DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413296

基于改进遗传算法的离散波长消色差氧化石墨烯平面透镜逆向设计方法*

李雪岩,于浩文,陈玉玺
(浙江理工大学激光精密测量技术实验室 杭州 310018)

摘 要:纳米光学成像技术是现代光学成像系统和光学测量系统的主要手段之一,但是传统宽波段消色差超透镜随着工作波长数量的增加而引入的单元结构复杂度骤增、成像效率降低、聚焦分辨力降低等问题,限制了高性能、集成化微型光学系统的发展。氧化石墨烯是一种具有高折射率和高透射率的二维材料,通过激光直写技术将氧化石墨烯的特定区域热还原为还原氧化石墨烯,其材料的光学性能发生改变,因此可以制作成氧化石墨烯超薄平面透镜。针对氧化石墨烯透镜的离散波长色散问题,提出了一种基于改进遗传算法的氧化石墨烯透镜逆向设计方法。通过设置遗传算法的优化目标,引入目标函数的惩罚因子,对透镜结构进行目标性优化,可以设计出能够对离散波长进行单一焦点等强度聚焦的氧化石墨烯透镜。使用真空过滤法和飞秒激光直写技术加工了所设计的氧化石墨烯透镜(厚度约 200 nm),并对其聚焦特性进行了表征。实验结果表明,该透镜可对 450、550 以及 650 nm 入射波长进行出色的色散调控,与预设焦距的最大偏差仅为 2.23%。该透镜对工作波长的焦点平均径向半峰全宽为 324.3 nm,可以达到超衍射极限聚焦。该设计方法为需要高分辨率、宽波段色散控制的微型光学系统提供了新的可能。

关键词:氧化石墨烯;超平面透镜;多波长色散调控;逆向设计;改进遗传算法
中图分类号:TH744 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:460.40

An inverse design method of discrete wavelength achromatic graphene oxide planar lens based on improved genetic algorithm

Li Xueyan, Yu Haowen, Chen Yuxi
(*Laboratory for Laser Precision Measurement, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: Nanophotonic imaging technology is one of the primary methods in modern optical imaging and measurement systems. However, traditional broadband achromatic metalenses face issues such as increased structural complexity, reduced imaging efficiency, and lower focusing resolution with the addition of working wavelengths, which limit the development of high-performance, integrated miniature optical systems. Graphene oxide is a two-dimensional material with high refractive index and high transmittance. By using laser direct writing technology, specific areas of graphene oxide are thermally reduced to reduced graphene oxide, altering the optical properties of the material and enabling the fabrication of ultrathin planar lenses. Addressing the discrete wavelength dispersion issue of graphene oxide lenses, this paper proposes a reverse design method based on an improved genetic algorithm. By setting optimization goals for the genetic algorithm and incorporating a penalty factor into the objective function, the lens structure can be targeted for optimization, designing a graphene oxide lens capable of focusing discrete wavelengths into a single focal point with equal intensity. The designed graphene oxide lens (approximately 200 nm thick) was fabricated using vacuum filtration and femtosecond laser direct writing techniques, and its focusing characteristics were characterized. Experimental results show that this lens can excellently control dispersion for incident wavelengths of 450, 550, and 650 nm, with a maximum deviation from the preset focal length of only 2.23%. The average radial full-width at half-maximum (FWHM) of the lens's focal points for working wavelengths is 324.3 nm, achieving sub-diffraction-limited focusing. This design method offers new possibilities for miniature optical systems that require high resolution and broad

收稿日期:2024-09-20 Received Date: 2024-09-20
*基金项目:浙江省自然科学基金委(LQ23F050014)、国家自然科学基金(62405282)项目资助

bandwidth dispersion control.

Keywords: graphene oxide; flat lens; multi-wavelength dispersion control; inverse design; improved genetic algorithm

0 引 言

光学透镜是光学成像[1-3]、光学传感[4-5]、通信系统[6-9]、医疗诊断和治疗[10-11]等几乎所有科学技术领域不可或缺的组成部分。但是其由于材料色散产生的色差会严重影响成像质量,阻碍了全彩成像的实现。色差是指不同波长的光在通过透镜时无法聚焦到同一平面上,从而导致的颜色失真和成像模糊。传统消色差透镜大多都通过组合不同材料或形状的透镜,以利用它们的色散特性来抵消彼此的色散效应。然而,传统透镜组合由于需要复杂的光学结构,导致其占用大量空间、成本高且不便于携带,极大限制了它们在便携式、可穿戴和集成设备中的应用。同时,传统的光学成像技术由于受到衍射极限的限制,其分辨率受限于光的波长,制约了高分辨率光学成像技术的发展[12]。

随着在纳米光学成像技术的飞速发展,超透镜的出现为高效多功能微型光学系统带来了机遇,这种超薄平面衍射光学器件具有亚波长厚度,被视为传统光学器件的有力替代品[13-18]。但受限于相位调控理论的不完善以及设计方法局限,平面透镜仍然存在带宽窄、效率低等诸多科学问题,随着工作波长的增加,需要引入复杂的单元结构或引入特殊材料及组合等方式缓解宽波段色差问题。作为超透镜的一种新型分支,氧化石墨烯(graphene oxide, GO)超平面透镜(以下简称 GO 透镜)因其纳米级厚度、高聚焦分辨能力[19]、高机械强度和灵活性以及快速、低成本的制造工艺而备受瞩目。氧化石墨烯和还原氧化石墨烯材料凭借其出色的电学和光学性能,能够设计出达到三维的亚波长分辨率成像的透镜,且不受近场的限制[20]。与纳米单元组成的超表面[21-23]相比,GO 透镜的加工只需利用激光直写技术在特定位置将 GO 薄膜还原成还原氧化石墨烯(reduced graphene oxide, rGO),实现 GO 和 rGO 区域交替排布的同心圆结构。在激光还原的过程中,GO 材料的局部光学特性会发生变化,加工形成的 rGO 区域的复折射率增加和透射率降低。基于这一光学特性,通过精确地设计 rGO 同心圆位置,GO 透镜就可以实现对入射光的振幅和相位的精确调制。基于石墨烯基材料在不同工作波长下的相位幅值依赖关系,通过采用合适的设计方法,可以基于 GO 透镜实现特定的光学功能。在这一背景下,GO 透镜作为一种新型光学元件,凭借其独特的光学性质和可调性,为色散控制和光学超分辨率技术的发展提供了新的可能性。

采用基于改进的遗传算法(genetic algorithm, GA)的多焦点、离散波长等强度聚焦的逆向设计方法,以 GO 透镜的离散工作波长的焦距一致性和焦点强度一致性作为优化目标,设计了一种兼具离散波长色散控制能力的 GO 透镜结构。为了研究可见光宽波段的消色差透镜设计方法,选取了 450、550 和 650 nm 的工作波长作为可见光典型的红-绿-蓝(red-green-blue, RGB)消色差目标波长。仿真结果表明,通过该方法设计所得的 GO 透镜可以对 450、550 和 650 nm 波长的均匀平面波进行色散控制,单一焦点的最大强度值差异仅为 1.34%。对得到的消色差 GO 透镜进行制作和焦点特性实验表征,结果表明,该透镜可对 450、550 和 650 nm 波长的入射光进行色散调制,且焦点尺寸均小于瑞利判据,可同时实现多波长色散控制和超衍射的光调制。

1 氧化石墨烯透镜的光学特性分析

氧化石墨烯平面透镜是由多个交替排布的 GO 区域与 rGO 区域共同组成的,每个 GO 和 rGO 区域对入射光的调制都起着至关重要的作用。如图 1 所示,当一束特定波长的光线射入时,GO 透镜可以利用这种交替排布的结构对光波前进行精确的整形,使透射光在透镜后方通过相长干涉的方式实现高效聚焦。因此,根据 GO 透镜表面的光学特性分布可以准确推导出经透镜调制后的光场分布情况,进而对透镜的光学功能进行针对性设计。

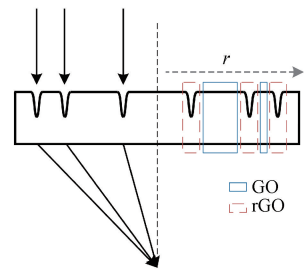


图 1 GO 透镜的光场调制原理

Fig. 1 The optical field modulation principle of GO lenses

在 GO 透镜的加工过程中,经常采用高斯光束作为激光源进行精密加工。这种高斯光束具有独特的强度分布特性,即在光束的中心强度最大,而向边缘逐渐衰减,遵循数学上的高斯分布规律。因此,当使用高斯光束对 GO 材料进行激光加工时,GO 透镜的径向截面会呈现出由多个高斯曲线组合而成的轮廓曲线(如图 1 虚线和实线方框中所示)。通过精确控制高斯光束的参数,如光束的尺寸、形状和能量分布,可以在 GO 薄膜不同位置加工出具有不同厚度分布的 rGO 区域,如图 2 所示。

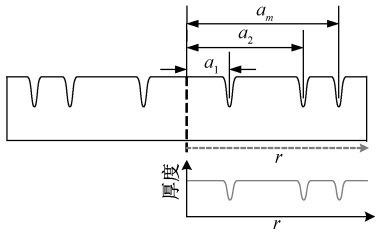


图 2　GO 透镜径向截面的厚度分布

Fig. 2　Thickness distribution of the radial section of the GO lens

其加工后的 GO 透镜径向轮廓可以用高斯分布表示为:

$$M(r)=C\sum_{m=1}^{N}e^{\frac{(r-a_m)^2}{2w^2}} \tag{1}$$

其中,C 是常数,其取决于加工时的激光功率。a_m 是第 m 个 rGO 区域的中心半径,N 为 rGO 同心圆环的总数。此外,在 GO 转化为 rGO 的过程中,局部区域的折射率及透射率也会发生相应的改变。对于整个透镜表面 (r_1,θ_1),GO 透镜的光学特性分布可以表示为:

$$\begin{cases}n(r_1,\theta_1)=n_{GO}+\Delta n\cdot M(r_1,\theta_1)\\ t(r_1,\theta_1)=t_{GO}+\Delta t\cdot M(r_1,\theta_1)\\ K(r_1,\theta_1)=K_{GO}+\Delta K\cdot M(r_1,\theta_1)\end{cases} \tag{2}$$

式中:$n(r_1,\theta_1)$、$t(r_1,\theta_1)$ 和 $K(r_1,\theta_1)$ 分别表示 GO 透镜表面的折射率、厚度和消光系数分布;Δn、Δt 和 ΔK 分别表示 rGO 和 GO 区域之间的折射率差、厚度差和消光系数之差。因此,GO 透镜表面任意位置的振幅调制和相位调制可按如式(3)确定,即:

$$\begin{cases}T(r_1,\theta_1)=e^{-\alpha(r_1,\theta_1)\cdot t(r_1,\theta_1)}\\ \Delta\varphi(r_1,\theta_1)=\varphi_{GO}+\varphi_{rGO}\end{cases} \tag{3}$$

其中,$\alpha(r_1,\theta_1)$ 表示吸收系数,可以利用消光系数计算得到。GO 透镜可以分为 GO 区域的以及 rGO 区域,其中 rGO 区域是由 rGO 材料与空气共同组成。因此,GO 透镜提供的相位调制可以用 φ_{GO} 和 φ_{rGO} 表示,这两部分均可以根据 GO 透镜的折射率以及厚度分布计算得出。综上,GO 透镜对入射光的调制方法可用式(4)表示[20]为:

$$P(r_1,\theta_1)=\sqrt{T(r_1,\theta_1)}\cdot e^{-ik(\Delta\varphi(r_1,\theta_1))} \tag{4}$$

如图 3 所示,当垂直入射的均匀平面波 $E_0(r_1,\theta_1)=1$ 穿过 GO 透镜时,由于透镜在局部区域引入了透射率和折射率的变化,出射光束的幅值和相位会被调制。经过 GO 透镜调制的电场分布可以表示为:

$$E_1(r_1,\theta_1)=E_0(r_1,\theta_1)\cdot P(r_1,\theta_1) \tag{5}$$

根据瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld,RS)衍射原理,在像方空间的一定空间范围内,平行于透镜的观察平面 (r_2,θ_2) 上的任意一点电场强度都可以被计算出来。观察平面 (r_2,θ_2) 内的电场强度分布可表示为:

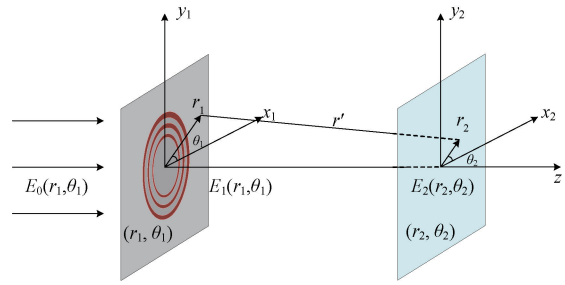


图 3　基于 RS 衍射原理的 GO 透镜电场分布模型

Fig. 3　The electric field distribution model of GO lens based on RS diffraction theory

$$E_2(r_2,\theta_2,z)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}E_1(r_1,\theta_1)\left(-ik-\frac{1}{r'}\right)\frac{\exp(-ikr')}{r'^2}r_1z\mathrm{d}r_1\mathrm{d}\theta \tag{6}$$

其中,r' 为衍射透镜平面 (r_1,θ_1) 和观测平面 (r_2,θ_2) 上任意两点之间的距离。这种结合 RS 衍射理论的 GO 透镜模型可以在旁轴近似时实现任意数值孔径(numerical aperture,NA)的 GO 透镜设计。

2　基于遗传算法的设计方法

由于场强分布与波长之间存在较强的依赖关系,直接采用场分布函数进行多工作波长 GO 透镜的设计存在一定局限性。一方面,基于场分布函数的设计方法只能确保特定波长的均匀平面波在预设焦点处实现精确聚焦。然而,随着入射波长的变化,实际焦点位置可能会出现不同程度的偏移,从而导致色差问题。另一方面,由于光场分布函数缺乏闭式解析解,采用数值计算方法结合软件优化策略进行设计更具可行性和准确性因此,使用优化算法与场分布函数结合的设计方式是一种设计多功能 GO 透镜的高效方法。

遗传算法是一种基于随机搜索的优化算法,其核心思想是通过模拟自然生物的遗传和变异来寻求最优解[24-25]。种群中包含有限个个体,这些个体可以分为"父代"与"子代"两大群体。"父代"之间的交叉和变异可以产生新的"子代",并根据每个个体对环境的适应性,淘汰掉不符合进化方向的个体,以此来维护和优化种群的适应程度。GA 算法可以并行处理大量的数值计算,其由于引入了更多的随机过程而表现出更好的全局优化效果。GO 透镜的设计优化过程中涉及多个 rGO 区域在空间分布的位置变化,这与 GA 算法的遗传和变异机制不谋而合,不同 rGO 区域半径组合之间可以随意交叉组合,而不限于某个特定交叉点;同时,由多组 rGO 圆环组合构建的种群机制可以更好地探索解空间,得到聚焦特性最佳的 GO 透镜结构。

GO 透镜的设计原理是基于透镜对表面入射光的调制,以实现焦点处的建设性干涉。GO 透镜的焦点受多个 GO 和 rGO 区域的影响。此外,具有不同宽度和厚度 rGO 区域的透镜在聚焦性能上仅有微小差异,但却大大增加了复杂性和制造成本。因此,在 GO 衍射平面透镜的优化设计过程中,所有 rGO 圆环区域都采用了相同的宽度和厚度。不同的 rGO 区域半径组合 $\boldsymbol{a}(\boldsymbol{a}=[a_1,a_2,a_3,\cdots,a_m,\cdots,a_N])$ 对焦点处场强的影响各不相同,如图 4 所示。

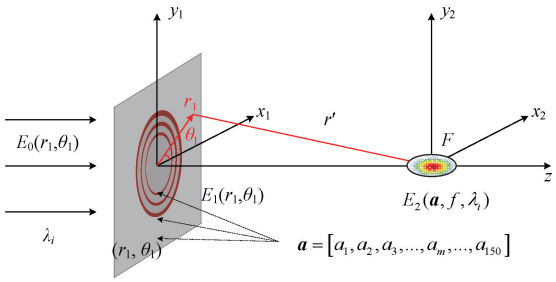


图 4 GO 透镜焦点的电场分布

Fig. 4 The electric field distribution at the focus of the GO lens

透镜焦点 F 处的焦点强度可以用式(7)表示为:

$$I(F,\lambda_i)=|E_2(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)|^2 \tag{7}$$

其中,$I(F,\lambda_i)$ 表示入射光波长为 λ_i 时,GO 透镜的焦点 F 处的光场强度;$E_2(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)$ 表示工作波长为 λ_i、rGO 区域半径为 $\boldsymbol{a}$ 时焦点处的电场分布。

由式(7)可知,在 rGO 区域线宽和 GO 薄膜厚度确定的情况下,GO 透镜的焦点强度只与焦距 f、半径 R、透镜结构 $\boldsymbol{a}$ 以及工作波长 λ_i 有关。将 GO 透镜焦点强度的计算公式与 GA 算法相结合,通过设置合适的优化目标,可以设计出具有特定光学功能的 GO 透镜,如色散调控透镜、多焦点透镜以及色彩分离透镜。

3 基于改进遗传算法的氧化石墨烯平面透镜的逆向设计

3.1 离散工作波长焦距一致性设计

1)单一焦点有效性优化

为保证 GO 透镜的结构可以对多个入射波长进行色散调控,需要最大化在各个工作波长入射时 GO 区域与 rGO 区域在焦点处的建设性干涉,因此将 GA 算法的优化目标设置为:

$$\begin{cases}\text{Max}:\ I(F)=\sum_{i=1}^{3}|E_2(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)|^2\\ \boldsymbol{a}=[a_1,a_2,a_3,\cdots,a_m,\cdots,a_N]\end{cases} \tag{8}$$

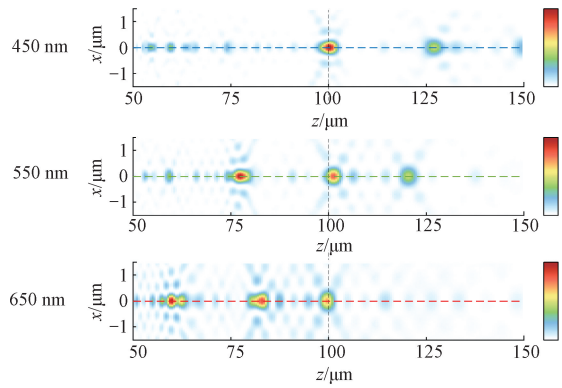
式中:λ_i 表示设计波长,为实现可见光 RGB 三色的消色差聚焦,将工作波长分别设置为 450、550 以及 650 nm。

将式(8)作为目标函数,使用 GA 算法优化得到了一个直径 120 μm,焦距 100 μm,包含 50 个 rGO 圆环区域的 GO 透镜,该透镜的表面结构如图 5 所示。

图 5 由 50 个 rGO 圆环构成的 GO 透镜

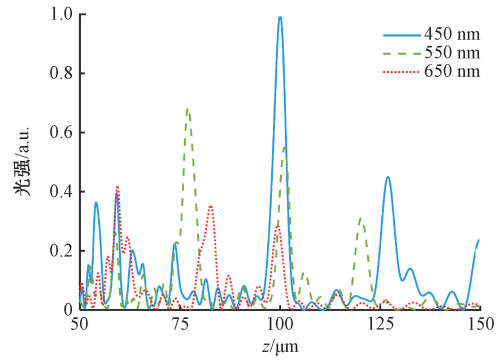
Fig. 5 GO lens comprising 50 rGO rings

为了验证该透镜在 3 个工作波长下的色散控制能力,建立 GO 透镜的性能分析模型,并对其焦点附近光轴平面以及沿光轴的强度分布进行了仿真模拟。如图 6 所示,在 450、550 以及 650 nm 波长入射时,透镜均能在距离透镜表面 100 μm 附近形成明显的焦点,且此处焦点为消色差透镜的主焦点。



(a) 轴平面强度分布图

(a) The intensity distribution in the axial plane



(b) 沿光轴方向的强度分布曲线

(b) The curve of intensity distribution along the optical axis

图 6 色散调控能力不足而形成的强度分布

Fig. 6 Intensity distribution arising from insufficient dispersion control

该结果证明了由式(8)作为目标函数所优化出的GO透镜具有一定的色散调控能力。但是,除了100 μm处的主焦点之外,在其左右两边还有数量和强度各不相同的次级焦点。从分布范围来看,入射光为450 nm时,其焦点分布的位置距离透镜整体较远;相比之下,当入射光为650 nm时,主焦点和次级焦点则分布在离透镜较近的范围内。绘制出图6(a)中沿横向虚线的强度分布曲线,如图6(b)所示。只有450 nm波长的最大强度值出现在消色差GO透镜的主焦点处,其余两个波长的最大强度均出现在次级焦点所在位置。这说明该透镜的色散调控能力和主焦点强度值还需要进一步的优化和提升。

仿真结果显示,尽管该透镜具有一定的离散波长色散调控能力,但仍存在干扰聚焦性能的次级焦点。同时,550和650 nm波长所形成的主焦点光强较弱,GO透镜的聚焦性能还需要进一步的优化提升。这主要归因于透镜对多波长色散的调节能力不足以及优化算法的目标函数不合适。

2)单一焦点强度值优化

GO透镜表面上的rGO区域数量不足会导致透镜对离散波长色散调控能力的匮乏,而目标函数的不合适则会影响主焦点的强度值。因此,若要设计出聚焦性能良好且拥有足够色散调控能力的GO透镜,需要增加rGO区域的数量并调整优化目标。

为保证GO透镜的结构可以对多个离散入射波长进行优秀的色散调控,将rGO区域数目设置为100,主焦点的焦距保持在100 μm。同时,为了减少次级焦点的干扰,提高各波长主焦点的强度值,需使GO区域与rGO区域在焦点处建设性干涉最大化的同时,使得区域对主焦点的破坏性干涉最小化。因此GA算法的优化目标改进为:

$$\text{Max}:\ I(F)=\sqrt[3]{\prod_{i=1}^{3}|E_2(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)|^2} \tag{9}$$

通过将式(9)中的优化目标替换成对每个值变化更敏感的几何平均式,可以增强每个波长在目标焦距处的强度,改善主焦点的聚焦效果。

将式(9)作为GA算法的目标函数,得到了另一个由100个rGO圆环区域组成的多波长消色差GO透镜,该透镜的半径为120 μm,焦距设置为100 μm,透镜结构如图7所示。

根据得到的透镜结构,使用性能分析模型对其聚焦性能和消色差能力进行仿真模拟,仿真结果如图8所示。结果表明,3束不同波长的入射光均能在距离透镜100 μm处形成清晰的主焦点,且没有明显的次级焦点出现,这说明该透镜具备良好的离散波长色散调节能力。为了进一步分析该透镜的聚焦特性,绘制了图8(a)中沿横向虚线的强度分布曲线,如图8(b)所示。当3个波长

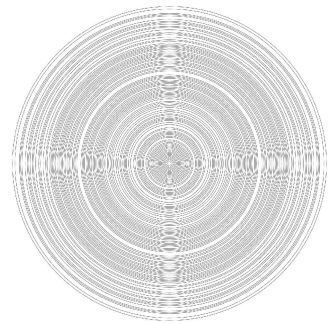
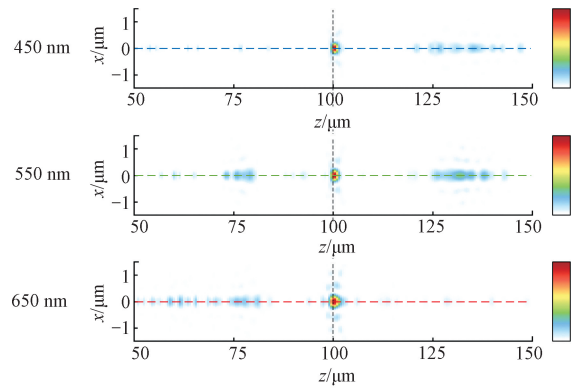


图7　由100个rGO圆环构成的消色差GO透镜

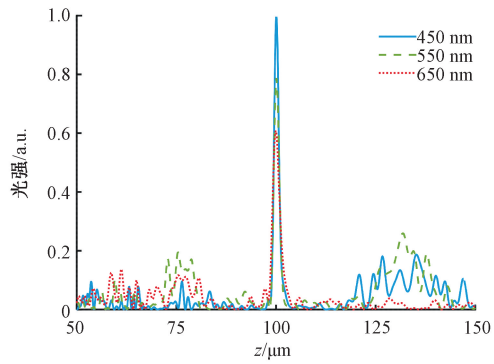
Fig. 7　Achromatic GO lens comprising 100 rGO rings

经GO透镜调制后,其焦距分别为100.1 μm(450 nm)、100.1 μm(550 nm)以及99.9 μm(650 nm),显示出焦点位置的高度一致性。此外,在每个波长的焦点位置,焦点强度均达到了对应强度分布曲线的最大值。但是,与蓝光相比,绿光和红光在焦点处的强度值分别低了21.23%和39.18%。



(a) 轴平面强度分布图

(a) The intensity distribution in the axial plane



(b) 沿光轴方向的强度分布曲线

(b) The curve of intensity distribution along the optical axis

图8　具有消色差能力的GO透镜的光场分布

Fig. 8　Light field distribution of the achromatic GO lens

结果表明,该透镜可以对450、550以及650 nm波长的入射光进行有效的色散调控,并在预设焦距处形成清晰且单一的焦点。这说明增加rGO圆环的数量可以提高

GO 透镜的色散调控能力,而将优化目标改进为几何平均可以显著增加焦点处的建设性干涉强度,减少次级焦点对聚焦性能的影响。但是,3 种波长在焦点处的强度存在较大差异,这会对 GO 透镜的离散波长消色差聚焦性能产生影响。

3.2 离散工作波长焦点强度一致性设计

1)等强度消色差聚焦的目标函数改进

为了减小不同波长在焦点处的聚焦强度差异,需要设置更加合适的优化目标。对于逆向设计的消色差 GO 透镜,其优化目标应保证在多波长入射条件下,预设焦点处的光强显著高于其他区域,即通过最大化焦点处的相长干涉来实现。因此,3.1 节第 2 部分中的目标函数可以保留,即:

$$\text{Max}:\ I_\alpha(F)=\sqrt[3]{\prod_{i=1}^{3}|E_2(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)|^2} \tag{10}$$

但是由于式(10)只考虑了 3 个波长的独立焦点强度值,并通过几何平均来提升各波长入射光在主焦点处的相长干涉,因此该目标函数只能尽量缩小各个波长在焦点处的强度值差距,而无法保证每一次优化结果中焦点强度的一致性。为了实现 GO 透镜的最佳消色差效果,保证各波长在焦点处强度的一致性,本研究所提出的 GO 透镜优化方法引入了额外的惩罚因子,即:

$$I_\beta(F)=\frac{1}{2}\sum_{i,k=1}^{3}\left(\left|I(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)-I(\boldsymbol{a},f,\lambda_k)\right|\right) \tag{11}$$

该惩罚因子为各波长之间焦点强度差值总和,将式(10)与(11)结合,可以得到新的优化目标函数,即:

$$\text{Max}:I(F)=I_\alpha(F)-I_\beta(F) \tag{12}$$

由式(12)可知,新的目标函数不仅考虑了 3 个波长的独立焦点强度值,同时引入了各焦点之间的制约关系。通过引入惩罚因子,将多波长焦点强度差异的最大值限制在预设的阈值内。对不满足约束的解进行惩罚,并在此基础上,为了实现了对“聚焦强度最大化”与“聚焦强度一致性”两个目标的动态平衡,从而实现最佳的消色差效果,加入权重系数 α 以及 β 进行调整,即:

$$\text{Max}:I(F)=\alpha\cdot I_\alpha(F)-\beta\cdot I_\beta(F) \tag{13}$$

其中,α 和 β 为目标函数中各项的权重系数,可根据情况进行灵活调整,$I(\boldsymbol{a},f_i,\lambda_i)$ 为波长 λ_i 经 GO 透镜调制后,在焦距 f_i 处的场分布函数,$\boldsymbol{a}$ 为 GO 透镜表面 rGO 区域的空间分布位置。可以看出,本节中的优化目标函数通过引入惩罚因子和两个权重系数,使得消色差 GO 透镜的焦点强度优化过程拥有了更多的自由度与可调整空间。另外,对于焦距 f 以及波长 λ_i,针对不同功能的 GO 透镜,可以设置为多个焦距值以及更多设计波长等。因此,该目标函数也可以应用于多焦点 GO 透镜以及连续波长消色差聚焦的 GO 透镜设计。

2)目标函数的权重系数分析

使用改进的 GA 算法优化 GO 透镜的结构时,式(13)中的 α 和 β 分别为优化目标焦点强度值和离散工作波长焦点间的强度差异值的权重系数,可以通过调节权重系数来平衡优化目标间的相对重要性。通过对各优化目标分配不同的权重,可以引导搜索过程优先考虑更重要的优化目标,并以最大化各波长在焦点处的强度,最小化各波长强度值间的差距作为整体优化目标。为了确定合适的权重系数,通过设置不同的权重系数组合,对同一预设参数的 GO 透镜进行多波长消色差聚焦目标性优化。

由于主要为针对 GO 透镜的离散波长色散控制进行结构设计,故将 α 设置为 1 以满足消色差聚焦的设计需求。当 β 为 0 时,GO 透镜的优化目标函数即为 3.1 节第 2 部分中基于简单的几何平均的设计方法。同时,由于消色差透镜的设计需求,惩罚因子的权重不宜过大,因此将 β 的最大值固定在 0.8。在此基础上,为了分析惩罚因子的权重系数 β 对各波长焦点强度的影响,为目标函数设定不同 β 值并使用 GA 算法对 GO 透镜结构(半径 35 μm,焦距 70 μm,70 个 rGO 区域)进行优化,每个相同的 β 值单独优化 3 次。将 450、550 和 650 nm 作为 3 个工作波长,计算每个焦点的平均强度值以及各波长焦点强度之间的最大差值,即:

$$\begin{cases}\bar{I}(F)=\dfrac{1}{3}\displaystyle\sum_{i=1}^{3}I(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)\\ \Delta I(F)=\ \max\{I(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)\}\ -\min\{I(\boldsymbol{a},f,\lambda_i)\}\end{cases} \tag{14}$$

同时,记录了每个权重系数下 GA 算法的迭代次数以量化其对算法收敛速度的影响。实验结果如图 9 所示。

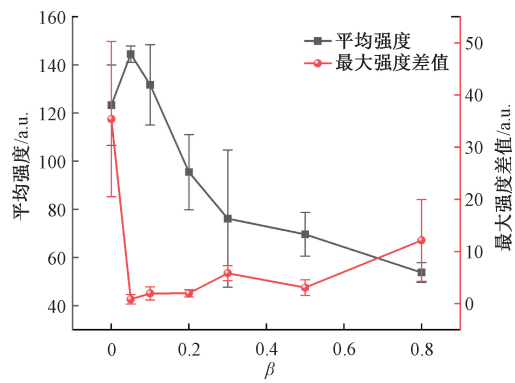


图 9 聚焦强度和最大强度差值与 β 的关系曲线

Fig. 9 Graph of the relationship between focusing intensity and maximum intensity difference with respect to β

当 β 为 0 时,GO 透镜的在 450、550 和 650 nm 波长入射时,焦点的平均强度约为 123.299,但 3 个焦点强度的平均最大差值高达 35.387,约为焦点平均强度的 28.7%,表现出焦点强度值的巨大差异。随着惩罚因子的引入,当 β 为 0.05 时,焦点的平均强度有所提升,达到

了 144.483。同时,焦点平均最大差值得到了显著改善,约为焦点强度的 0.6%,3 个波长呈现出强度几乎一致的消色差聚焦。β 升高到 0.1,平均强度和平均最大强度差值与 β = 0.05 时差别不大。但如果继续提升权重系数 β 的值,优化所得的 GO 透镜焦点强度会发生显著降低,严重影响 GO 透镜的消色差聚焦效果。当 β = 0.8 时,平均焦点强度只有 β = 0.05 时的 37.2%。

在 GO 透镜的逆向设计过程中,优化算法的迭代次数是影响透镜设计效率的重要因素。为了探究权重系数 β 对 GA 算法收敛速度的影响,绘制了迭代次数随 β 值变化的点线图,如图 10 所示。当 β 为 0 时,GA 算法的收敛速度表现出明显的不稳定性,最大和最小迭代次数分别为 4 996 和 940。然而,这种不稳定的收敛速度并没有为 GO 透镜的聚焦效果带来显著的提升。相比之下,当 β = 0.1 时,GO 透镜优化过程的收敛速度具有很强的稳定性,平均迭代次数为 602.3,标准差只有 73.1。在 β=0.05 时,虽然表现出很高的优化质量,但迭代次数约为 β = 0.1 时的 3 倍,表现出较慢的收敛速度。

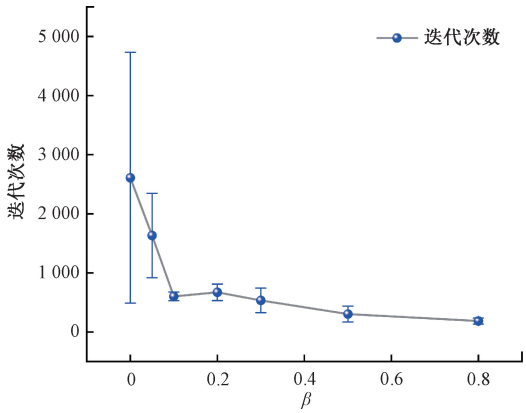


图 10　迭代次数与 β 的关系曲线

Fig. 10　Graph of the relationship between iteration count and β

权重因子的分析实验表明,对于消色差 GO 透镜的逆向优化设计而言,将目标函数中的权重因子 α 和 β 分别设置为 1 和 0.1,可以在保证优化质量的前提下,以较快的收敛速度得到所需要的 GO 透镜结构。

3.3　基于改进遗传算法的消色差 GO 平面透镜结构设计

消色差 GO 平面透镜的主要预设参数如表 1 所示。

GO 透镜的半径 R 设定为 200 μm,焦距 f 设定为 100 μm。在制造工艺方面,为了实现更小的特征尺寸并获得高分辨率聚焦,通过调节激光参数与线宽最小特征尺寸之间的关系[20],将 rGO 区域的线宽最小特征尺寸控制在 0.8 μm,厚度为 0.1 μm。为了确保 GO 膜能够满足 rGO 的尺寸要求,选择了 200 nm 的透镜厚度。此外,为了确保 GO 透镜的离散波长色散调控能力,将 rGO 区域数量设定为 150 个,相邻的 rGO 圆环的中心间距受到

表 1　消色差 GO 透镜预设参数

Table 1　Predefined parameters for achromatic GO lens

参数	数值
焦距	100 μm
半径	200 μm
rGO 区域线宽	0.8 μm
rGO 区域中心间距	≥0.9 μm
rGO 区域数量	450、550、650 nm

$a_{m+1} - a_m \geqslant 0.9$ μm 的限制,其中 a_m 表示第 m 个 rGO 圆环区域的中心半径。

将 GA 算法的优化目标设定为式(13),α 和 β 分别设为 1 和 0.1。使用 GA 算法设计得到的消色差 GO 透镜结构如图 11 所示。

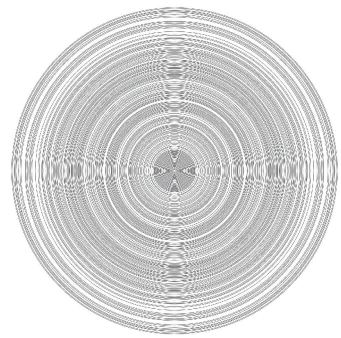


图 11　消色差 GO 透镜结构

Fig. 11　The achromatic GO lens

图 12 为 3 个工作波长下的焦点处强度分布曲线图,结果显示,在 3 个离散波长入射时透镜的焦距分别为 100.0 μm(450 nm)、100.0 μm(550 nm)以及 100.1 μm(650 nm)。3 个焦点中心强度值的最大差值为 1.34%,这表明 3 个工作波长经透镜调制后可以形成理论光场强度几乎一致的单一焦点,验证了多波长单一焦点等强度聚焦 GO 透镜的设计方法的有效性。

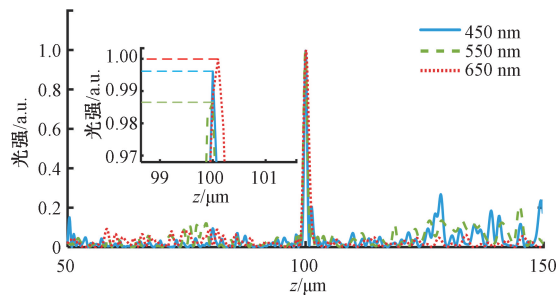


图 12　3 个工作波长的入射光经 GO 透镜调制后沿 z 轴的强度分布曲线对比

Fig. 12　Comparison of the intensity distribution curves along the z-axis for three wavelengths of incident light modulated by the GO lens

综上，仿真结果表示，该透镜可以对 450、550 和 650 nm 波长的平行光进行色散调控，实现理论强度一致的消色差聚焦。

4 实验验证

使用真空过滤法[26]制备 GO 薄膜，并使用飞秒激光直写技术[27]加工出所设计的消色差分辨率 GO 透镜。加工后的 GO 透镜如图 13 所示。

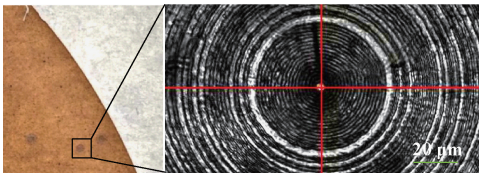


图 13 制备的 GO 薄膜和加工的 GO 透镜

Fig. 13 The prepared GO films and processed achromatic GO lens

为了对加工出的 GO 透镜进行聚焦性能表征，验证设计方法的正确性，搭建了用于表征 GO 透镜聚焦特性的光学实验平台，如图 14 所示。

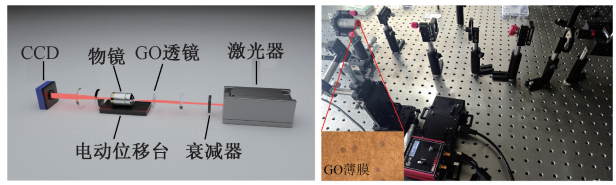
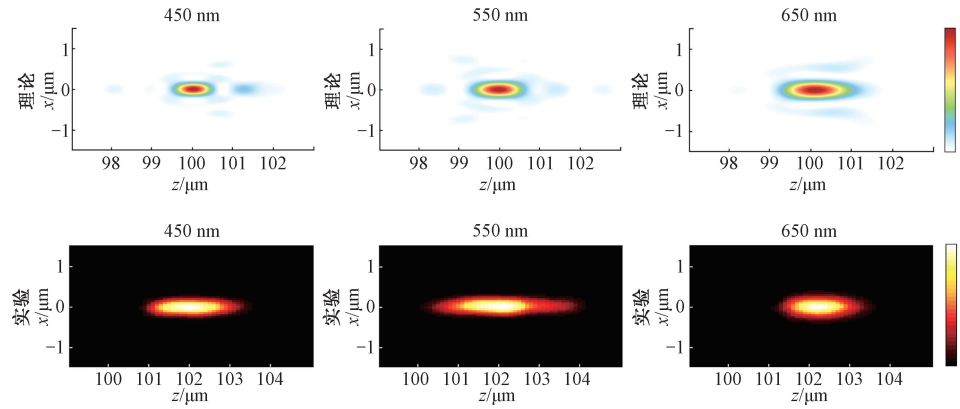


图 14 GO 透镜聚焦特性表征光学实验平台

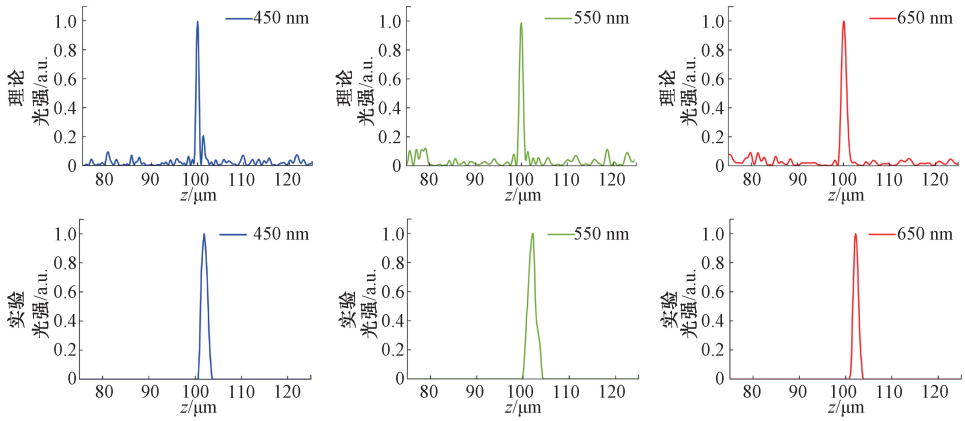
Fig. 14 Optical experimental platform for characterizing the focusing properties of GO lens

以工作波长分别为 450、550 和 650 nm 的单波长激光器作为入射光源，使用圆形衰减片控制入射光的强度。入射光被准直系统准直为平行于光学实验平台的光路后经 GO 透镜调制并聚焦，使用显微成像系统捕捉焦点附近的光强分布。用基于 Matlab 编辑好的程序文件对 CCD 采集到的图片序列进行光场重建，得到轴平面（x-z 平面）上的光强分布，如图 15(a) 所示。为进一步观察，对沿光轴方向的强度分布曲线的仿真结果与实验结果进行比较，如图 15(b) 所示，焦点强度分布的实验测



(a) 轴平面强度分布的仿真结果与实验结果

(a) Simulation and experimental results of intensity distribution in the axial plane



(b) 沿光轴方向的强度分布曲线的仿真结果与实验结果

(b) Simulation and experimental results of intensity distribution curve along the optical axis

图 15 焦点附近 x-z 平面的强度分布

Fig. 15 Intensity distribution in the x-z plane near the focus

量结果与理论模拟结果具有很好的一致性,部分焦点的形状在水平方向上表现出轻微的拉长,这是由于激光器光源的不均匀性造成的。

为了进一步分析焦距的测量结果与理论值之间的差距,绘制出了沿横向虚线的强度分布曲线,如图 16 所示。在入射光分别为 450、550 和 650 nm 时,GO 透镜的理论焦距分别为 100.0、100.0 以及 100.1 μm。经实验测得,透镜在 3 个工作波长下的真实焦距分别为 101.83、101.70 以及 102.23 μm,平均焦距$\bar{f}$为 101.92 μm。实验结果中的焦距表现出良好的一致性,实际焦距与理论焦距之间的微小差异主要是由于在制作的 GO 透镜的过程中,需要在 GO 薄膜表面加工大量的 rGO 区域,这可能导致某些 rGO 区域之间的间距和表面轮廓不一致。此外,在 GO 透镜的表征实验中,压电位移台移动过程中产生的位移误差也会对实际焦距产生微小影响。

该 GO 透镜的消色差性能表征实验表明,设计的 GO 透镜可以对 450、550 以及 650 nm 波长的入射光进行出色的色散控制,以实现离散波长的消色差聚焦。

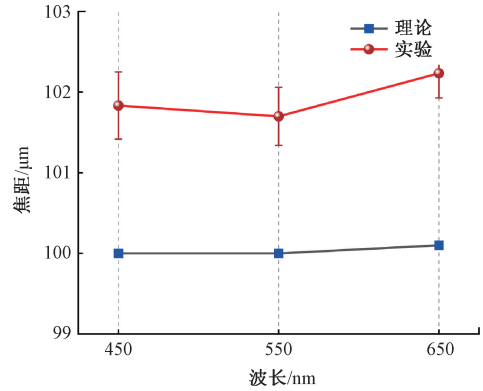
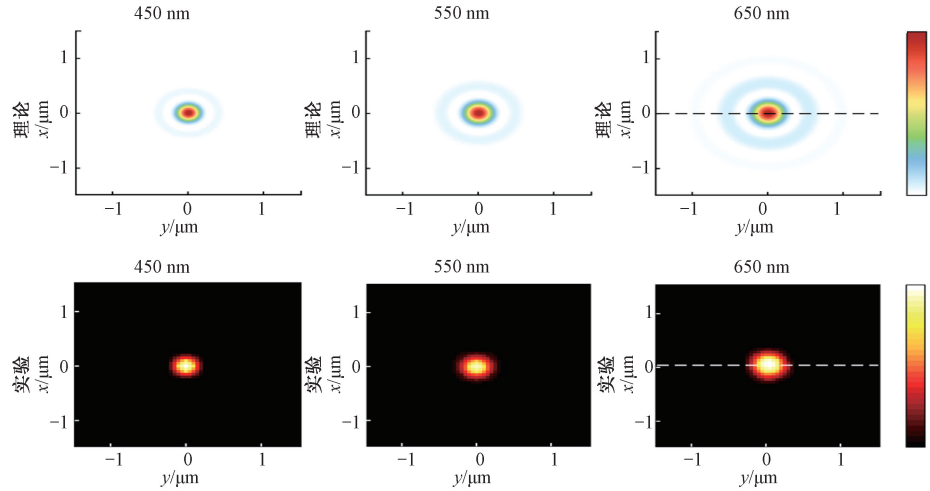


图 16　GO 透镜的理论焦距和真实焦距

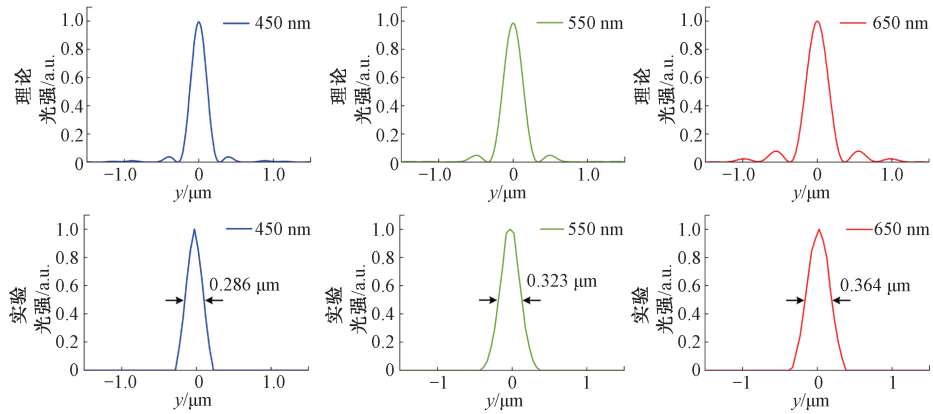
Fig. 16　Theoretical and real focal lengths of the GO lens

对该 GO 透镜的分辨能力进行实验表征,使用 CCD 相机测量整个焦平面(*x*-*y* 平面)的归一化强度分布,结果如图 17 所示。



(a) 焦平面强度分布的仿真结果与实验结果

(a) Simulation and experimental results of intensity distribution in the focal plane



(b) 焦平面径向强度分布曲线的仿真结果与实验结果

(b) Simulation and experimental results of radial intensity distribution curve in the focal plane

图 17　GO 透镜的焦平面强度分布

Fig. 17　Focal plane intensity distribution of the GO lens

如图 17(a)所示,实际焦点的焦平面强度分布具有非常好的圆对称性,且焦点大小随波长的增加而增大。为了进一步得到焦点的具体尺寸,绘制出图 17(a)中沿虚线的焦点强度分布曲线,如图 17(b)所示。实际焦点的径向强度分布曲线与仿真结果差别不大。根据得到的强度分布曲线,可以获得不同波长下焦斑的径向半峰全宽(full width at half maxima,FWHM),以评估所设计的 GO 透镜的分辨能力。当入射波长为 450、550 和 650 nm 时,实际焦点的径向半峰全宽 FWHM 分别为 0.286 μm(0.636λ)、0.323 μm(0.587λ)和 0.364 μm(0.550λ)。根据瑞利判据(0.61λ/*NA*),尽管焦点径向 FWHM 的测量结果与理论值相比有所扩大,不同工作波长经该透镜调制后仍可以实现超衍射分辨率聚焦。

根据上述实验结果,所设计的透镜方法与基于预测神经网络和粒子群优化-遗传算法(particle swarm optimization-genetic algorithm,PSO-GA)的宽波段消色差超透镜设计方法[28]相比,具有显著优势。PSO-GA 方法采用复杂的算法组合,且焦距偏移平均约为 10%,不同波长下的 FWHM 差异较大。相比之下,该方法引入惩罚因子目标函数,结构更为简洁有效,优化了焦距一致性和焦点强度分布,在多个波长下展现了较好的焦距稳定性和较小的焦点偏移。与基于粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)的宽波段消色差设计方法[29]相比,该方法在焦点分辨率和焦距一致性方面更具优势。尽管 PSO 方法覆盖的波长范围更广,但其焦点分辨率较低,焦距一致性差。与基于简单 GA 算法设计的超宽波段消色差超透镜[30]相比,尽管该方法在更多波长下保持较好的焦点和焦距一致性,但其焦点的 FWHM 普遍较大,分辨率较低,未能达到此方法在精度上的表现。此外,该透镜设计结构简单、加工方便,只需按照半径尺寸进行激光加工,具有较好的可行性和较低的制造成本。

上述实验结果表明,该 GO 透镜能够同时对多个波长进行消色差聚焦和超衍射光调制,这一特性对于需要高精度和高分辨率图像的应用,特别是在显微成像领域,具有重要意义。针对多个波长的应用,在后续研究中将进一步优化设计,以提升其在不同场景中的性能和适用性。

5 结 论

本研究提出了一种基于 GA 算法的多波长单一焦点等强度聚焦设计方法,通过设定 GA 算法的优化目标,设计了一种具有多波长色散调控能力的 GO 透镜。仿真结果表明,3 种设计波长经该透镜调制后,焦点处的强度差异仅为 1.34%。实验结果显示,在 450、550 和 650 nm 波长入射时,GO 透镜的焦距分别为 101.83、101.70 以及 102.23 μm,平均焦距为 101.92 μm,与预设焦距(100 μm)的最大偏差为 2.23%,与平均焦距(101.92 μm)的最大偏差为 0.3%。同时,3 个波长对应焦点的径向 FWHM 分别为 286、323 以及 364 nm,均小于瑞利判据。结果表明,该透镜可同时对 450、550 和 650 nm 波长进行色散调控和超衍射的光调制。这对于实现可见光范围内的高精度和高分辨率成像至关重要,为高精度微型光学系统的发展提供了新的可能。

参考文献

[1] PINILLA S, ROSTAMI S R M, SHEVKUNOV I, et al. Hybrid diffractive optics design via hardware-in-the-loop methodology for achromatic extended-depth-of-field imaging[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32633-32649.

[2] ZHU W L, DUAN F, TATSUMI K, et al. Monolithic topological honeycomb lens for achromatic focusing and imaging[J]. Optica, 2022, 9(1): 100-107.

[3] 王琼华,李磊. 基于自适应透镜的光学成像系统[J]. 光电子技术,2020,40(3):155-163.
WANG Q H, LI L. Optical imaging system based on adaptive lens[J]. Optoelectronic Technology, 2020, 40(3): 155-163.

[4] KOTLYAR V, NALIMOV A, KOVALEV A, et al. Optical polarization sensor based on a metalens[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7870.

[5] WANG Y L, ZHANG S, LIU M Z, et al. Compact meta-optics infrared camera based on a polarization-insensitive metalens with a large field of view[J]. Optics Letters, 2023, 48(17): 4709-4712.

[6] DENG Q M, LI X, HU M X, et al. Advances on broadband and resonant chiral metasurfaces[J]. NPJ Nanophotonics, 2024, 1(1): 20.

[7] 吴竹君,潘树国,孙健恺, 等. 基于超表面反射的北斗信号质量与定位分析[J]. 仪器仪表学报,2025,45(11):206-214.
WU ZH J, PAN SH G, SUN J K, et al. Analysis of Beidou signal quality and positioning based on metasurface reflection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 45(11): 206-214.

[8] 王哲飞,张晋滔,陈鹏飞, 等. 工作频率可重构的多层超表面设计[J]. 电子测量技术,2024,47(7):28-33.
WANG ZH F, ZHANG J T, CHEN P F, et al. Multi-layer meta-surface design with reconfigurable operating frequency [J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(7):28-33.

[9] 李伟,李祺,高杨. 基于 PIN 二极管设计的一种进行波束扫描的超表面天线[J]. 电子测量技术,2022,45(24):1-8.
LI W, LI Q, GAO Y. Metasurface antenna design based on PIN diodes for beam scanning [J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(24):1-8.

[10] MOGHADDASI M, PEREZ COCA E E, YE D N, et al. Wide FOV metalens for near-infrared capsule endoscopy: Advancing compact medical imaging[J]. Nanophotonics, 2024, 13(24):4417-4428.

[11] LUO Y, TSENG M L, VYAS S, et al. Meta-lens light-sheet fluorescence microscopy for in vivo imaging[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9):1949-1959.

[12] 蒋晖,李爱国. X 射线衍射极限纳米聚焦的前沿进展[J]. 光学学报,2022,42(11):59-81.
JIANG H, LI AI G. Frontier development of X-ray diffraction-limited nanofocusing[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(11):59-81.

[13] CAO G Y, WEI SH B, WANG S Q, et al. Multi-wavelength achromatic graphene metalenses for visible, NIR, and beyond [J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 19(4):2401542.

[14] 邓思珩,石磊东,陈洋, 等. 基于 GaAs/Sb2Se3 相变可调谐线性偏振器[J]. 仪器仪表学报,2024,45(11):161-169.
DENG S H, SHI L D, CHEN Y, et al. A tunable linear polarizer based on phase-change material using GaAs/Sb2Se3[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(11):161-169.

[15] LI J H, LIU W W, XU H F, et al. An RGB-achromatic aplanatic metalens [J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 18(4):2300729.

[16] DOU K H, XIE X, PU M B, et al. Off-axis multi-wavelength dispersion controlling metalens for multi-color imaging[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(4):190005.

[17] 何俊,黄坤,庄继成. 基于人工微纳结构的平板衍射透镜[J]. 人工晶体学报,2021,50(7):1200-1221,1233.
HE J, HUANG K, ZHUANG J CH. Planar diffractive lenses with artificial micro / nano-structures[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021,50(7):1200-1221,1233.

[18] XIAO X J, ZHAO Y W, YE X, et al. Large-scale achromatic flat lens by light frequency-domain coherence optimization[J]. Light, 2022, 11(1):323.

[19] WANG H T, HAO CH L, LIN H, et al. Generation of super-resolved optical needle and multifocal array using graphene oxide metalenses[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(2):200031.

[20] ZHENG X R, JIA B H, LIN H, et al. Highly efficient and ultra-broadband graphene oxide ultrathin lenses with three-dimensional subwavelength focusing [J]. Nature Communications, 2015, 6: 9433.

[21] ZHU Y CH, YUAN G M, CHANG Y, et al. Ultra-broadband achromatic metalens with high performance for the entire visible and near-infrared spectrum[J]. Results in Physics, 2023, 50:106591.

[22] ZHAO L R, JIANG X Q, LI CH X, et al. High-NA and broadband achromatic metalens for sub-diffraction focusing of long-wavelength infrared waves[J]. Results in Physics, 2023, 46:106308.

[23] XIA CH SH, LIU M Z, WANG J M, et al. A polarization-insensitive infrared broadband achromatic metalens consisting of all-silicon anisotropic micro-structures[J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(16): 161701.

[24] 葛继科,邱玉辉,吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2008(10):2911-2916.
GE J K, QIU Y H, WU CH M, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers, 2008(10):2911-2916.

[25] ALAM T, QAMAR S, DIXIT A, et al. Genetic algorithm: Reviews, implementations and applications[J]. International Journal of Engineering Pedagogy, 2020, 10(6):57-77.

[26] ZHANG S L, LI Y M, PAN N. Graphene based supercapacitor fabricated by vacuum filtration deposition[J]. Journal of Power Sources, 2012, 206:476-482.

[27] LI X P, ZHANG Q M, CHEN X, et al. Giant refractive-

index modulation by two-photon reduction of fluorescent graphene oxides for multimode optical recording[J]. Scientific Reports, 2013, 3:2819.

[28] ZHANG CH, CHEN M SH, ZHANG L R, et al. Broadband achromatic metalens design based on predictive neural network and particle swarm optimization-genetic algorithm[J]. New Journal of Physics, 2023, 25(10): 103040.

[29] LU X J, GUO Y H, PU M B, et al. Broadband achromatic metasurfaces for sub-diffraction focusing in the visible[J]. Optics Express, 2021, 29(4):5947-5958.

[30] CHENG W, FENG J B, WANG Y, et al. Genetic algorithms designed ultra-broadband achromatic metalens in the visible[J]. Optik, 2022, 258:168868.

作者简介

李雪岩(通信作者),2009 年于北京理工大学获得学士学位,2013 年于北京理工大学获得硕士学位,2021 年于北京理工大学获得博士学位,澳大利亚斯威本科技大学进行联合培养博士,现为浙江理工大学讲师,主要研究方向为纳米光学和计算光学成像。E-mail:xueyanli8023@ zstu. edu. cn

Li Xueyan(Corresponding author) received her B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2009, M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2013, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2021, with joint doctoral training at Swinburne University of Technology, Australia. She is currently a lecturer at Zhejiang Sci-Tech University, specializing in research areas of nanophotonics and computational optical imaging.