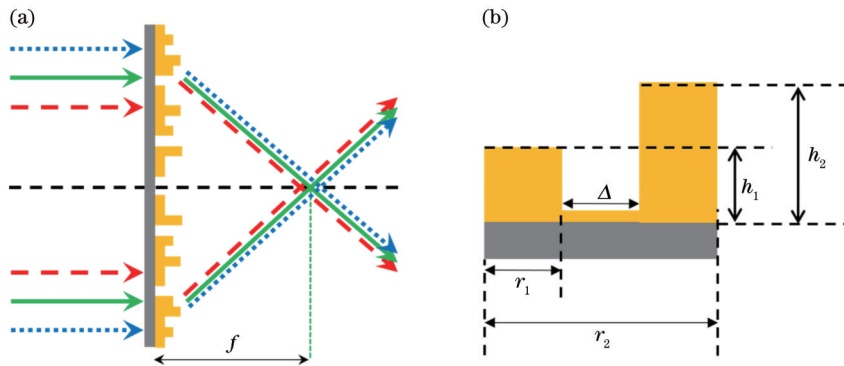


图 3 MDL 的成像及设计原理示意图。(a) 成像示意图; (b) 设计原理图

Fig. 3 Imaging and design schematic of MDL. (a) Imaging diagram; (b) design schematic

### 3 仿真分析与性能优化

#### 3.1 仿真分析

为验证所设计方法的可行性, 结合现有的工艺条件设计了一个三波长四台阶的 MDL, 采用标量衍射理论对其进行仿真分析, 并与 DOE 的相关结果进行比

较。MDL 的设计参数如表 1 所示。

取  $\Delta = 0.18 \mu\text{m}$  进行优化设计, 得到的 MDL 共有 839 个环带, 其中最小环带的宽度为  $9.72 \mu\text{m}$ , 最大微结构高度为  $0.873 \mu\text{m}$ , 如图 4 所示。3 个波长在评价函数  $X$  中的权重为  $\omega_1 = \omega_2 = 1.16$ 、 $\omega_3 = 1.28$ 。

PSF 描述了光学系统对于点光源的响应, 而成像

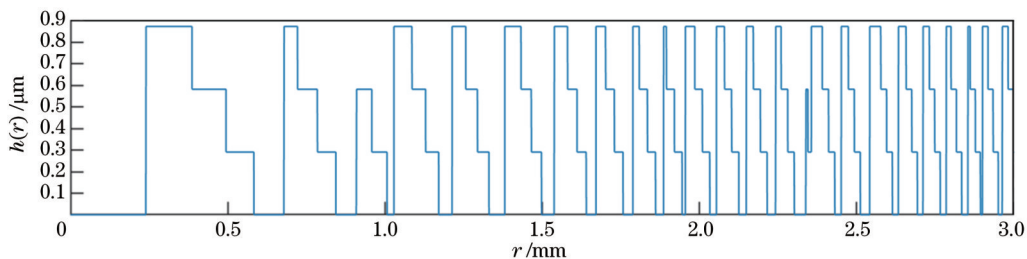


图 4 MDL 局部示意图

Fig. 4 Partial schematic of MDL

表 1 MDL 设计参数

Table 1 Designed parameters of MDL

Parameter	Content
Radius of lens /mm	18
Wavelength /nm	488, 532, 632
$F$	10
Material	$\text{SiO}_2$

焦平面处不同波长光的 PSF 可以表征衍射透镜的消色差性能。通过基尔霍夫衍射公式分别计算了两种衍射透镜在不同入射波长时焦平面处的 PSF, 结果如图 5 所示。

从图 5(a) 可以看到, DOE 仅在其设计波段具有尖锐的波峰, 而在其余两个波段几乎不响应或者呈弥散状, 在整个像面产生大量噪声, 使得整体成像质量下

降。从图 5(b) 可以看到, MDL 在其设计的 3 个波段都具有较为尖锐的波峰, 3 个波段在像面的响应较为一致, 不会在像面上产生大量噪声, 可以有效减小衍射透镜成像时产生的色差, 表明其具备一定的消色差能力。半峰全宽 (FWHM) 为峰高一半处的峰宽度, 经计算得到: DOE 在其设计波段的 FWHM 为  $5.3 \mu\text{m}$ , 在其余两个波段由于不存在尖锐波峰而无法计算; MDL 在 3 个波段的 FWHM 分别为  $8.0$ 、 $8.9$ 、 $12.4 \mu\text{m}$ , 最小的 FWHM 相较于 DOE 有小幅增加, 但整体表现更加均衡, 其 FWHM 的均方差仅为  $0.0053$ 。图 6 展示了两种透镜在焦平面位置处的光斑, 可以看出 MDL 的光斑大小在不同波长处也保持一致, 且在 3 个波长共同入射时有着良好的成像效果, 进一步说明了其具有较好的消色差性能。

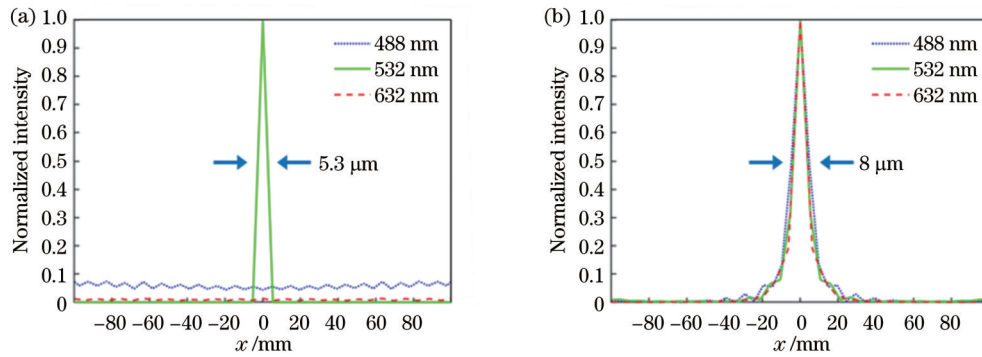


图 5 不同透镜的 PSF 分布。(a) DOE; (b) MDL

Fig. 5 PSF distribution of different lenses. (a) DOE; (b) MDL

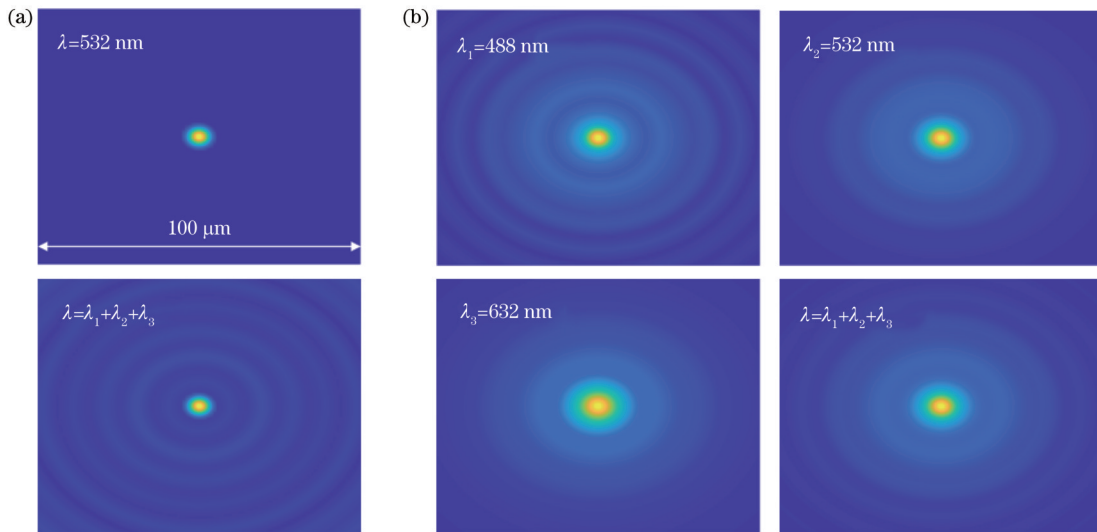


图 6 不同透镜的光斑仿真结果。(a) DOE; (b) MDL

Fig. 6 Simulation results of light spot for different lenses. (a) DOE; (b) MDL

调制传递函数 (MTF) 的定义为输出光调制度与输入光调制度的比值, 这一数值的变化量与空间频率特性密切相关, 是衡量图像质量最重要的参数之一, 可以全面客观地表征图像的明锐程度。对 MDL 在不同波长下的 MTF 进行仿真计算, 并与 DOE 的相应结果

进行比较, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看到, MDL 的 MTF 在不同波长下变化不大, 其数值与 DOE 存在一定差距, 说明 MDL 本质上是牺牲某一波段的成像质量来平衡多个波段。以 0.1 对比度为截止频率, MDL 在 3 个波长的截止频率分别为  $41.22$ 、 $48.84$ 、



57.16 lp/mm,可以满足大部分成像系统的需求。对 MDL 在 532 nm 入射波长的不同视场角下的 MTF 进行仿真分析,结果如图 8 所示。结果显示,MDL 在 0°、0.1°、0.2°、0.3° 的截止频率分别为 48.84、48.93、50.03、51.22 lp/mm,可见 MDL 在小视场下的 MTF 变化不大,反映出 MDL 在小视场具有一定的抗干扰能力。

分别对 DOE 和 MDL 在不同波长光单独入射和共同入射时的衍射效率进行仿真计算,结果如图 9 所示。本文中衍射效率的定义为 FWHM 内的光功率与镜头光圈内的光功率之比<sup>[16]</sup>。DOE 在其工作波段的衍射效率可以达到 75.09%,而在其余两个波段的衍射效率极低,接近于 0;MDL 在 3 个波段的衍射效率分别为 56.38%、54.60%、56.42%,这进一步说明了 MDL 是通过牺牲某一波段的衍射效率来换取其余波段衍射效率的提升。当 3 束光共同入射时,DOE 和 MDL 的衍射效率分别为 25.03% 和 55.80%,可见当入射光不再是单一波长时,MDL 的衍射效率显著高于 DOE。

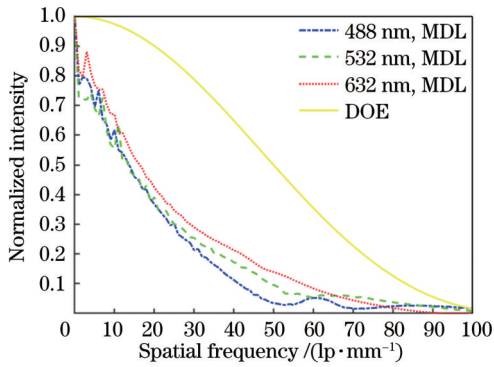


图 7 两种透镜的 MTF 仿真结果  
Fig. 7 MTF simulation results of two lenses

### 3.2 设计优化

考虑到实验中无法得到单一波长的光,实际光源通常存在一定的带宽,因此对 MDL 进行进一步优化。对评价函数  $X$  进行修正,根据实验光源的带宽加入设计波长附近的若干个波长光,使 MDL 在一定带宽的

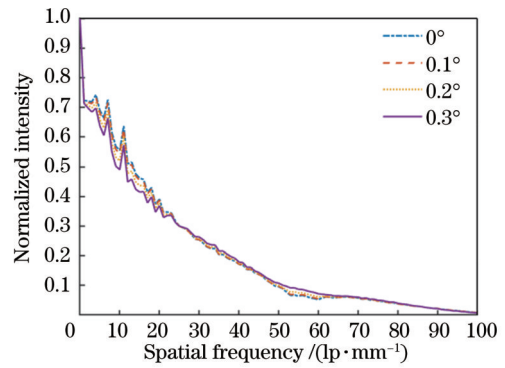


图 8 MDL 在不同视场角下的 MTF 仿真结果  
Fig. 8 MTF simulation results of MDL at different field angles

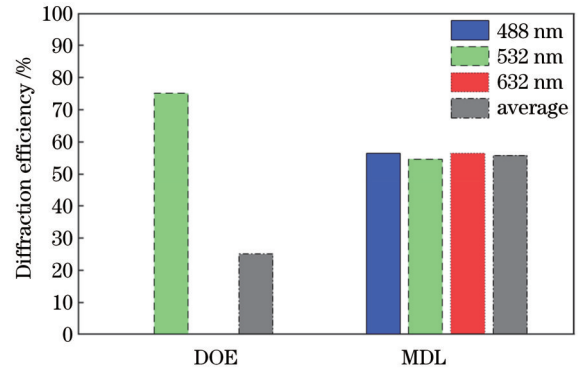


图 9 两种衍射透镜的衍射效率比较  
Fig. 9 Comparison of diffraction efficiency of two lenses

光源条件下也能清晰成像,即

$$X = \sum_{k=1}^K \omega_k \cdot \sum_{j=1}^J |T(h; \lambda_{kj}) - L(r; \lambda_{kj})|^2 \quad (9)$$

以 10 nm 带宽的光源为标准对 MDL 进行优化,并将优化前后的成像 PSF 进行对比,结果如图 10 所示。可以看到:优化前 MDL 在具有一定带宽的光源下进行成像时,像面上存在较大的噪声;在优化后噪声大大减弱,且 FWHM 由优化前的 9.3、11.6、17.1  $\mu\text{m}$  降低到 8.2、8.7、9.6  $\mu\text{m}$ 。可见优化后 MDL 对光源带宽的抗干扰能力显著增强,因此在实际应用中也能适配更多的光学系统。

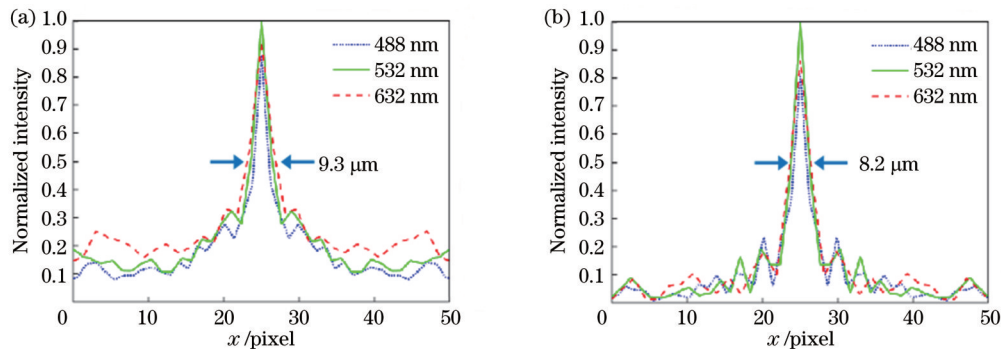


图 10 MDL 优化前后的 PSF 分布。(a) 优化前;(b) 优化后  
Fig. 10 PSF distribution of MDL before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

### 3.3 加工可行性

出于加工成本与加工精度的考虑,采用多掩模对准套刻法对 MDL 进行加工制作,通过多次曝光显影得到多台阶结构。所设计的四台阶 MDL 共有 839 个环带,环带最小带宽为  $9.72\ \mu\text{m}$ ,最大微结构高度为  $0.873\ \mu\text{m}$ ,可基于现有工艺条件加工出满足应用要求的透镜。

## 4 结 论

提出一种能同时工作于多个波长的衍射透镜设计方法,并对所设计的四台阶 MDL 进行仿真分析,结果表明其具备平衡多个波长下成像效果的能力。通过与 DOE 的 PSF 和 MTF 进行对比,发现 MDL 的本质是通过调控表面微结构分布,牺牲一个波段的成像质量以换取其余波段的成像质量。此外,对 MDL 的衍射效率进行计算,结果显示当多个波长光共同入射时,MDL 的衍射效率要高于 DOE。考虑到实际应用中不存在单一波长的光,对 MDL 进行了优化,使其不仅具备在一定带宽光源下成像的能力,还具有良好的消色差效果。最后,分析了 MDL 的加工可行性,结果显示其满足现有的加工条件,保证了 MDL 在实际应用中的可行性。

### 参 考 文 献

- [1] Thorlabs, Unmounted Achromatic Doublets, CoatedAR: 400–700 nm[EB/OL]. [2022-08-09]. [http://www.thorlabs.us/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=120](http://www.thorlabs.us/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=120).
- [2] Miks A, Novak J. Superachromatic air-spaced triplet[J]. Applied Optics, 2014, 53(29): 6930-6937.
- [3] Fang Y C, Tsai C M, MacDonald J, et al. Eliminating chromatic aberration in Gauss-type lens design using a novel genetic algorithm[J]. Applied Optics, 2007, 46(13): 2401-2410.
- [4] Davidson N, Friesem A A, Hasman E. Analytic design of hybrid diffractive-refractive achromats[J]. Applied Optics, 1993, 32(25): 4770-4774.
- [5] Flores A, Wang M R, Yang J J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus[J]. Applied Optics, 2004, 43(30): 5618-5630.
- [6] Valley P, Savidis N, Schwiegerling J, et al. Adjustable hybrid diffractive/refractive achromatic lens[J]. Optics Express, 2011, 19(8): 7468-7479.
- [7] Wach H B, Dowski E R, Jr, Cathey W T. Control of chromatic focal shift through wave-front coding[J]. Applied Optics, 1998, 37(23): 5359-5367.
- [8] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [9] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6125): 1232009.
- [10] Aieta F, Genevet P, Yu N F, et al. Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1702-1706.
- [11] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2807.
- [12] Doskolovich L L, Skidanov R V, Bezus E A, et al. Design of diffractive lenses operating at several wavelengths[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11705-11720.
- [13] 巩畅畅, 刘鑫, 范斌, 等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1105001.  
Gong C C, Liu X, Fan B, et al. Design and analysis of diffractive achromats based on RGB three-band[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1105001.
- [14] 赵玺竣, 范斌, 何一苇, 等. 基于可见光波段的编码优化消色差衍射透镜设计分析[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1305001.  
Zhao X J, Fan B, He Y W, et al. Design and analysis of coding optimized achromatic diffraction lens based on visible band[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1305001.
- [15] 周健文, 姚纳, 赵汗青, 等. 大气湍流下超振荡望远成像的理论研究[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 115-120.  
Zhou J W, Yao N, Zhao H Q, et al. Theoretical study of super-oscillation telescope imaging with atmospheric turbulence[J]. Laser Technology, 2023, 47(1): 115-120.
- [16] Mohammad N, Meem M, Shen B, et al. Broadband imaging with one planar diffractive lens[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2799.

## Design and Analysis of Multi-Wavelength Diffraction Lenses Based on Visible Light

Zheng Shupe<sup>1,2</sup>, Fan Bin<sup>1\*</sup>, He Yiwei<sup>1</sup>, Yang Hu<sup>1</sup>, Zhang Hao<sup>1,2</sup>, Zhao Xijun<sup>1,2</sup>, Zhong Shuo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Imaging Science and Engineering Lab for Space Optical System, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** Traditional refractive lenses usually have a large thickness, thus limiting their application in some small optical systems. Diffraction lenses have a much smaller thickness than refractive lenses, so they are mostly employed in lightweight systems. Diffraction lenses, however, are usually designed to operate in a single band, which makes them more chromatic than refractive lenses. In fact, the chromatic difference of traditional refractive lenses is usually only determined by the material dispersion, while that of diffraction lenses is mainly caused by the change of diffraction angle on

the microstructure of different positions. The angle is directly proportional to the wavelength of the incident light, and the dispersion caused by the change is much stronger than the material dispersion. At present, most achromatic diffraction lens technologies are characterized by complex structures and difficult processing. Therefore, designing an achromatic diffraction lens with simple structure and easy processing is the key to widely employing diffraction lenses.

**Methods** This paper proposes a design method of multi-wavelength diffraction lens (MDL). The spectral point spread function (PSF) of a series of wavelengths is almost identical via adjusting and optimizing the distribution of diffraction microstructure on the plane substrate. This method can balance the PSF distribution of each wavelength, and reduce the color difference and complexity of the wideband imaging system. It provides a new idea for the application and development of diffraction imaging systems. The heights of diffraction lens microstructure are discretized and are assumed to be invariant over a width interval. An objective function is constructed to describe the sum of the deviations between the complex transmission function of MDL and the complex transmission function of DOE at each operating wavelength, and then the microstructure height that minimizes the objective function is found. The process is repeated on the whole surface of the lens, and the weight of each wavelength in the evaluation function is adjusted according to the simulation results. To verify the feasibility of the design method, this paper designs an MDL with three wavelengths and four steps combined with the existing processing conditions. The scalar diffraction theory is employed for simulation analysis and comparison with DOE. The design parameters are shown in Table 1.

**Results and Discussions** The simulation results show that MDL has the expected achromatic performance. DOE only has a sharp crest in its designed band, while in the other two bands, it almost does not respond or is diffused. A lot of noise is generated in the whole image plane, which leads to declined overall image quality. MDL has relatively sharp wave peaks in the three bands designed by MDL, and the response of the three bands in the image plane is relatively consistent, which will not produce a lot of noise in the image plane and can effectively reduce the color difference generated during the diffraction lens imaging, indicating that MDL has a certain achromatic ability. Half-peak full width (FWHM) is the peak width at half of the normalized light intensity. Compared with that of DOE, the minimum FWHM of MDL is slightly increased, but the overall performance is more balanced, and the mean square error of FWHM is only 0.0053 (Fig. 5). The spot size of MDL is also consistent at different wavelengths and has good imaging effects when the three wavelengths are incident together (Fig. 6). MDL sacrifices the diffraction efficiency of a certain band in exchange for improving the diffraction efficiency of the other bands. MTF of MDL in small field of view has little change, which reflects that MDL has certain anti-interference ability in small field of view (Fig. 8). When the three wavelengths are incident together, the diffraction efficiency of MDL is significantly higher than that of DOE (Fig. 9). The MDL is optimized for the bandwidth of the light source, and the achromatic performance of the optimized MDL is significantly improved under a certain bandwidth (Fig. 10). In terms of processing feasibility, the designed lens meets the processing conditions of multi-mask lithography.

**Conclusions** This paper proposes a design method of diffraction lens that can work in multiple wavelengths simultaneously and designs a four-step MDL for simulation analysis. The results show that it can balance the imaging effect at multiple wavelengths. By comparison between PSF and MTF of DOE, the essence of MDL is found to sacrifice the imaging quality of one band to exchange the imaging quality of the other bands by regulating the surface microstructure distribution. The diffraction efficiency of MDL is also calculated, and the results show that the diffraction efficiency of MDL is higher than that of DOE when multiple wavelengths are incident together. Considering that there is no single wavelength of light in practical application, the MDL is optimized to have a good achromatic effect even under the light source with a certain bandwidth. Finally, the processing feasibility of MDL is analyzed, and the results show that it meets the existing processing conditions, thereby ensuring the feasibility of MDL in practical application.

**Key words** diffraction; diffraction lens; achromatism; point spread function; diffraction efficiency