

高性能近红外聚合物超透镜的逆向设计

魏鹤鸣*, 胡文琛, 庞拂飞

上海大学通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室培育基地, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

摘要 传统的光学透镜存在体积较大、聚焦效率低、焦点半峰全宽较大以及在高数值孔径的透镜中性能表现不佳等问题。而光学超表面凭借其自身的亚波长结构, 具有强大的操控光相位的能力。相比于传统透镜, 超透镜具有尺寸小、厚度薄以及聚焦性能好等优点。本文提出一种基于目标优先算法的逆向设计方法, 设计了一种基于低折射率聚合物材料的超透镜结构。其在传播方向上的厚度仅为 $3.2\ \mu\text{m}$, 在 $1550\ \text{nm}$ 的工作波长下, 数值孔径为 0.82 , 聚焦效率为 72% 。较传统设计方法而言, 该方法具有计算复杂度低和设计效率高等优点。设计的器件可采用高精度微纳打印技术实现批量化的快速制造。考虑到超透镜在制备过程中存在制造容差, 进一步讨论了超透镜轮廓偏移以及三维旋转操作对所设计的二维超透镜的影响。

关键词 超表面; 超透镜; 逆向设计; 目标优先算法; 偏振不依赖性

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231859

1 引言

近年来, 随着光传感系统与成像系统的广泛运用, 小型化和轻量化的光学系统在汽车市场、工业、医疗和消费电子领域越来越受到人们的青睐, 小体积光学透镜的开发至关重要。然而, 传统透镜的光聚焦依赖于积累的传播相位, 又因为自身天然材料的折射率有限, 电磁场在器件中的传播需要足够的相位积累, 导致器件的尺寸很难进一步降低。因此, 基于光的连续相移的传统折射光学透镜, 体积通常远大于自身的工作波长, 需要较大的占地面积, 这严重限制了透镜在微米量级的光学系统中的应用。自从光学超表面的概念被提出以来^[1-2], 研究人员利用超表面调节光相位的能力, 展示了其在集成光学和光通信领域的重要应用潜力^[3-8]。现在利用先进的纳米加工技术, 可以研制出厚度可与几个波长相媲美的微透镜阵列。在光学领域, 增材制造克服了传统制造方法生产时间长、难以小型化、结构设计不灵活等缺点, 被广泛应用于高性能微型光学元件的制造^[9-11]。其中微纳打印技术可以制造具有复杂三维空间结构的器件, 且能够实现高精度的器件制备, 这对于实现真正的三维光子元件具有巨大的应用前景^[12]。

如今基于超表面优异的光学性能, 超透镜可以克服现有的大部分挑战^[13-15]。光学超表面通常利用亚波

长结构与光的相互作用来调整振幅、相位和偏振等特性。光刻、电子束光刻和微纳打印等技术的应用, 使得集成光学超表面器件的制造变得更加容易, 同时也将使制备更薄、质量更轻的超表面成为可能, 例如光束偏转器^[16]、涡旋相位板^[17]、全息成像^[18]、光栅等^[19]。超透镜作为超表面的子类, 其凭借独特的电磁响应特性和设计时较高的自由度在亚分辨率成像^[20]、光学隐形^[21]和校正单色像差^[22]等方面都显示出较大的应用潜力。

传统的光学器件设计方法很大程度上依赖于研究人员已有的设计经验, 以及对结构特性的直觉, 通常只适用于具有特定规则结构的器件。然而超表面的设计方法例如基于逆向设计的粒子群算法^[23-24]和遗传算法^[25], 它们不依赖研究人员过往的设计经验, 仅需要通过优化计算, 就能给出器件的局部最优解。相较于正向设计的方法, 逆向设计的方法通过使用目标函数, 来对器件的整体性能进行描述和优化, 需要的计算量更小, 并且可以进一步提高设计区域内的自由度, 实现更好的器件性能^[26-27]。逆向设计方法的优化结果往往是反直觉的、不规则的, 是传统设计方法难以实现的。

本文基于目标优先逆向设计方法, 针对低折射率材料的聚合物材料和空气组成的透镜结构进行优化, 最终实现了具有高数值孔径(NA)(0.82)、高聚焦效率(72%)并且焦点半峰全宽约等于衍射极限($0.9\ \mu\text{m}$)的

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-01-29; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62005153)、上海市自然科学基金(20ZR1420300)

通信作者: *hmwei@shu.edu.cn

超透镜结构。目标优先逆向设计方法中场变量与结构变量互相独立,因此不需要计算设计区域内的梯度,能够实现算法的快速计算。同时该方法通过将理想的边界条件设置为约束条件,能够避免出现低性能的局部最优解。该方法不需要额外的优化阶段,在优化得到最终的结构后,器件就已经是高度数字化(二元化)的结构。值得注意的是,本文的超透镜设计区域是一个二维剖面,以二维超透镜的中心对称轴进行旋转后能得到相应的三维超透镜。该方法得到的超透镜具有偏振不依赖的特性。最后考虑到实际中微纳打印技术的制备问题,对透镜结构作出了一定约束,并给出了超透镜在不同制造容差情况下的透镜性能。

2 基本原理

2.1 目标优先逆向设计方法

在目标优先算法中,本文首先在二维平面上定义

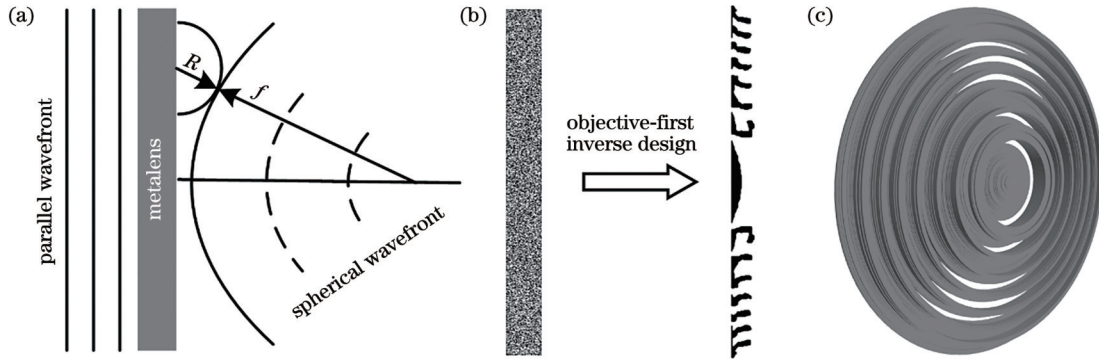


图 1 超透镜的仿真原理及过程。(a)超透镜的工作原理;(b)目标优先逆向设计方法的初始值(左)以及最终结果(右)的介电常数分布情况。黑色部分为构成器件的聚合物材料,白色部分为空气,灰色介于两者之间;(c)二维平面超透镜沿其中心对称轴旋转得到的三维超透镜结构

Fig. 1 Simulation principle and process of metalens. (a) Working principle of metalens; (b) permittivity distributions of initial value (left) and final result (right) of objective-first inverse design method. Black part represents polymer material constituting device, white part represents air, and gray part lies between the two; (c) 3D metalens structure obtained by rotating 2D planar metalens along its central symmetry axis

在确定输入和输出的相位分布后,通过目标优先逆向设计方法来对设计区域进行迭代更新,该算法的目标函数^[29-31]展示如下:

$$\begin{cases} \min_{\epsilon, H} \left\| \nabla \times \frac{1}{\epsilon} \nabla \times H - \omega^2 H \right\| \\ \text{subject to } f(H, H_{\text{boundary}}) = 0 \\ \epsilon_{\text{air}} \leq \epsilon \leq \epsilon_{\text{material}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϵ 表示设计区域内材料的介电常数分布; ω 为工作电磁场的频率; H 为设计区域内的磁场分布;而 H_{boundary} 代表设计区域边界上的磁场分布,该项为固定值,用于约束设计区域内的磁场变化。对于不同功能的器件,该变量的具体表现形式不同。在超透镜的设计中,它表现为左侧输入的平面波和右侧输出的球面波。式(2)中“subject to”代表约束条件,其中 f 由两部分组成,如下式所示:

一个仿真设计区域,通过给出设计区域上的入射和出射条件可确定器件的功能。在超透镜的设计过程中,要求该器件能够将入射的平行波前在出射时转换为球面波前,如图1(a)所示,其中输出平面上每个位置的相位突变^[28]为

$$\begin{cases} \phi(r, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} R(r) \\ R(r) = \sqrt{r^2 + f^2} - f \end{cases}, \quad (1)$$

式中: f 和 λ 分别是超透镜的工作焦距和工作波长; r 代表垂直于传播方向上的点到透镜中心的距离。显然超透镜的出射相位呈现双曲线分布,并且随着透镜数值孔径的增大,边缘处的相位变化会越发陡峭,此时需要更加精细的网格划分才能保证仿真优化的准确性,即最小网格需要满足Nyquist采样准则 $P < (0.5\lambda/NA)$,本文选取的精细网格满足该条件。

$$\begin{cases} H - H_{\text{boundary}} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\partial H_{\text{boundary}}}{\partial n} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中, n 代表设计区域边界处的法线方向。在本文目标优先逆向设计方法中,将麦克斯韦方程的范数作为优化算法的目标函数,该目标函数的值又称为物理残差,其单位与麦克斯韦波动方程保持一致,量纲为 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{A}^{-1}$ 。该方法在迭代过程中放宽了麦克斯韦方程的限制,并通过使用范数逼近的方法来实现对问题的优化^[32]。式(2)的优化问题显然是一个双线性的线性优化,不仅对于场变量 H 来说是线性的,而且对于结构变量 ϵ 来说也是线性的。因此可以将该目标函数分解为关于 H 和 ϵ 的两个子问题,然后依次以 H 和 ϵ 为变量进行交替求解。而式(3)中的约束主要作用于设计区域内的电磁场更新,保证器件结构的迭代更新方

向符合本文的预期。最终优化得到的结果如图 1(b) 所示。本文设计区域是一个 2D 平面,为了得到完整的 3D 的超透镜,可以将 2D 平面的超透镜沿其中心对称轴旋转,得到一个三维结构,如图 1(c) 所示。在优化迭代的过程中,对介电常数进行插值,允许它在设计区域内能够连续变化:

$$\epsilon_{\text{design}} = \epsilon_{\text{mat}} + p(\epsilon_{\text{mat}} - \epsilon_{\text{air}}), \quad 0 \leq p \leq 1, \quad (4)$$

式中: ϵ_{air} 为背景材料空气的介电常数; ϵ_{mat} 是器件结构材料的介电常数; p 为弛豫系数。相比于非插值的数字化方法,这样做的好处是算法拥有更大的可搜索空间,迭代会呈现一个相对平滑的变化过程,避免落入低效率的局部最优解而给出一个糟糕的结果。本文设计区域内的初始介电常数分布是基于随机数生成的随机机构,而非规则的或者平均分布的结构,展示了设计方法对于初始值的鲁棒性。图 1(b) 左半部分展示了设计区域的初始值,其中弛豫系数 p 在 0.32~0.42 范围内随机分布。

2.2 制造约束

进一步考虑器件实际微纳打印制造中的约束限制问题。在微纳打印的实际制造过程中,器件仅能由空气和所选的材料组成,存在任何介于两者之间介电常数的值都是不合理的、非物理的,应该消除。器件的离散化程度由下式的二分化系数来定义:

$$B = \frac{2 \sum_{i=1}^m \left| p_i - \frac{1}{2} \right|}{m}, \quad (5)$$

式中: m 代表设计区域内划分的网格中器件占据的总网格数目; p_i 则代表每个网格独立的弛豫系数。二分化系数 B 的值越大表示器件的离散化程度越高,当 $B=1$ 时代表所有网格的弛豫系数 p 均为 0 或 1,表明此时器件已经完成了二分化(数字化),即器件仅由构成材料与空气两种材料组成。二分化系数 B 不等于 1 的器件称为连续结构器件, B 等于 1 的器件称为二元结构器件。

由于连续结构仅能作为优化过程里的中间变量,需要建立连续结构与二元结构之间的转换关系。最直接有效的方法是通过设置一个阈值,将在阈值之上的介电常数转换为构成材料的介电常数,在阈值之下的介电常数转换为空气的介电常数,这样就可以将连续结构转化为完全二元化的介电常数分布(ϵ_{bin})。这种暴力应用二分化方法得到的器件通常性能很差。因此在式(2)中介电常数连续优化的过程中需要额外加上一个惩罚函数项,采用惩罚函数逼近的方法来兼顾器件的性能和二分化程度。将惩罚项定义为下一次迭代中需要优化的介电常数分布,与本次迭代中得到的直接离散化的介电常数之间的差值。式(2)的优化问题转化为

$$\begin{cases} \min_{\epsilon^{(n)}, H} \left\| \nabla \times \frac{1}{\epsilon^{(n)}} \nabla \times H - \omega^2 H \right\| + \lambda_{\text{bin}} \left\| \epsilon^{(n)} - \epsilon_{\text{bin}}^{(n-1)} \right\| \\ \text{subject to } f(H, H_{\text{boundary}}) = 0 \\ \epsilon_{\text{air}} \leq \epsilon \leq \epsilon_{\text{material}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: n 表示迭代次数; λ_{bin} 是一个超参数,可以通过改变它来调整二元化的强度, λ_{bin} 的值越大,代表二元化的权重越大。在实际迭代过程中使用 MATLAB 的 CVX 函数包来解决上述的凸优化问题^[33]。最后在商业的时域有限差分(FDTD)麦克斯韦方程求解器(Lumerical Inc.)中进行模拟仿真。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真结果

本文器件的逆向设计主要在二维平面中进行。这样做相比于直接进行三维仿真,单次优化中的场变量 H 的优化速度更快,需要的计算资源更少。同时,相比于三维逆向设计得到的结构,二维逆向设计的结果更加简单,出现的空洞以及细小特性更少,更适合实际的微纳打印制备。本文选取电磁场偏振方向垂直设计区域的横电磁波(TE)作为输入,同样选取电磁场为如式(1)所示的球面横电磁波作为输出。组成透镜的物质分别是介电常数 $\epsilon=1$ 的空气和介电常数 $\epsilon=2.31$ 的低折射率聚合物材料。超透镜的焦距设置为 11.3λ , 器件沿传播方向的宽度为 2.1λ , 长度为 32.2λ , 设计区域内的网格为边长为 0.065λ 的正方形,相应的 $NA=0.82$ 。通过利用麦克斯韦方程组的可伸缩性,并考虑到所用的聚合物材料是相对非色散的,因此将透镜缩放到 1550 nm 处。理论上,该方法优化得到的超透镜可以进行任意的等比例缩放,以满足不同波段的聚焦需求。在 1550 nm 的工作波长下,超透镜的焦距为 $17.5 \mu\text{m}$, 宽度为 $3.2 \mu\text{m}$, 长度为 $50 \mu\text{m}$, 设计区域中网格为边长 100 nm 的正方形。在超透镜的迭代过程中,从物理残差、聚焦效率、二分化系数三个方面对超透镜的优化性能进行评估,其中聚焦效率定义为焦距处宽度 $1.7 \mu\text{m}$ 内光强总和与输入光强之比。目标优先逆向设计方法经过 400 次迭代优化后,得到了最终的器件优化结果。图 2(a) 展示了迭代过程中物理残差的变化情况,总体呈现下降趋势。为了保证最终二元结构的性能,连续结构在迭代 100 次左右性能呈现下降趋势,这是可以接受的性能下降。图 2(b) 中的二分化系数总体呈现上升趋势,在大约 200 次迭代后超透镜结构趋于稳定,基本由空气和聚合物材料两部分构成,二分化程度很高,且最终二元结构与连续结构的差距很小。通过频域有限差分(FDFD)计算迭代过程中超透镜的聚焦效率,如图 2(c) 所示,在 50 次迭代之前,直接对连续结构进行数字化得到的二元结构透镜性能很差,与连续结构的聚焦效率相差较大。而在 150 次迭代之后,超透镜的连续结构和二元结构都收敛到了同一个值,最终的聚焦效率为 71%。由此可见本文方法仅损失很少的器件性能,就能够使器件最终很好地收敛为一个二元化结构。如图 2(d) 所示,连续结构与二元结构的主要区别在于,前者为优化后得到的结果,但介电常数分布存在中间值;后者为连续结构经过直接

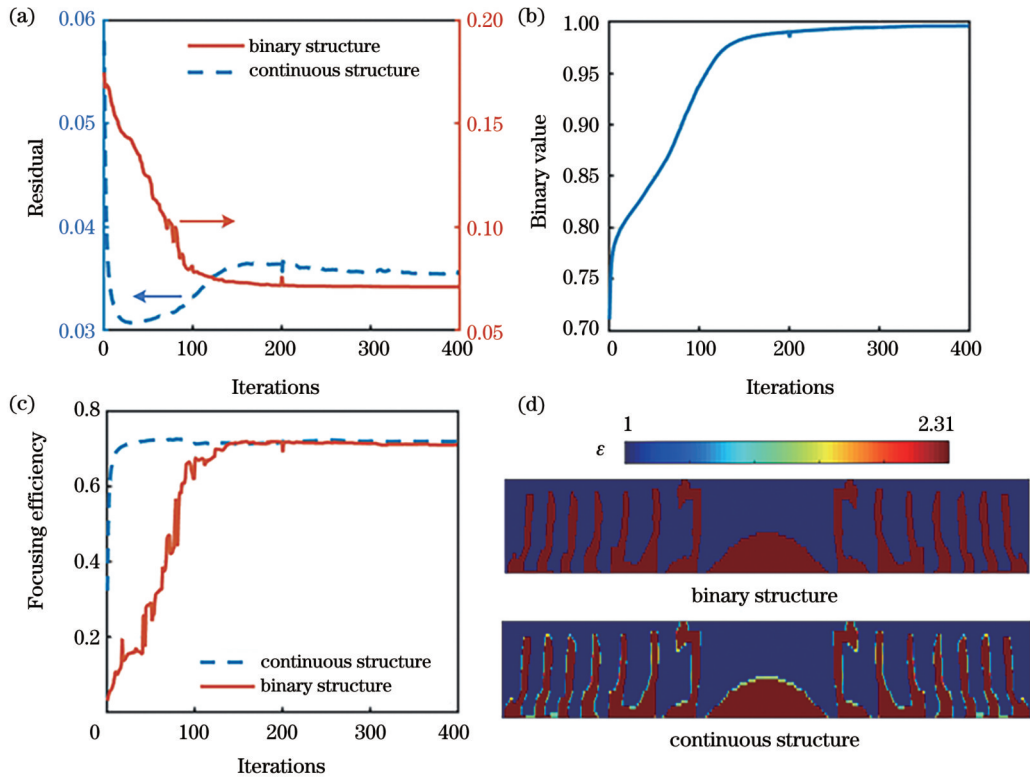


图2 超透镜在迭代过程中的参数变化情况。(a)超透镜的物理残差。实线代表连续结构,虚线代表二元结构;(b)超透镜的二元化系数;(c)连续结构和二元结构的聚焦效率;(d)第400次迭代连续结构和二元结构的介电常数分布情况

Fig. 2 Parameter changes of metalens during iteration process. (a) Residual of metalens, where solid line represents continuous structure and dashed line represents binary structure; (b) binary value of metalens; (c) focusing efficiencies of continuous structure and binary structure; (d) distributions of permittivity of continuous structure and binary structure at 400th iteration

二元化后的图案,其中介电常数分布不存在中间值。本文借用材料插值的方法,扩大算法的可搜索空间,并在最后消除了材料插值的弊端。

将目标优先算法得到的超透镜结构导入 Lumerical 的商业 FDTD 软件中进行仿真,在 1550 nm 平面波入射的情况下,得到如图 3(a) 所示的电场强度分布情况,焦距为 17.5 μm ,与逆向设计优化的焦距吻合。图 3(b) 展示了超透镜聚焦效率的带宽变化情况,在 1550 nm 处超透镜的聚焦效率最高,为 72%,通过计算 3 dB 带宽为 1447~1667 nm。图 3(c) 给出了焦距处 x 方向的电场强度分布情况,第一零点位于 0.85 μm 处,第二零点位于 1.8 μm 处,旁瓣很小。图 3(d) 展示了焦距处光斑的半峰全宽 (FWHM) 的带宽特性,在 1550 nm 处的 FWHM 为 0.9 μm ,略低于衍射极限的 0.96 μm ,其中衍射极限的定义为 $0.5\lambda/\text{NA}$ 。通过结合超透镜的聚焦效率和 FWHM 的带宽特性,该超透镜在 1500~1600 nm 的波长范围内能够实现高效率和高分辨率的光聚焦。

3.2 透镜的制备分析与讨论

在实际微纳器件制备过程中,由于光功率大小的变化,或是刻蚀深度的变化,都会导致最终制备的器件轮廓发生膨胀或收缩,最终导致器件的实验效果偏离仿真预期。以激光直写技术为例,该条件下器件制备

的最小分辨率为 100 nm,这也恰好是仿真设计区域的最小分辨率。因此综合考虑超透镜的尺寸大小,选择对超透镜的轮廓分别偏移 +100、+50、0、-50、-100 nm,来仿真验证制造容差引起的轮廓偏移对超透镜聚焦性能的影响。图 4 展示了轮廓偏移后,五种不同情况下超透镜横截面的介电常数分布。透镜膨胀和收缩 100 nm 后的截面面积分别是原来的 1.32 倍和 78%。显然,轮廓的收缩与膨胀会使透镜失去一些小的特征结构,进而导致透镜的聚焦性能发生改变。由于轮廓偏移前的透镜为算法给出的最优解,因此轮廓偏移后的透镜结构聚焦性能会出现适当下降。

针对图 4 中五种不同轮廓偏移的超透镜结构进行仿真,得到如图 5 所示的超透镜聚焦情况。图 5(a) 展示了在 FDTD 仿真中包含光轴平面的电场强度分布情况。其中轮廓偏移 -100 nm 的超透镜焦距为 16.9 μm 稍小于正常状态下的 17.5 μm ,而轮廓偏移 +100 nm 的超透镜焦距为 18.3 μm 稍大于正常情况下的聚焦,都处于超透镜的焦深范围内。图 5(b) 展示了超透镜轮廓偏移后,焦距 17.5 μm 处电场强度的分布情况。尽管超透镜轮廓进行了不同程度的偏移,但都在 17.5 μm 处保持了良好的聚焦归一化强度分布曲线。图 5(c) 给出了不同偏移程度下超透镜在 1300~1800 nm 的带宽范围内的聚焦效率变化情况。在

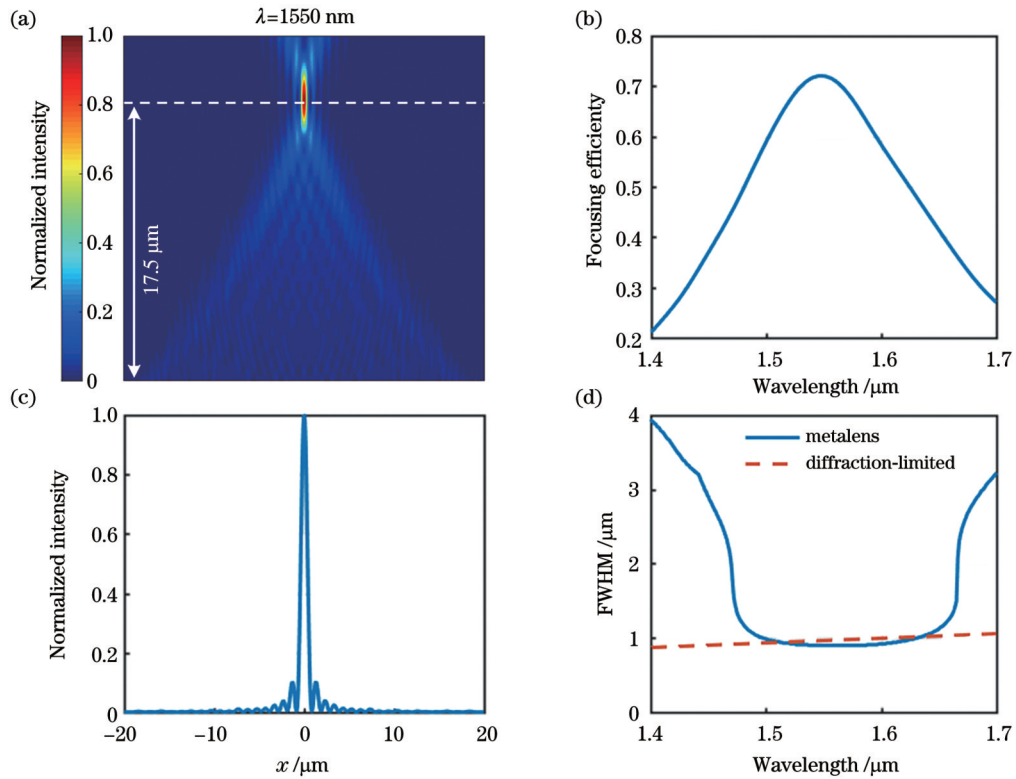


图3 工作波长为 1550 nm 的超透镜仿真。(a) 包含光轴平面的 $|E|^2$ 归一化强度分布; (b) 1300~1800 nm 超透镜的聚焦效率分布。1550 nm 处聚焦效率为 72%; (c) 焦距处 $|E|^2$ 的归一化强度分布; (d) 1400~1700 nm 超透镜焦距处焦点半峰全宽 (FWHM) 的带宽特性

Fig. 3 Simulation of a metalens operating at a wavelength of 1550 nm. (a) $|E|^2$ normalized intensity distribution for plane containing optical axis; (b) focusing efficiency distributions of metalens from 1300 to 1800 nm, with a focusing efficiency of 72% at 1550 nm; (c) normalized intensity distribution of $|E|^2$ at focal length; (d) bandwidth of focal full width at half maximum (FWHM) at focal length of metalens from 1400 to 1700 nm

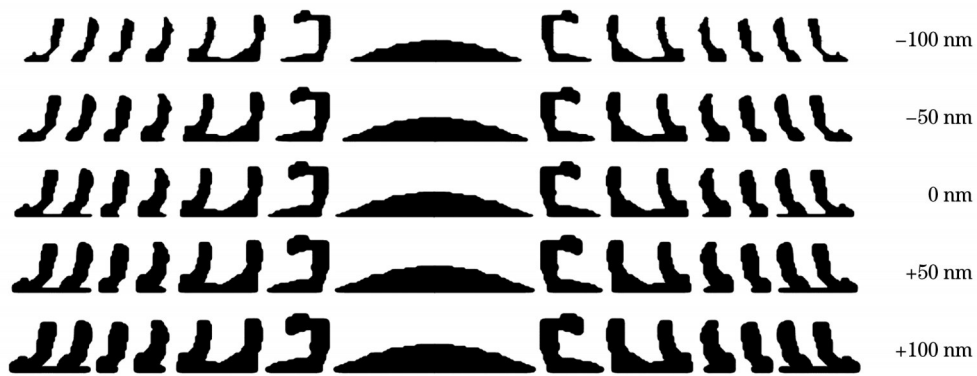


图4 超透镜轮廓分别偏移 -100、-50、0、+50、+100 nm 后得到的超透镜结构

Fig. 4 Metalens structure obtained after offsetting metalens profile by -100, -50, 0, +50, and +100 nm, respectively

1550 nm 处,超透镜轮廓偏移正负 50 nm 范围内,聚焦效率在 60% 以上,在 50 nm 的偏移范围内透镜的聚焦性能基本不变。而透镜在轮廓偏移正负 100 nm 的情况下,聚焦效率在 50% 左右,透镜的聚焦性能开始出现明显的下降。与轮廓标准的超透镜相比,轮廓偏移为负的超透镜展示出更短的焦距,而轮廓偏移为正的超透镜展示出更长的焦距。尽管超透镜轮廓偏移程度不同,但所有的超透镜仍然表现出相似的聚焦性能。

在实际制造中透镜的目标结构是三维的,因此以超透镜的中心对称轴为旋转轴进行旋转,进而得到了一个三维的超透镜结构。将三维超透镜导入 Lumerical 软件中进行三维 FDTD 仿真,同时以波长 1550 nm 的圆偏振光作为入射光源。图 6(a)上方展示了 1550 nm 光入射情况下距透镜 17.5 μm 的焦平面处的电场强度分布,下方展示了对应焦平面 x 方向上的电场强度分布情况。值得注意的是,该三维超透镜结

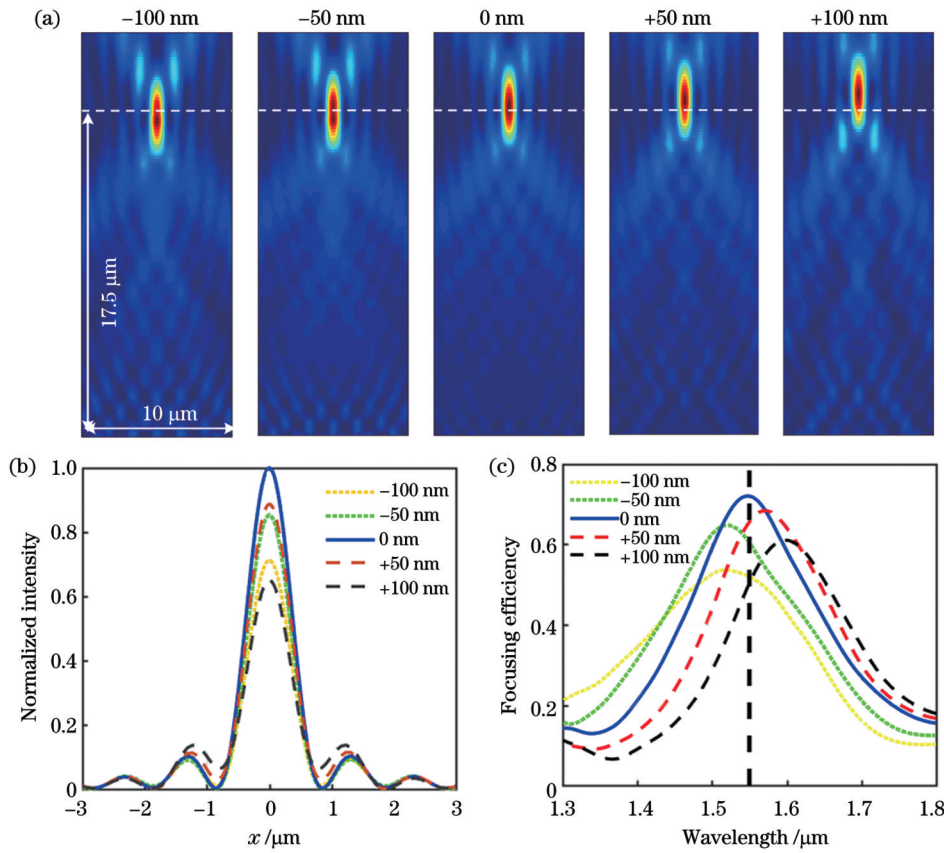


图 5 超透镜轮廓偏移对性能的影响。(a) 包含光轴平面的 $|E|^2$ 归一化强度分布; (b) 焦平面处 x 方向上 $|E|^2$ 归一化强度分布; (c) 不同轮廓偏移下超透镜聚焦效率带宽曲线

Fig. 5 Effect of metalens profile shift on performance. (a) $|E|^2$ normalized intensity distribution for plane containing optical axis; (b) $|E|^2$ normalized intensity distribution in x direction at focal plane; (c) bandwidth curves of metalens focusing efficiency at different profile offsets

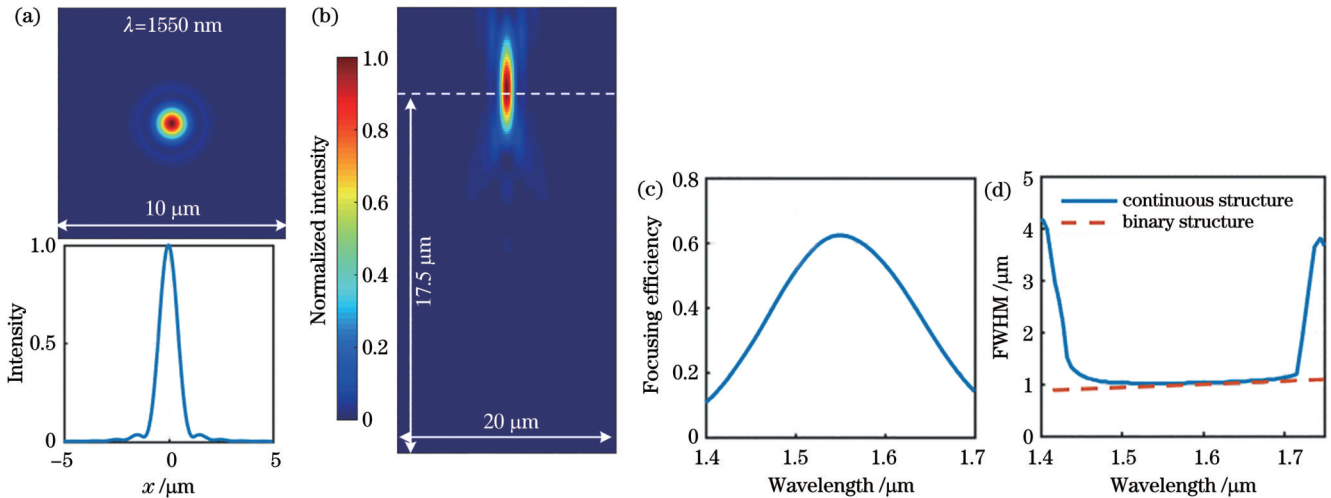


图 6 超透镜的三维 FDTD 仿真。(a) 距超透镜 $17.5 \mu\text{m}$ 平面处的 $|E|^2$ 归一化强度分布; (b) 包含光轴平面的电场强度归一化分布; (c) $1300 \sim 1800 \text{ nm}$ 带宽内的聚焦效率; (d) $1400 \sim 1750 \text{ nm}$ 带宽内焦平面处焦点的 FWHM 变化

Fig. 6 3D FDTD simulation of metalens. (a) $|E|^2$ normalized intensity distribution at a plane $17.5 \mu\text{m}$ away from metalens; (b) normalized distribution of electric field intensity for plane containing optical axis; (c) focusing efficiency within a bandwidth from 1300 to 1800 nm ; (d) FWHM variation of focal point at focal plane within $1400 \sim 1750 \text{ nm}$ bandwidth

构具有偏振不敏感的特性。图 6(b) 展示了包含光轴的传输平面上电场强度的分布情况, 焦距为 $17.7 \mu\text{m}$,

与二维仿真情况下的焦距相差很小, 在 $17.5 \mu\text{m}$ 处也能呈现出良好的聚焦特性。

对于超透镜的带宽聚焦特性,图 6(c)给出了超透镜在 1300~1800 nm 带宽范围内的聚焦效率变化情况,在 1550 nm 处,超透镜的聚焦效率为 62%。这里的聚焦效率定义为距离超透镜 17.5 μm 的平面处,边长 1.7 μm 的正方形范围内的光强总和与该平面内光强的比值。相比于二维情况下透镜的聚焦效率,透镜在三维仿真中聚焦效率有所下降。可能的原因是选取的输入电磁场为垂直设计区域的横电磁波,但在经过三维旋转后,光的偏振显然无法同时垂直三维透镜的所有界面,有且仅有一个切面垂直于入射的横电磁波的偏振,且必定能找到一个与电磁场偏振方向平行的切面,导致透镜的聚焦效率有所下降。图 6(d)展示了 1400~1750 nm 范围内,距超透镜 17.5 μm 的平面上焦点的 FWHM 变化情况。在 1550 nm 处,焦点的 FWHM 为 1 μm ,与二维情况下 0.9 μm 的焦点的 FWHM 相差无几,都非常接近衍射极限。可以看到,三维超透镜工作波段包含了 1500~1600 nm 的范围,与二维仿真情况下一致。

本文针对微纳尺度的单色超透镜结构进行逆向优化设计。在仿真优化过程中,采用的单色波长为 1550 nm。由于组成超透镜的聚合物材料在红外波段的折射率变化较小,可以被近似认定为常数,该方法可进一步通过结构优化的方式设计消色差超透镜。为了实现消色差透镜,需要增加设计区域中的超透镜厚度,以适应更复杂的相位调制。结合相位补偿的方法,在目标函数中加入更多的追踪优化波长。而对于大面积超透镜的设计,本文采用的有限差分仿真不再适用,这会导致计算复杂度过大等问题。然而,这可以通过使用其他仿真方法来解决,例如将本文提出的目标优先逆向设计方法与有限元仿真相结合,能够实现大尺度下的超透镜优化设计。

4 结 论

针对传统透镜体积大、NA 较小和聚焦效率不足的问题,本文基于目标优先逆向设计方法和超透镜的聚焦特性,对具有低折射率的聚合物透镜的结构进行优化计算,实现了小体积、高 NA 和高聚焦效率的超透镜结构。由于光学衍射性能的限制,最终的优化结果没有突破衍射极限。目标优先逆向设计的方法放宽了麦克斯韦方程的限制,将它作为目标函数,并通过将目标函数分解为两个子问题的方式,保证优化能够快速进行的同时施加高效率约束条件,避免迭代落入低效率的局部最优解。同时对结构变量 ϵ 的限制,保证了在优化过程中对 ϵ 进行插值后,最终收敛的结构是可以制备的且高效率的二元结构。超透镜在 1550 nm 的工作波长下焦距为 17.5 μm ,宽度为 3.2 μm ,直径长度为 50 μm ,NA=0.82,聚焦效率为 72%。本文还讨论了超透镜在微纳打印制备过程中,可能因为制造容差而导致出现轮廓偏移的情况。给出了超透镜在轮廓偏

移程度 100 nm 范围内的性能变化情况。结果显示,本文的优化结果具有良好的制备容差鲁棒性,在小的制造容差下,超透镜都拥有相对良好的聚焦性能。最后将超透镜进行三维旋转,给出了在三维 FDTD 仿真下的性能。此外,本文的超透镜具有偏振不依赖的特性,且在圆偏光的入射条件下聚焦效率为 62%。

参 考 文 献

- [1] Pirjan A, Petrosanu D M. The impact of 3D printing technology on the society and economy[J]. Journal of Information Systems and Operations Management, 2013, 7(2): 360-370.
- [2] Standard terminology for additive manufacturing technologies: ASTM International F2792-12a[S]. New York: ASTM, 2012.
- [3] 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.
- [4] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 10-35.
- [5] 唐剑雄, 龚岩栋, 庞恺. 二维超构表面: 超透镜应用及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2100004. Tang J X, Gong Y D, Pang K. Two-dimensional metasurface: application and research progress of metalenses[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2100004.
- [6] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(2): 125-130.
- [7] Neshev D, Aharonovich I. Optical metasurfaces: new generation building blocks for multi-functional optics[J]. Light, Science & Applications, 2018, 7: 58.
- [8] 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823001. Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. On-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823001.
- [9] Callewaert F, Velez V, Kumar P, et al. Inverse-designed broadband all-dielectric electromagnetic metadevices[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1358.
- [10] Ouyang X, Yin Z K, Wu J S, et al. Rapid optical μ -printing of polymer top-lensed microlens array[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18376-18382.
- [11] Hadibrata W, Wei H M, Krishnaswamy S, et al. Inverse design and 3D printing of a metalens on an optical fiber tip for direct laser lithography[J]. Nano Letters, 2021, 21(6): 2422-2428.
- [12] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives[J]. Nature Photonics, 2016, 10: 554-560.
- [13] Kim S J, Kim C, Kim Y, et al. Dielectric metalens: properties and three-dimensional imaging applications[J]. Sensors, 2021, 21(13): 4584.
- [14] Chen W T, Capasso F. Will flat optics appear in everyday life anytime soon? [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(10): 100503.
- [15] Chen M K, Wu Y F, Feng L, et al. Principles, functions, and applications of optical meta-lens[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(4): 2001414.
- [16] Komar A, Paniagua-Domínguez R, Miroschnichenko A, et al. Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018, 5(5): 1742-1748.
- [17] Chen S M, Cai Y, Li G X, et al. Geometric metasurface fork gratings for vortex-beam generation and manipulation[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2): 322-326.

- [18] Huang L L, Zhang S, Zentgraf T. Metasurface holography: from fundamentals to applications[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1169-1190.
- [19] Yue L S, Wang Y, Cui Z J, et al. Multi-band terahertz resonant absorption based on an all-dielectric grating metasurface for chlorpyrifos sensing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13563-13575.
- [20] Chen G, Wen Z Q, Qiu C W. Superoscillation: from physics to optical applications[J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 56.
- [21] Lee K T, Ji C G, Iizuka H, et al. Optical cloaking and invisibility: from fiction toward a technological reality[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(23): 231101.
- [22] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13682.
- [23] 黄宝泽, 赵芬, 刘钦晓, 等. 超分辨波长调控变焦超透镜[J]. *光学学报*, 2023, 43(23): 2322001.
Huang B Z, Zhao F, Liu Q X, et al. Super-resolution wavelength-controlled zoom metalens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(23): 2322001.
- [24] 申益佳, 谢鑫, 蒲明博, 等. 基于传输相位和几何相位协同调控的消色差超透镜[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 200237.
Shen Y J, Xie X, Pu M B, et al. Achromatic metalens based on coordinative modulation of propagation phase and geometric phase[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200237.
- [25] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, et al. Integrated nanophotonic wavelength router based on an intelligent algorithm[J]. *Optica*, 2019, 6(10): 1367-1373.
- [26] 朱国锋, 戴圳镛, 居学尉, 等. 基于逆向设计的片上太赫兹解复用器和光栅耦合器[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0913001.
Zhu G F, Dai Z R, Ju X W, et al. On-chip terahertz demultiplexer and grating coupler based on reverse design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0913001.
- [27] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 659-670.
- [28] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [29] Lu J, Vuckovic J. Objective-first nanophotonic design[M]// Diest K. Numerical methods for metamaterial design. Topics in applied physics. Dordrecht: Springer, 2013, 127: 147-173.
- [30] Lu J, Vučković J. Objective-first design of high-efficiency, small-footprint couplers between arbitrary nanophotonic waveguide modes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7221-7236.
- [31] Lu J, Vucković J. Inverse design of nanophotonic structures using complementary convex optimization[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3793-3804.
- [32] Boyd S P, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [33] Grant M, Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.2[OL]. (2020-01-20). <https://cvxr.com/cvx>.

Inverse Design of High-Performance Near-Infrared Polymer Metalens

Wei Heming*, Hu Wenchen, Pang Fufei

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective With the widespread utilization of light-sensing systems and imaging systems, miniaturized and lightweight optical systems have become increasingly popular in the automotive market, industry, and medical and consumer electronics. The development of small-volume optical lenses has become crucial. Traditional optical lenses usually have large volume, low focusing efficiency, large full-width half-maximum of the spot, and poor performance in lenses with high numerical aperture (NA). The optical metasurface with sub-wavelength structures has powerful control over the light phase. Compared to traditional lenses, metalenses feature smaller volumes, thinner thickness, and better focusing performance. In the metalens design, the inverse design method has less computational complexity than the traditional design method, and meanwhile this method can provide an optimal solution for the device in a larger searchable space and improve the design efficiency. We propose an objective-first algorithm-based inverse design approach to design a low refractive index-based metalens structure. At a working wavelength of 1550 nm, the metalens has a thickness of 3.2 μm in the propagation direction, a focusing efficiency of 72%, and a high NA of 0.82. Compared with the traditional design method, this approach has low computational complexity and high efficiency. The designed devices can be rapidly manufactured by the high-precision micro-nano printing technique. Considering possible errors during the metalens fabrication, the effects of metalens contour offset and 3D rotation operations on the designed 2D metalens are further discussed.

Methods In the objective-first algorithm, we define a simulation design area on a two-dimensional plane, and the device function can be determined by giving the incident and exit conditions on the design area. During the metalens design, we

require that the device can convert the incident parallel wavefront into a spherical wavefront during exiting. After determining the phase distribution of the input and output, we iteratively update the design area by the objective-first inverse design method. This method employs the norm of Maxwell's equations as the objective function of the optimization algorithm, and the value of this objective function is called the physical residual. During the optimization iteration, we interpolate the dielectric constant, allowing it to continuously change within the design area. The advantage is that the algorithm has a larger searchable space. Meanwhile, we achieve rapid transformation between continuous and binary structures by adding a penalty function.

Results and Discussions The materials that make up the lens are air with a dielectric constant of 1 and a low-refractive index polymer material with a dielectric constant of 1.52. The focal length of the metalens is set to 11.3λ , the width of the device along the propagation direction is 2.1λ , and the length is 32.2λ . The grid in the design area is a square with a side length of 0.065λ , and the corresponding NA is 0.82. By utilizing the scalability of Maxwell's equations, we therefore scale the lens to a wavelength of 1550 nm. In theory, the metalens optimized by this method can be scaled as needed to meet the focusing requirements of different wavebands. At the operating wavelength of 1550 nm, the focal length of the metalens is $17.5\ \mu\text{m}$, the width is $3.2\ \mu\text{m}$, and the length is $50\ \mu\text{m}$. The grid in the design area is a square with a side length of 100 nm, and the focusing efficiency is 72%. The 3 dB bandwidth is calculated as 1447 to 1667 nm, and the half-maximum width is $0.9\ \mu\text{m}$, slightly lower than the $0.96\ \mu\text{m}$ limit imposed by diffraction. Within the offset range of plus or minus 50 nm of the hyperlens profile, the focusing efficiency is above 60%. It can be concluded that the focusing performance of the lens remains essentially unchanged within the offset range of 50 nm. When the lens profile is shifted by plus or minus 100 nm, the focusing efficiency drops to around 50%, and the focusing performance of the lens starts to decline significantly. A metalens with a negative profile shift exhibits a shorter focal length, while a metalens with a positive profile shift exhibits a longer focal length.

Conclusions To address the problems associated with traditional lenses, such as their large volume, low NA, and insufficient focusing efficiency, we focus on optimizing the structure of polymer lenses with low refractive index. This is achieved by adopting the objective-first inverse design method and the focusing characteristics of metalenses. The goal is to design a metalens structure featuring high NA and focusing efficiency, with the limitations imposed by optical diffraction performance considered. Additionally, the objective-first inverse design method is employed to relax the restrictions of Maxwell's equation and utilize it as the objective function. By breaking down the objective function into two sub-problems, the optimization process can be carried out efficiently without getting stuck in low-efficiency local solutions. Additionally, structural variables are limited to ensure that the finalized structure obtained via interpolation during the optimization is binary in nature and highly efficient. Meanwhile, we discuss the potential for contour deviation during the micro-nano printing preparation of the metalens due to manufacturing tolerances. We analyze the performance changes of the metalens within a profile deviation range of 100 nm. The results demonstrate the robustness of our optimization approach to manufacturing tolerances, with the metalens showing relatively sound focusing performance even with small deviations from the desired profile. Furthermore, we conduct three-dimensional FDTD simulations by rotating the metalens, which reveals that the metalens exhibits polarization-independent characteristics and achieves a focusing efficiency of 62% under incident conditions of circularly polarized light.

Key words metasurface; metalens; inverse design; objective-first algorithm; polarization independence