

宽带长焦深近红外衍射元件设计及特性研究

杨根森^{1,2}, 万顺^{1,2}, 王军^{1,2}, 王海洋^{1,2}, 杨建军^{1,2}, 贾平岗^{1,2*}

(1. 中北大学 半导体与物理学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 传统透镜在成像过程中, 因景深有限, 需要频繁重新对焦, 增加了光学系统的复杂性和成本。通过对衍射元件的设计, 构建了一种宽带近红外的长焦深衍射元件, 该器件的焦深长度达到了传统聚焦透镜的10倍。在数值仿真中, 通过标量衍射理论研究了其聚焦特性, 该器件在波长为1.45~1.65 μm 的波段内实现了大于0.25 mm的长焦深(距离透镜0.25~0.5 mm处), 并且具有良好的宽带性能和焦平面处旁瓣抑制效果。该新型衍射元件的设计能够显著减少对焦频率, 降低系统复杂性和成本, 同时提升成像质量, 使得长焦深成像成为可能, 并为光学系统的设计提供了新的方向。该技术有望在多个领域获得广泛应用, 如对准系统、显微成像、医学成像和监控系统等。

关键词: 衍射元件; 长焦深成像; 近红外; 宽带成像; 标量衍射理论

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025032

引用格式: 杨根森, 万顺, 王军, 等. 宽带长焦深近红外衍射元件设计及特性研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 261-266.

YANG Gensen, WAN Shun, WANG Jun, et al. Design and performance research of a broadband near-infrared diffractive lens with extended depth of focus[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 261-266.

Design and Performance Research of A Broadband Near-Infrared Diffractive Lens with Extended Depth of Focus

YANG Gensen^{1,2}, WAN Shun^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, WANG Haiyang^{1,2}, YANG Jianjun^{1,2}, JIA Pinggang^{1,2*}

(1. School of Semiconductor and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Due to their limited focal depth of field during imaging, traditional lenses require frequent refocusing, which increases the complexity and cost of optical systems. This paper presents the design of a broadband near-infrared diffractive lens with an extended depth of focus, achieving a focal depth ten times greater than that of conventional focusing lenses. Through numerical simulations using scalar diffraction theory, the focusing characteristics of this element are studied. The results demonstrate that the device achieves an extended focal depth of more than 0.25 mm (from 0.25 mm to 0.5 mm away from the lens) in the wavelength range of 1.45~1.65 μm and maintains excellent broadband performance and good suppression of sidelobes at the focal plane. This novel design of diffractive lens enables extended depth of

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51935011); 国家科技重大专项(J2019-V-0015-0110); 山西省科技创新人才团队专项(202204051001016)

作者简介: 杨根森(1995-), 男, 讲师, 博士, 主要从事微纳光学相关研究。E-mail: yanggensen@nuc.edu.cn.

* **通信作者:** 贾平岗(1985-), 男, 教授, 博士, 主要从事高温光纤传感技术相关研究。E-mail: pgjia@nuc.edu.cn.

focus imaging, offering a new direction for optical system design. It significantly reduces the frequency of refocusing, lowers system complexity and cost, and improves image quality. This technology is expected to be widely applied in various fields, such as alignment systems, microscopic imaging, medical imaging, and surveillance systems.

Key words: diffractive lens; extended depth focus imaging; near-infrared; broadband imaging; scalar diffraction theory

0 引言

在现代成像系统中,透镜是将入射准直光聚焦到焦点的关键光学元件。透镜在法线方向上保持光斑紧密聚焦的距离范围,通常称为焦深。在成像应用中,超出物体侧等效范围的物体图像会变得模糊,焦深决定了光学系统视场深度轴向范围内的横向分辨率。因此,扩展焦深以增强成像效果是成像领域的一个重要研究方向^[1]。长焦深透镜凭借其高容忍成像能力的特性备受关注,然而传统的长焦深透镜通常是通过调整光程实现相位变化。基于光程差调控相位分布的设计方法会导致透镜表面需呈现特定的曲率分布。为实现长焦深聚焦所需的相位剖面,透镜表面通常需要具备比普通聚焦透镜更大的曲率变化,这不仅增加了相关器件的体积和厚度,还对加工精度提出了更为严苛的要求^[2-3]。

衍射元件是一种平面光学元件^[4-7],其在应用于光学系统时能够避免诸如球差等像差问题。此外,衍射元件相较于传统透镜具有质量轻、厚度小的优点,有助于光学系统的轻量化和紧凑化设计。虽然衍射元件具备诸多优势,但传统衍射元件的宽带衍射效率较差,特别是在高数值孔径下,当入射光波长偏离目标波长时,由于共振效应,衍射效率会显著下降,且存在明显的色差。随着微纳加工技术的发展,多台阶衍射元件^[8-10]的出现在一定程度上改善了上述问题。多台阶衍射元件可以将工作光谱扩展至连续宽带光谱,并实现宽带消色差的功能。传统的台阶型衍射元件依据相位分布进行设计,每个台阶的宽度不同,且台阶高度按一定规律性排列,通常相邻台阶高度逐级升高或降低。与此不同,多台阶衍射元件的宽度固定,高度无需按照相位分布设计,而是通过多台阶衍射元件的相位优化算法确定器件的宽度和高度,这使得多台阶衍射元件在宽度和高度的设计上拥有更多自由度^[11-13]。2009年,美国麻省理工学院的Menon等^[14]使用标量衍射方法计算

了多台阶衍射元件的光场。2012年,美国的Kim等^[15]在此基础上分析了多台阶衍射元件的传输函数,并实现了可见光多波长的振幅调控。多台阶衍射元件已广泛应用于全息成像^[15]、宽带成像^[16-17]和光谱探测^[18]等众多领域。

本文提出了一种长焦深近红外衍射元件的设计方法,利用长焦深聚焦相位分布构建衍射元件,通过对传输相位的调控,不仅实现了长焦深焦点的功能,还扩展了器件的工作带宽,如图1所示。该元件在1.45~1.65 μm波段内表现出卓越的性能,其焦深长度达到了传统聚焦透镜的10倍。这种设计方法有效解决了宽带衍射效率低的问题,使得衍射元件在更广泛的光谱范围内可保持高效运作。

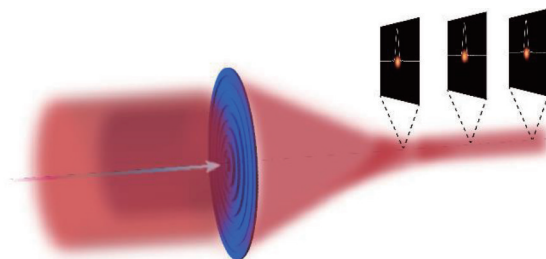


图1 长焦深近红外衍射元件示意图

Fig. 1 Schematic of a long-focus deep near-infrared diffractive element

1 原理与算法

1.1 衍射元件相位调控原理

电磁波在穿过不同介质时会产生不同的光程,传统光学器件是通过改变其形状和厚度,附加不同的光程差,以产生不同的相位。衍射元件的相位调控也完全遵循上述过程,传输相位也是利用相位延迟实现相位调控的。描述传输相位的公式为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n(\lambda) d, \quad (1)$$

式中: λ 为自由空间中电磁波的波长; $n(\lambda)$ 为材料的折射率; d 为材料的厚度。

1.2 标量衍射理论

衍射元件的光场数值仿真计算主要利用了标量衍射理论^[19]。在实际计算衍射场分布时,直接利用瑞利-索末菲衍射理论的被积函数比较复杂,从而导致积分计算求解困难。在实际应用中需要进行一些近似处理进一步简化积分过程的计算量。本文针对瑞利-索末菲衍射积分,引入傍轴近似条件。在傍轴近似的条件下,假设衍射平面 x_0 - y_0 内 Q 点的光传播距离 z 后达到平面 x - y , 那么此时平面 x - y 上的任一点 P 可以被近似表述为

$$U(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} U(x_0, y_0) \exp(ikr) dx_0 y_0, \quad (2)$$

式中: x 和 y 为 x - y 平面上的位置坐标; x_0 和 y_0 为 x_0 - y_0 平面上的位置坐标; i 为虚数单位; k 为波矢; r 为 QP 之间的距离。当传输距离 z 不断增加, 并满足式(3)时, r 可以被化简为

$$z \gg \frac{k(x_0^2 + y_0^2)_{\max}}{2}, \quad (3)$$

$$r \approx z + \frac{x^2 + y^2}{2z} - \frac{xx_0 + yy_0}{z}. \quad (4)$$

这时的衍射区域为夫琅和费衍射区, 经过夫琅和费近似, 可以得到夫琅和费衍射积分公式, 即

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)}}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} U(x_0, y_0) \exp \left\{ -i\frac{2\pi}{\lambda z}(xx_0 + yy_0) \right\} dx_0 y_0. \quad (5)$$

基于上述内容, 可以引入标量角谱理论, 进一步化简衍射积分的计算, 假设有限衍射孔径的透过率函数为 $t(x, y)$, 傅立叶函数 $A(k_x, k_y)$ 为

$$A(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp[-i(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (6)$$

式中: f_x 为沿着 x 方向的空间频率分量; f_y 为沿着 y 方向的空间频率分量, f_z 可被定义为 $f_z = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2 - f_y^2}$ 。电磁波传播一定距离 z 后, 根据标量角谱理论可以计算出衍射的光场分布, 如式(7)所示。

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y + f_z z)] df_x df_y. \quad (7)$$

标量衍射理论被广泛应用于光场计算中, 本文所涉及的光场数值计算均由标量衍射理论计算得出。

2 数值仿真结果与分析

2.1 衍射元件设计

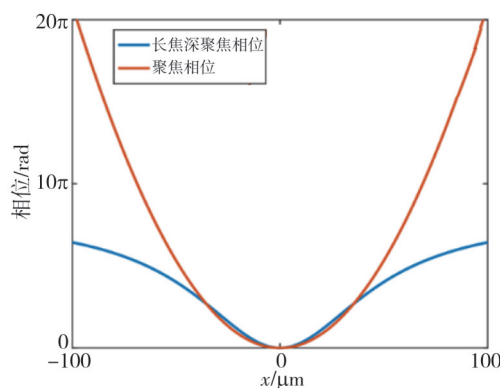
为了实现聚焦功能, 传统衍射元件的相位分布需遵循式(8),

$$\varphi(x_1, y_1) = \frac{2\pi}{\lambda'} \left(\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2} - f \right), \quad (8)$$

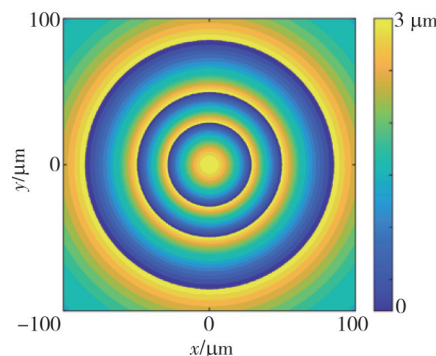
式中: λ' 为入射光的波长; x_1 和 y_1 为衍射元件的空间坐标; f 为焦距。本文设计的宽带长焦深近红外衍射元件采用了完全不同的分布, 可用式(9)表示。

$$\varphi(x_1, y_1) = \frac{2\pi}{\lambda'} \cdot \frac{x_1^2 + y_1^2}{2 \left\{ f_s + \left[\Delta f (x_1^2 + y_1^2) / R^2 \right] \right\}}, \quad (9)$$

式中: R 为衍射元件的最大半径; f_s 和 Δf 分别为衍射元件焦点的起始位置和焦深大小, 两种相位分布的示意图如图 2(a) 所示。



(a) 宽带长焦深近红外衍射元件相位分布图



(b) 宽带长焦深近红外衍射元件台阶高度分布

图 2 宽带长焦深近红外衍射元件相位分布及台阶高度分布示意图

Fig. 2 Phase distribution of the broadband near-infrared diffractive lens and the design of micro-nano structures

设计衍射元件时, 需要先把上述相位分布折叠至 $0 \sim 2\pi$ 范围内, 再将相位分布进行梯度化, 本文所采用的是 16 阶相位分布, 最后将相位分布转

化为衍射元件的台阶高度分布。相位调控主要利用台阶高度差实现,台阶的高度为

$$h_{\max}(\lambda') = \frac{m\lambda'}{n'(\lambda') - 1}, \quad (10)$$

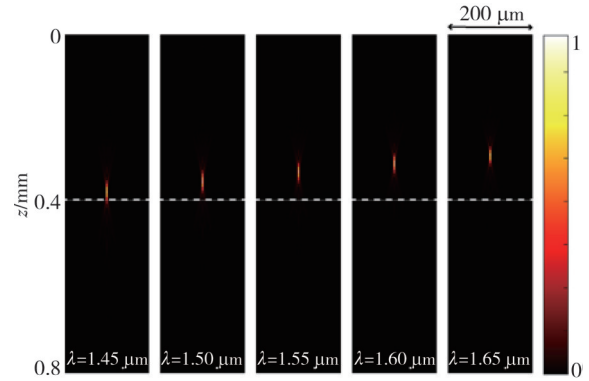
式中: m 为衍射阶数; λ' 为目标波长; $n'(\lambda')$ 为材料在目标波长的折射率。本文所选用的材料是聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA), 其在 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波段内折射率变化很小, 在仿真实验过程中所使用的折射率数值为 1.48。台阶的高度经过 16 阶量化后, 最高的台阶高度为 $3 \mu\text{m}$, 最低为 $0 \mu\text{m}$, 台阶的宽度为 $2 \mu\text{m}$, 衍射元件的台阶高度分布示意图如图 2(b) 所示。

2.2 仿真结果分析

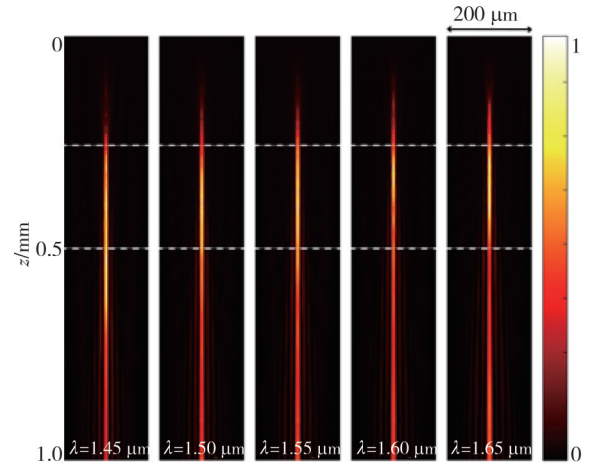
基于上述原理和设计, 本文对近红外波段下传统衍射元件和长焦深衍射元件进行了仿真计算。首先, 对传统衍射元件进行数值仿真, 具体设置的结构参数为: $f=0.3 \text{ mm}$, 中心波长 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, 器件直径 $D=200 \mu\text{m}$ 。利用标量衍射的方法进行数值计算, 计算结果如图 3(a) 所示。从图中可以明显看出, 传统衍射元件存在明显色差, 入射波长偏离目标中心波长时, 焦点沿光线传输方向有明显位移, 不能实现宽带聚焦。随后, 又对长焦深近衍射元件进行数值仿真, 具体设置的结构参数为: $f_s=0.2 \text{ mm}$, $\Delta f=0.5 \text{ mm}$, 中心波长和器件直径与上述传统衍射元件保持一致, 数值分别为 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, $D=200 \mu\text{m}$ 。同样利用标量衍射方法进行数值计算, 结果如图 3(b) 所示。从图 3(b) 中可以观察到明亮的长焦深焦点, 在 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波段内, 有效焦距范围为 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$, 焦深长度约为 0.25 mm 。该长焦深衍射元件的焦深长度完全超过了传统衍射元件的焦深, 且具有良好的宽带性能。当入射光为单个波长时, 焦深长度还可以进一步提高。

然后, 本文研究了不同波长的入射光, 通过数值仿真, 由标量衍射理论建立入射不同距离 z 处的 x - y 面电场强度分布。如图 4 所示, 在电场强度分布图中, 白色实线为点扩散函数曲线, 用于呈现该器件的聚焦效果。从图 4 中可明显得到, 在 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 的波段内, 器件在 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 的焦深范围内中心峰值明显均有良好的聚焦效果, 同时聚焦位置处电场旁瓣抑制良好, 主瓣接近衍射极限。本文设计的器件在 z 方向上

还具有很长的焦深, 并且焦深的长度可以根据需求进一步扩展, 这提高了此类器件成像的纵向兼容性。

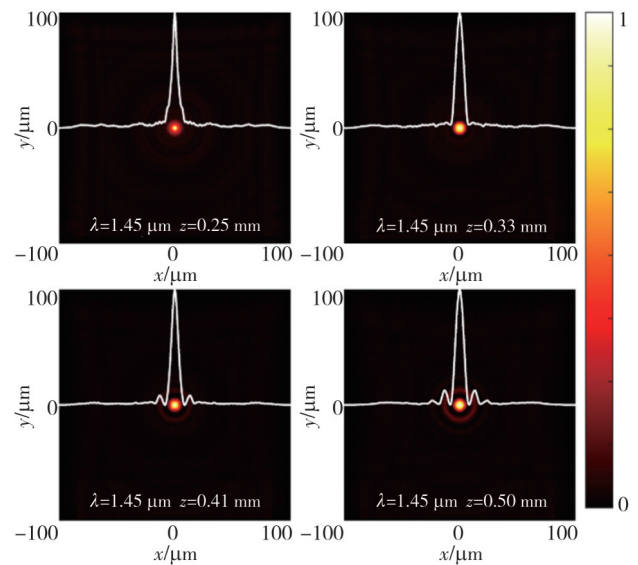


(a) 传统衍射元件

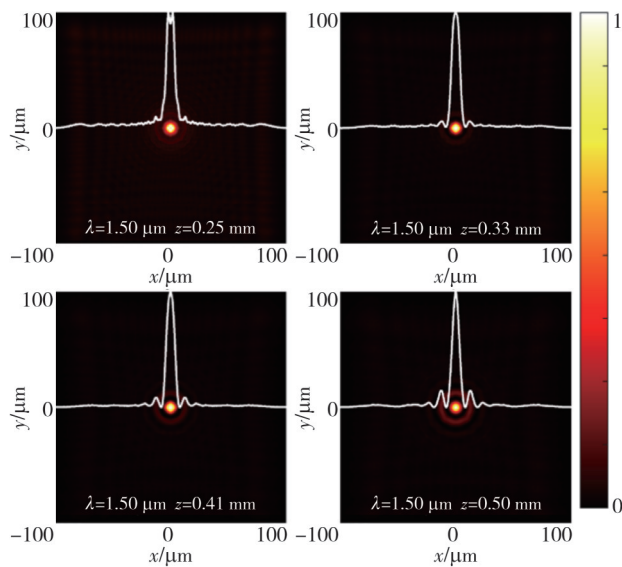


(b) 宽带长焦深近红外衍射元件

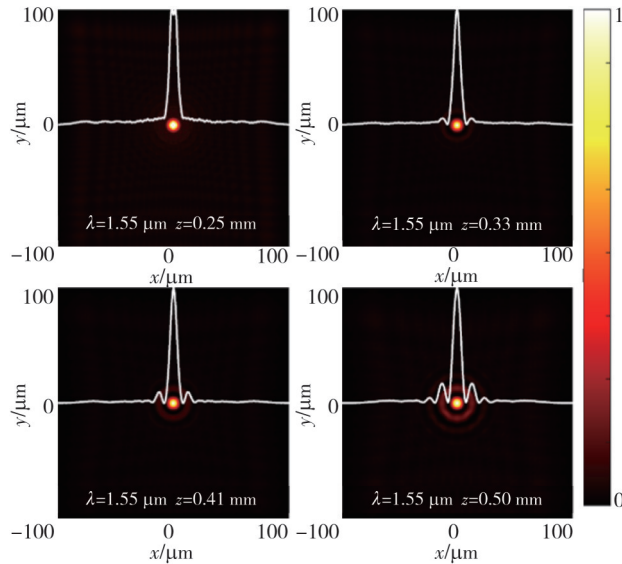
图3 传统衍射元件与宽带长焦深近红外衍射元件焦深对比图
Fig. 3 Comparison of the conventional diffractive lens with the broadband near-infrared diffractive lens with extended depth of focus



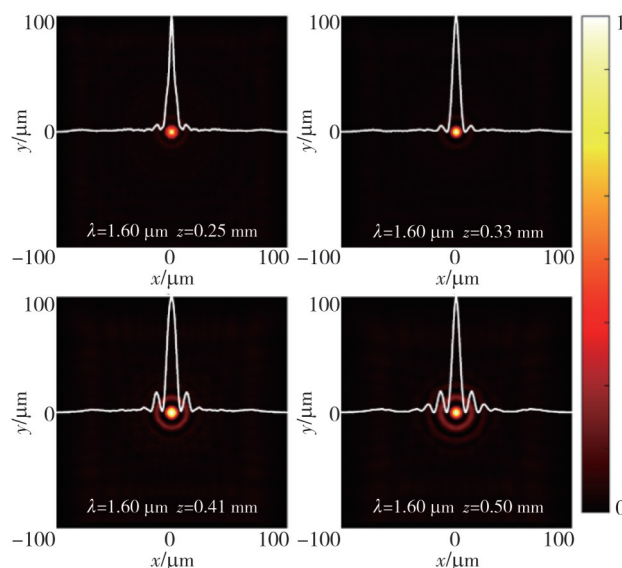
(a) 入射光波长为 $1.45 \mu\text{m}$ 的焦平面电场强度分布



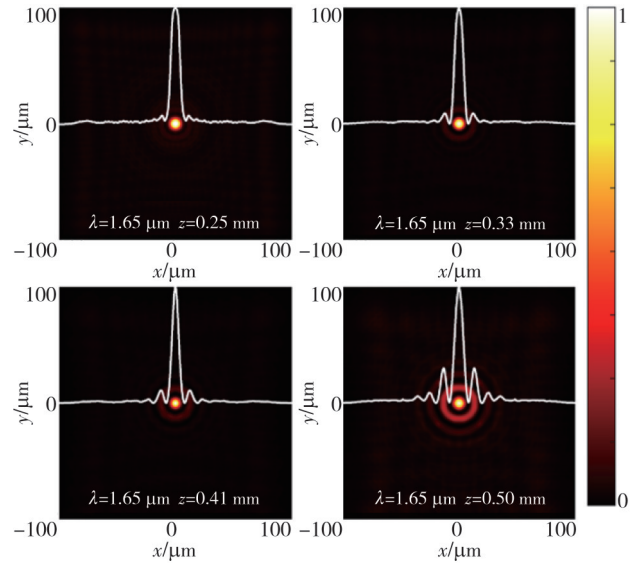
(b) 入射光波长为 1.50 μm 的焦平面电场强度分布



(c) 入射光波长为 1.55 μm 的焦平面电场强度分布



(d) 入射光波长为 1.60 μm 的焦平面电场强度分布



(e) 入射光波长为 1.65 μm 的焦平面电场强度分布

图 4 宽带长焦深近红外衍射元件在不同焦距位置焦平面上的电场强度分布

Fig. 4 The electric field intensity distribution on the focal plane at different focal length of the broadband near-infrared diffractive lens with extended depth of focus

最后, 本文研究了该器件的聚焦效率。在评估器件性能时, 聚焦效率 η 定义为目标位置处焦斑内零级波瓣内积分的能量与整个焦平面总能量的比值, 即

$$\eta = \frac{\iint_{s'} I(x_2, y_2) ds'}{\iint_s I(x_2, y_2) ds}, \quad (11)$$

式中: s' 和 s 分别为焦斑内零级波瓣内的投影面积与整个焦平面面积; $I(x_2, y_2)$ 为焦平面不同位置处的光场强度。将图 4 中的仿真结果进行进一步处理, 可以得到在 1.45~1.65 μm 的波段内, 器件在 0.25~0.5 mm 焦深范围内的聚焦效率。该器件的平均聚焦效率大于 70%, 表明该器件拥有良好的聚焦效率, 具体结果如表 1 所示。

表 1 宽带长焦深近红外衍射元件的聚焦效率

Tab. 1 Focusing efficiency of the broadband near-infrared diffractive lens with extended depth of focus

入射 波长/μm	不同聚焦位置的聚焦效率/%			
	0.25 μm	0.33 μm	0.41 μm	0.5 μm
1.45	72.3	77.6	78.9	76.7
1.50	71.7	80.6	80.3	73.6
1.55	74.6	80.3	78.2	69.9
1.60	76.7	81.8	72.7	67.9
1.65	77.1	79.9	76.2	61.2

3 结 论

本文设计了一种具有宽带近红外长焦深的衍射元件。通过理论设计和数值仿真, 在 1.45~1.65 μm

波段的人射光范围内,实现了超过0.25 mm焦深的功能。数值仿真结果表明,该元件在主瓣接近衍射极限的同时保持了良好的旁瓣抑制,有效提升了成像质量,并在整个设计带宽和焦距位置处有良好的聚焦效率。该衍射元件设计有效地解决了传统透镜在长焦深应用中结构复杂和高成本的问题,有望简化光学系统并减少使用过程中的重新对焦频率。该器件不仅扩展了工作带宽,还提高了衍射效率,克服了传统衍射元件在宽带应用中的局限性。本文所提出的宽带近红外衍射元件设计方法为衍射元件的应用提供了新的方向,也为实际应用中的光学系统提供了一种全新的技术方案,有望在多个领域获得广泛应用,如对准系统、显微成像、医学成像和监控系统等。

参考文献:

- [1] LIU Z, FLORES A, WANG M R, et al. Infrared imaging lens with extended depth of focus[C]//SPIE Proceedings, Infrared Technology and Applications XXXI, 2005. <https://doi.org/10.1117/12.602990>.
- [2] DAVIDSON N, FRIESEM A A, HASMAN E. Holographic axilens: high resolution and long focal depth[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(7): 523-525.
- [3] MIKULA G, JAROSZEWICZ Z, KOLODZIEJCZYK A, et al. Imaging with extended focal depth by means of lenses with radial and angular modulation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9184-9193.
- [4] LEVOLA T. Diffractive optics for virtual reality displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(5): 467-475.
- [5] ARBABI E, ARBABI A, KAMALIS M, et al. Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 625-632.
- [6] 林勇, 胡家升. 实现长焦深的衍射光学元件设计方法[J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(1): 152-156.
LIN Yong, HU Jiasheng. Method for design of diffractive optical elements with long focal depth[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, 50(1): 152-156. (in Chinese)
- [7] 王若秋. 基于衍射成像系统的薄膜元件关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [8] HAO C, GAO S, RUAN Q, et al. Single-layer aberration-compensated flat lens for robust wide-angle imaging[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(6): 2000017.
- [9] YILDIRIM B K, BOR E, KURT H, et al. Zones optimized multilevel diffractive lens for polarization-insensitive light focusing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(49): 495109.
- [10] 刘强, 郭融, 张晓波, 等. 多台阶衍射光学元件的工艺优化[J]. *中国激光*, 2008, 35(8): 1165-1168.
LIU Qiang, WU Rong, ZHANG Xiaobo, et al. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8): 1165-1168. (in Chinese)
- [11] 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 of the United States of America*, 2019, 116(43): 21375-21378.
- [12] BANERJI S, MEEM M, MAJUMDER A, et al. Inverse designed flat optics with multilevel diffractive lenses[C]//Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XXI, 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2568141>.
- [13] YANG G, ZHANG F, PU M, et al. Dual-wavelength multilevel diffractive lenses for near-infrared imaging[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2021, 54(17): 175109.
- [14] MENON R, ROGGE P, TSAI H Y. Design of diffractive lenses that generate optical nulls without phase singularities[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2009, 26(2): 297-304.
- [15] KIM G, DOMÍNGUEZ-CABALLERO J A, MENON R. Design and analysis of multi-wavelength diffractive optics[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2814-2823.
- [16] WANG P, MOHAMMAD N, MENON R. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21545.
- [17] JIA W, MENON R, SENSALÉ-RODRIGUEZ B. Visible and near-infrared programmable multi-level diffractive lenses with phase change material Sb_2S_3 [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 6808-6817.
- [18] XIAO T P, CIFCI O S, BHARGAVA S, et al. Diffractive spectral-splitting optical element designed by adjoint-based electromagnetic optimization and fabricated by femtosecond 3D direct laser writing[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(5): 886-894.
- [19] DENG D, GUO Q. Analytical vectorial structure of radially polarized light beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2711-2713.