

基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析

巩畅畅^{1,2}, 刘鑫^{1**}, 范斌^{1*}, 邵俊铭¹

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对传统衍射透镜工作在宽波段时色散严重、像质不佳的问题, 提出一种基于 RGB 三波段的单片式分区消色差衍射透镜的设计方法。采用标量衍射理论对等宽度和等面积两种分区方式进行仿真分析, 并在点扩展函数和衍射效率等方面与传统衍射透镜进行对比和分析。分析结果显示, 分区消色差衍射透镜在 RGB 三波段工作时, 三个波长衍射效率的标准偏差由传统衍射透镜的 0.6607 下降到 0.1519 和 0.0592, 同时保持良好的成像效果。最后, 考虑到实际加工情况, 分别仿真了不同分区方式下微结构量化为八台阶所对应的光学性能参数。结果表明, 所设计方法可以使得工作在 RGB 三波段的衍射透镜具备良好的消色差性能, 具有一定的实用性和普适性。

关键词 衍射; 衍射透镜; 消色差; 点扩展函数; 衍射效率

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1105001

Design and Analysis of Diffractive Achromats Based on RGB Three-Band

Gong Changchang^{1,2}, Liu Xin^{1**}, Fan Bin^{1*}, Shao Junming¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract When traditional diffraction lenses work in a wide band, the results have severe dispersion and poor image quality. Thus, an optimized design method for a partition diffractive achromat based on RGB three-band is proposed. We use scalar diffraction theory to simulate and analyze the image of equal width diffractive achromats and equal area diffractive achromats which compare with traditional diffraction lenses in point spread function and diffraction efficiency. The analysis results show that the proposed partition diffractive achromat can reduce the standard deviation of the three-wavelength diffraction efficiency from 0.6607 of the traditional diffractive lens to 0.1519 and 0.0592 when working in the RGB three-band while maintaining imaging effects well. Finally, considering the actual processing conditions, the optical performance parameters corresponding to the microstructure quantization into eight steps under different partitioning methods were simulated. The results show that the proposed design method can make the diffraction lens achieve a good achromatic effect in the RGB three-band. Moreover, the proposed method has practicability and universal applicability.

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

OCIS codes 050.1965; 260.2030; 110.2960; 110.4850

收稿日期: 2020-12-25; 修回日期: 2021-01-11; 录用日期: 2021-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500200)

* E-mail: fanbin@ioe.ac.cn; ** E-mail: liuxin@ioe.ac.cn

1 引言

低复杂度、高质量成像是光学系统一直以来的发展目标。衍射光学元件(DOE)由于具有轻量化、设计自由度高、面型公差宽松等优点,被广泛应用于各种紧凑型成像系统中,但由于其工作在多波段宽光谱光学系统中,色散较为严重,因此多被局限于单色成像系统中^[1]。

为提升宽波段条件下衍射透镜的实用性,国内外较多单位对衍射透镜的色差校正展开研究。目前常用的消色差技术途径主要包括折衍混合、采用 Schupmann 消色差结构、采用谐衍射结构、采用多层衍射结构、采用分区光子筛结构以及计算成像等。其中, Schupmann 结构结合离轴反射系统,可以在对大口径宽波段成像系统进行色差校正的同时,克服中心遮光问题,保证优良的成像质量。但是,该结构在校正色差的同时会引入其他像差,需要对后续光路进行校正,并且其在应用时会面临较为复杂的加工和装配问题^[2-3]。谐衍射元件可以看作是衍射元件的一般化表示,它的微结构高度是普通衍射元件的 P 倍(P 为大于 1 的正整数)。谐衍射元件不仅保持了衍射元件的负色散特性,而且能够在一系列离散谱波长处产生相同的光焦度,并且各谱波长处的理论衍射效率为 100%。但是确定中心波长后,谐衍射元件只能在限定的若干波长处有相同光焦度,实际应用中仍需要借助 Schupmann 结构进行色差校正^[4]。多层衍射元件是由在不同材料基底上制作的两个或多个谐衍射面对准层叠后得到的,其在整个宽光谱范围内可达到较高的理论衍射效率。当前主要通过优化各层微结构的高度来实现多层衍射元件在宽波段中的高衍射效率^[5-7]。光子筛

是一种由一系列随机分布且相互独立的针孔构成的振幅调制型衍射元件,文献[8]提出一种沿径向分区的三波长共聚焦光子筛,并设计相应的成像系统。但是高衍射效率的光子筛的设计和加工都相对复杂,目前多停留在仿真计算阶段。计算成像作为一项新兴技术,被越来越多地用作虚拟光学元件以将光学设计的负担转移至算法领域。通过构建成像模型、调控光路、结合卷积神经网络与深度学习,实现从具有较大残余像差和噪声的传感器测量数据中分解出高保真信息的功能。但是由于所需计算量大、内存不足等问题,目前的研究多集中在毫米量级口径的衍射透镜成像计算^[9-12]。可以看出,当前所采用的消色差方法在实际应用过程中大多存在结构复杂、加工和装配难度较大等问题,因此亟须探究一种结构简单、易于加工的消色差衍射透镜的设计方法。

在此基础上,本文提出一种基于 RGB 三波段的单片式分区消色差衍射透镜(PDA)设计方法。调控优化平面基底上衍射微结构的分布,使一系列波长的光谱点扩展函数(PSF)分布几乎相同。该方法在通过平衡各波长光谱 PSF 分布来减小色差的同时,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 菲涅耳衍射透镜

菲涅耳衍射透镜是由同心的二次闪耀相位微结构组成的相位调制型衍射透镜,该闪耀结构可以补偿波前重定向造成的相位滞后,对光能量分布进行调制,使光经过衍射透镜后会聚到一点。常规衍射透镜的面型如图 1(a)所示。

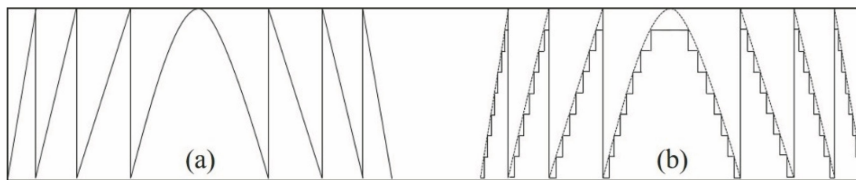


图 1 传统衍射透镜。(a)连续型相位;(b)台阶型相位

Fig. 1 Traditional diffractive lens. (a) Continuous phase; (b) multi-step phase

在傍轴近似条件下,衍射透镜的相位分布可以表示为

$$\varphi_0(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots + A_n r^{2n}), \quad (1)$$

式中: λ_0 为设计波长; A_n 为各级相位系数; r 为衍射透镜径向坐标。各衍射级次的衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2(\alpha - m), \quad (2)$$

式中: m 为衍射级次; α 为波长匹配因子,入射波长等于设计波长时, $\alpha = 1$ 。

从(2)式可以得出,当入射波长等于设计波长时,连续浮雕结构理论上在主衍射级次能够实现 100% 的衍射效率,但是现有技术加工连续浮雕结

构时仍有诸多限制,所以实际工艺中多采用量化台阶法,通过多台阶结构逼近连续结构,如图 1(b)所示^[13]。

量化后的各级次衍射效率可近似为

$$\eta_m = \text{sinc}^2\left(\frac{m}{L}\right), \quad (3)$$

式中: L 为量化台阶数。

2.2 衍射透镜的色散特性

传统折射透镜的色散特性通常表现为折射率随波长的增加而减小,焦距(f)随波长(λ)的增加而增大,如图 2(a)所示。衍射透镜的色散则是衍射结构对不同波长的光衍射分光作用不同造成的,所以衍射透镜的色散主要取决于表面微结构的尺寸。对于

可见光波段的红光、绿光、蓝光,根据阿贝数和相对色散的定義,可得出衍射透镜的等效阿贝数和等效相对色散系数,表达式为

$$\begin{cases} \nu^{\text{eff}} = \frac{\lambda_G}{\lambda_B - \lambda_R} = -3.329 \\ P_{B,G}^{\text{eff}} = \frac{\lambda_B - \lambda_G}{\lambda_B - \lambda_R} = 0.369 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: λ_B 、 λ_G 、 λ_R 分别为蓝光、绿光、红光波长。从(4)式可以看出:衍射透镜的等效阿贝数值始终为负值,与传统折射透镜相反,即衍射光学微结构的色散方向与材料色散相反,焦距与入射波长呈反比关系,称为负色散^[14-16];且如图 2(b)所示,衍射透镜相比折射透镜具有更强的色散能力^[17]。

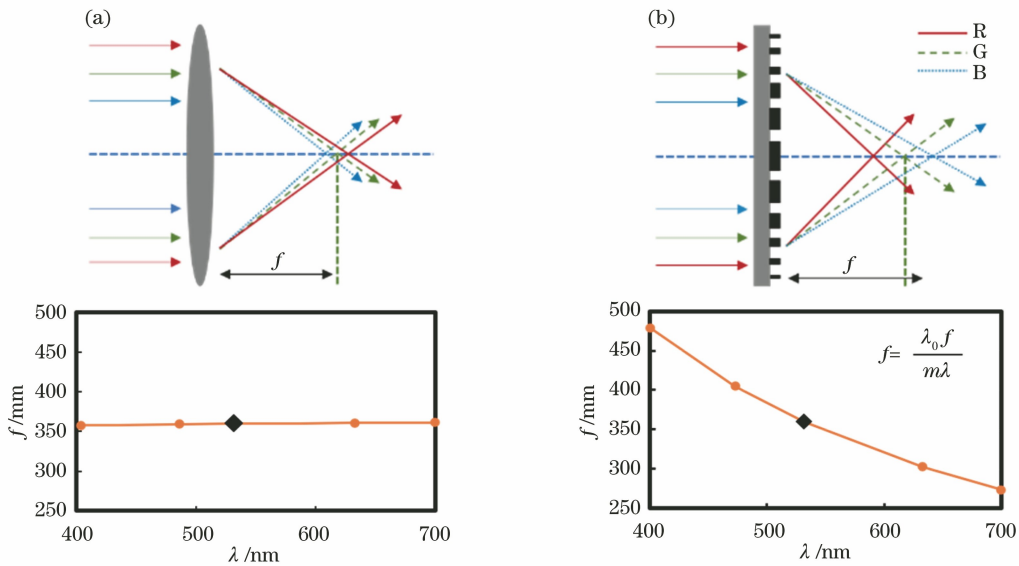


图 2 两种透镜的色散。(a)传统折射透镜;(b)衍射透镜

Fig. 2 Dispersion of two kinds of lens. (a) Traditional refraction lens; (b) diffraction lens

且由(1)式可以看出,在透镜半径确定时,若焦距为一定值,则衍射透镜的微结构相位分布完全由设计波长决定。因此,可以通过透镜表面上的微结构相位分布调控衍射透镜的色散。

3 设计方法

提出一种分区式消色差衍射透镜的设计方法。为

具体分析成像效果与分区方式之间的关系,以等宽度与等面积两种不同分区方式将平面基底分别划分为 3 个同心圆环区域,如图 3 所示。采用 RGB 三波段,以同样的焦距分别设计相对应的衍射微结构,然后通过基尔霍夫衍射公式计算在焦距位置处的成像分布。

等宽度分区方式下,各环带半径分别为 $\frac{R}{3}$ 、 $\frac{2R}{3}$ 、

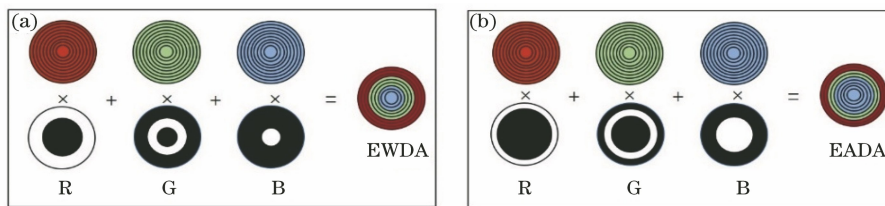


图 3 等宽度分区和等面积分区消色差衍射透镜。(a)等宽度;(b)等面积

Fig. 3 Equal width diffractive achromats (EWDA) and equal area diffractive achromats (EADA). (a) Equal width; (b) equal area

R ; 等面积分区方式下, 各环带半径分别为 $\frac{R}{\sqrt{3}}$ 、 $\sqrt{\frac{2}{3}}R$ 、 R 。在不考虑每个区域对其他区域对应波段影

响的条件下, 透镜由内到外, 每个区域分别对应 B、G、R 三个波段, 最终在设计焦距处可获得理想的成像效果, 如图 4 所示。

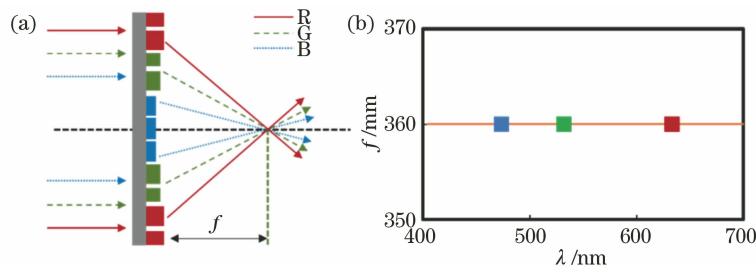


图 4 消色差衍射透镜示意图。(a)分区示意图;(b)焦距与波长的关系

Fig. 4 Diagram of diffractive achromats. (a) Partition diagram; (b) relationship between focal length and wavelength

4 光学特性仿真与分析

为探究 PDA 的消色差性能, 对两种分区方式下的衍射透镜及传统衍射透镜分别进行建模仿真。仿真参数如表 1 所示。

表 1 PDA 设计参数

Table 1 Designed parameters of PDA

Parameter	Content
Radius of lens /mm	36
Wavelength /nm	473/532/632.8
F/#	10
Material	SiO ₂

4.1 消色差衍射透镜光学特性仿真与分析

衍射透镜工作在宽波段时的色差可由其在各个波段的点扩展函数之间的差异进行表征^[18], 故通过仿真 DOE 和两种 PDA 工作在各个波段时的 PSF 来验证衍射透镜的消色差性能。首先分别计算 DOE 和 PDA 各区域的相位分布, 然后通过基尔霍夫衍射公式计算各波段在焦点处的 PSF, 仿真结果

如图 5 所示。

由图 5(a)可以看出, DOE 只有工作在设计波段 532 nm 时具有尖锐的谱峰, 即此时能量损失小, 效率高; 工作在其他两个波段时像面的光强则大大降低, 并且会在像面其他位置处产生较多的噪声, 无法高质量成像。由图 5(b)和图 5(c)可以看出, 两种 PDA 在三个设计波段工作时均可以产生较为尖锐的谱峰, 三个波段光在像面的强度具有较好的均一性, 这表明两种 PDA 均有显著的消色差能力。经计算, DOE 工作在设计波段处的半峰全宽 (FWHM) 为 7.7 μm, 而在非设计波段具有多个峰值, 但峰值能量均较小, 无法求出对应 FWHM。EWDA 工作在 RGB 三个波段时对应的 FWHM 分别为 16.4 μm、7.3 μm、6.3 μm, EADA 对应的 FWHM 分别为 9.7 μm、6.2 μm、6.5 μm。图 6 为三种透镜对应焦点位置处的光斑, 可以看出, EWDA 和 EADA 工作在各个波段时具有同样良好的成像效果, 这保证了消色差衍射透镜在宽波段的应用。

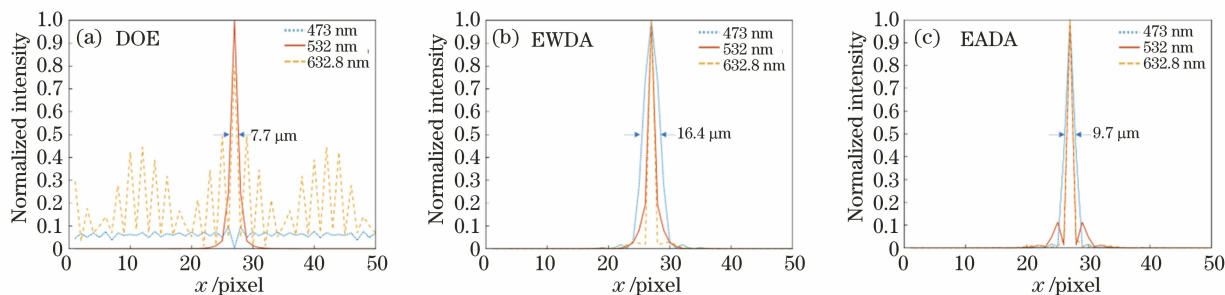


图 5 PSF 分布。(a)普通衍射透镜;(b)等宽度分区消色差衍射透镜;(c)等面积分区消色差衍射透镜

Fig. 5 Distribution of PSF. (a) Ordinary diffractive lens; (b) EWDA; (c) EADA

对 DOE 和两种分区方式的 PDA 分别工作在 RGB 三个波段时与同时工作在 RGB 三波段时的衍射效率进行仿真计算, 结果如图 7 所示。其中 DOE 在 G 波段即 532 nm 波段处仿真的衍射效率为

93.44%, 而在 R(632.8 nm) 和 B(473 nm) 波段则衍射效率极低, 近似为零。EWDA 工作在 RGB 三个波段的衍射效率分别为 10.68%、29.78%、40.68%, EADA 工作在 RGB 三个波段的衍射效率

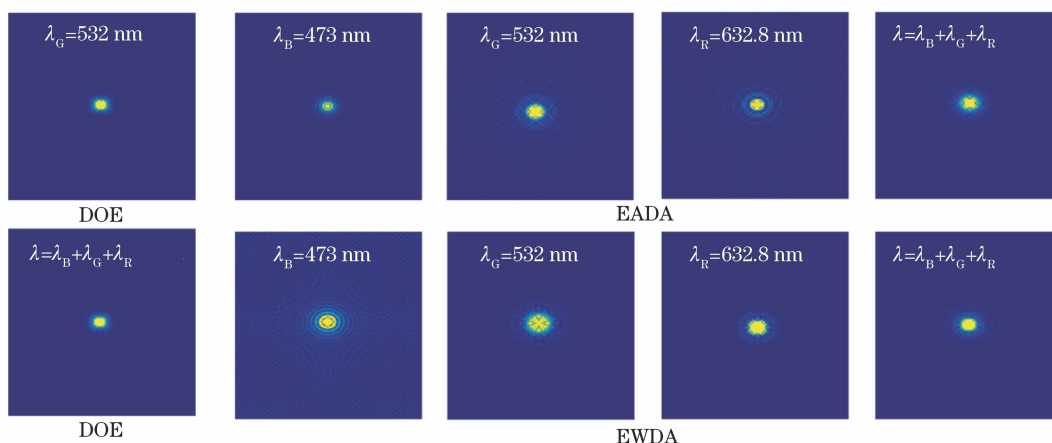


图 6 不同波长下三种透镜对应焦点位置处的光斑

Fig. 6 Spot at the focal point of the three lenses at different wavelengths

分别为 31.25%、24.03%、19.52%。两种 PDA 各自同时工作在 RGB 三波段时的衍射效率分别为 23.06% 和 27.18%。可以看出,相对于 DOE, PDA 在三个波段处的衍射效率标准偏差(SD)大大降低,并且相比之下, EADA 具有更均衡的衍射效率分布。本文中衍射效率定义为 3 倍 FWHM 内的光功率与镜头光圈内的光功率之比^[19]。

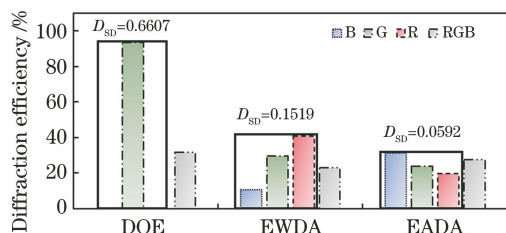


图 7 三种透镜分别工作在 RGB 三个波段与共同工作在 RGB 三波段时的衍射效率

Fig. 7 Diffraction efficiency of the three kinds of lenses working at RGB triband respectively and working at triband together

三种透镜工作在 RGB 三个波段时在焦平面处的点扩展函数如图 8 所示。

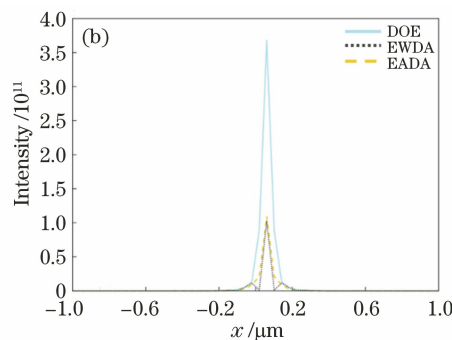
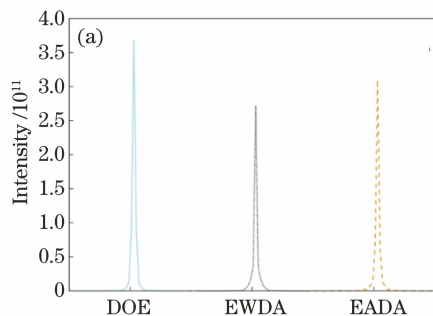


图 9 在成像面处的能量对比。(a) 共同工作在 RGB 三波段时的 PSF; (b) 工作在 G 波段时的 PSF

Fig. 9 Energy contrast at the imaging plane. (a) PSF working in RGB band; (b) PSF working in G band

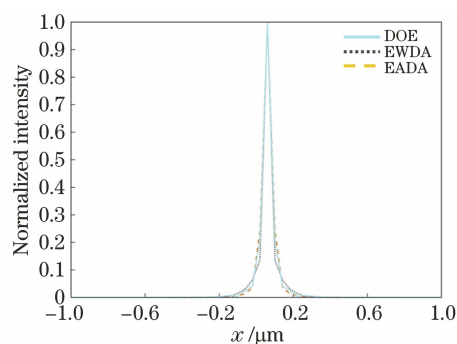


图 8 三种透镜在焦平面处的归一化点扩展函数

Fig. 8 Normalized point spread function at the focal plane of three lenses

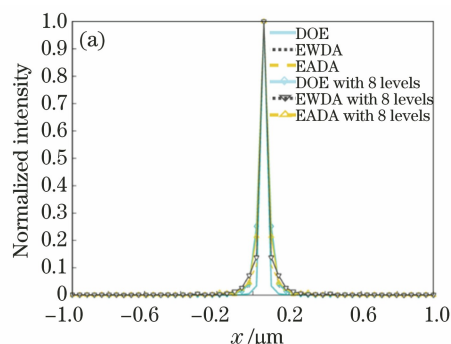
以上仿真结果表明, PDA 在实现各波段在成像面处 PSF 均一化的同时,还能够保证一定的衍射效率。但是实际上,所提方法削弱了单一波段内的 PSF 峰值强度,如图 9 所示。从图 9(a)和图 9(b)可以看出:同时工作在 RGB 三波段时, EWDA 和 EADA 相比 DOE 总能量均略有损失;单波段下, EWDA 和 EADA 在成像面处的能量与 DOE 工作在设计波段时的能量相比相差较多。分析其原因是

每一个波段光在入射到针对另外两个波段所设计的微结构时会产生部分能量损耗。

从以上分析可以看出, PDA 的消色差特性是牺牲单一波段内的部分 PSF 强度, 然后在其他两个波段进行再分配的基础上实现的。所以在实际设计和加工中, 需要考虑不同的分区方式来对再分配的方式进行调节, 使得 PDA 能够最大限度地实现消色差性能。

4.2 可加工性分析

目前的加工工艺在制备连续面型衍射透镜时仍有一定的限制, 故常用量化台阶法来近似连续面型。为验证 PDA 在量化台阶后的消色差效果, 将口径



为 36 mm 的三种透镜分别量化为二、四、八台阶进行仿真和成像分析^[20], 其中八台阶结构仿真结果如图 10 所示。结果显示: DOE 工作在 G 波段处的衍射效率为 90.60%; EWDA 分别工作在 RGB 三个波段的衍射效率为 9.69%、27.10%、36.17%; EADA 分别工作在 RGB 三个波段的衍射效率为 29.53%、19.36%、9.97%; 两种 PDA 同时工作在 RGB 三波段时的衍射效率分别为 20.59% 和 22.53%。可以看出, 量化为八台阶之后的 PDA 的衍射效率虽然有一定程度的损耗, 但是其成像效果与连续结构非常接近。另外, 通过计算得出 PDA 量化为八台阶后的最小线宽为 1.6 μm, 满足实际加工条件。

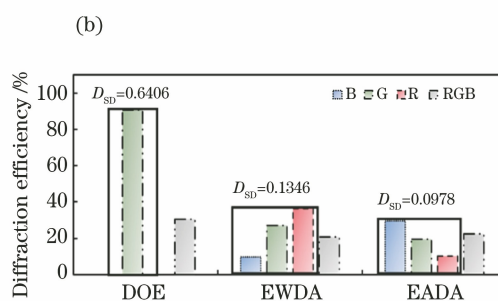


图 10 八台阶结构仿真分析。(a) 连续结构与量化八台阶结构的 PSF; (b) 八台阶 DOE 和 PDA 的衍射效率

Fig. 10 Simulation and analysis of eight-level structure. (a) PSF of continuous structure and eight-level structure;

(b) diffractive efficiency of eight-level DOE and PDA

以上仿真结果证明, 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计方法能够在一定程度上均衡各波段的 PSF, 并且具备加工的可行性。但是想要进一步提升透镜的色差校正能力和色彩保真能力, 还需要对衍射结构分布和台阶高度进行进一步的优化。

5 结 论

提出一种单片式分区消色差衍射透镜的设计方法, 并且在 RGB 三个波段进行仿真验证。结果表明, 所提方法能够通过调控平面基底上衍射微结构的分布来保证各波段光在成像面的 PSF 均一性, 从而减小色差。另外, 通过对比两种不同的衍射微结构分区方式, 探究宽波段中各波段光在焦平面处的成像效果与该波段所对应微结构在平面透镜中所占面积大小的关系。最后根据实际加工条件, 仿真分析消色差透镜在量化台阶后的成像效果。结果证明, 相比于当前常用的消色差方法, 所提设计方法能够在简化消色差系统结构的同时, 保证良好的成像效果, 并且具有一定的可行性和实用性。

参 考 文 献

- [1] Hyde R A. Very large aperture diffractive telescopes [J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [2] He C W, Wang L H, Huang P, et al. Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(11): 190099.
何传王, 汪利华, 黄鹏, 等. 离轴四反射镜衍射成像光学系统设计 [J]. 光电工程, 2019, 46(11): 190099.
- [3] Wang R Q, Zhang Z Y, Guo C L, et al. Design/fabrication and performance test of a diffractive telescope system with high diffraction efficiency [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3): 0322001.
王若秋, 张志宇, 国成立, 等. 高衍射效率衍射望远镜系统的设计/加工及成像性能测试 [J]. 光子学报, 2017, 46(3): 0322001.
- [4] Li Y, Zhang B, Hong Y F, et al. Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122001.
李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐波衍射红外双波段双视场光学系统设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(11):

- 1122001.
- [5] Yang L L, Liu C L, Zhao Y B, et al. Effect of microstructure height error on diffraction efficiency at oblique incidence in a certain temperature range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0405001.
杨亮亮, 刘成林, 赵勇兵, 等. 斜入射时一定温度范围内微结构高度误差对衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0405001.
- [6] Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Optical-digital joint design of a dual-waveband infrared refractive-diffractive system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1422002.
胡洋, 崔庆丰, 孙林, 等. 红外双波段折衍混合光学-数字联合系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1422002.
- [7] Mao S, Xie N, Zhao J L, et al. Optimal design and analysis of dual-band double-layer diffractive optical element under oblique incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1605001.
毛珊, 解娜, 赵建林, 等. 斜入射下双波段双层衍射光学元件优化设计与分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1605001.
- [8] Li F, Wang K Y. Design of optical imaging system for RGB three-channel diffraction telescope [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 369-372.
李飞, 王克逸. RGB 三通道衍射望远镜光学成像系统设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 369-372.
- [9] Dun X, Ikoma H, Wetzstein G, et al. Learned rotationally symmetric diffractive achromat for full-spectrum computational imaging[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 913-922.
- [10] Heide F, Fu Q, Peng Y, et al. Encoded diffractive optics for full-spectrum computational imaging [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33543.
- [11] Wang P, Mohammad N, Menon R, et al. Ultra-broadband focusing with diffractive flat lenses [J]. *Optics and Photonics News*, 2016, 27(12): 56.
- [12] Wang P, Mohammad N, Menon R, et al. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21545.
- [13] Yan S H. Research on design theory and parallel manufacturing technology of binary optical elements [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
颜树华. 二元光学器件设计理论及并行制作技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [14] Meem M, Banerji S, Majumder A, et al. Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(43): 21375-21378.
- [15] Ruffieux P, Scharf T, Herzig H P, et al. On the chromatic aberration of microlenses [J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4687-4694.
- [16] Li F, Cheng J G, Wang M Y, et al. An amplitude and phase hybrid modulation Fresnel diffractive optical element [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 44-47.
- [17] Ren Z B, Hu J S, Tang H L, et al. Study on chromatic aberration correction of 10 meter large aperture membrane diffractive primary lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0422004.
任智斌, 胡佳盛, 唐洪浪, 等. 10 m 大口径薄膜衍射主镜的色差校正技术研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 0422004.
- [18] Chung H H, Bradman N, Davidson M R, et al. Dual wavelength photon sieves [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(11): 118001.
- [19] Mohammad N, Meem M, Shen B, et al. Broadband imaging with one planar diffractive lens [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-6.
- [20] Liu X, Gong C C, Fan B, et al. High precision fabrication method of Fresnel diffractive lenses on ultrathin membrane for imaging application [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 1-10.