

文章编号:1001-5078(2024)02-0267-07

· 光学技术 ·

# 基于粒子群与遗传算法的消色差超透镜自动设计

李昭慧, 吕怡豪

(西安科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710600)

**摘要:** 本文利用智能优化算法, 对宽波段消色差超透镜进行设计优化。首先, 研究构建于二氧化硅基底上的硅纳米柱这一微单元结构的光学特性, 通过数值仿真扫描单元结构的半径构建相位数据库。之后, 通过使用粒子群与遗传算法的混合算法(PSO\_GA)在相位数据库中找到最佳相位矩阵, 即对应每个位置最佳的单元结构。最后, 构建超透镜, 通过仿真实验验证其可实现红外波段(1000 nm ~ 1250 nm)的聚焦, 且消色差效果优于传统粒子群优化算法所获得的超透镜结构。此超透镜的设计为平面光学器件的自动化设计提供了一种解决方法。

**关键词:** 硅纳米柱; PSO\_GA; 近红外波段; 超透镜; 光斑质量

**中图分类号:** TN214; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.02.016

## Automatic design of achromatic metalens based on particle swarm and genetic algorithm

LI Zhao-hui, LV Yi-hao

(Xi'an University of Science and Technology, College of Telecommunication Engineering, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** In this paper, an intelligent optimization algorithm is used to optimize the design of a wide-band achromatic superlens. Firstly, the optical properties of silicon nanocrystals (SI nanocrystals) constructed on silica substrate are studied, and a database is constructed by scanning the radius of the unit structure through numerical simulation. Then, a hybrid algorithm of particle swarm optimization and genetic algorithm (PSO\_GA) is used to find the optimal phase matrix in the phase database, that is, the optimal cell structure corresponding to each position. Finally, the superlens is constructed, and verified through simulation experiments that it can realize the focusing in infrared band (1000 ~ 1250 nm), and the achromatic effect is better than that of the superlens structure obtained by the traditional particle swarm optimization algorithm. Therefore, the design of this superlens provides a solution for the automatic design of planar optical devices.

**Keywords:** silicon nanopillar; PSO\_GA; near-infrared band; superlens; spot quality

### 1 引言

近年来, 微纳光子学蓬勃兴起, 并随着精密加工技术的发展, 人们利用纳米结构材料实现对亚波长光场调控的能力取得长足的进步。2011年, 哈佛大学的 Capasso 教授研究组即提出了超表面 (Metasurface) 的设计思想——通过由亚波长结构单元组成

的薄层局地控制空间光场的相位、偏振、振幅等物理量。超表面器件可以有效地调控光特性从而实现特定应用<sup>[1-3]</sup>, 同时避免了光在体块材料内部传输造成巨大损耗, 具有轻量化、易集成的优点, 因而具有重要的应用前景。

超表面用作聚焦透镜即为超透镜, 它可以产生

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (No. 62274124); 国家自然科学基金青年项目 (No. 61705178) 资助。

**作者简介:** 李昭慧 (1979 -), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光衍射特性的计算与反演, 超衍射极限成像研究。

E-mail: 1564822216@qq.com

**通讯作者:** 吕怡豪 (1998 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光衍射, 色散技术研究。E-mail: 2607495489@qq.com

**收稿日期:** 2023-06-27

双曲相位面,从而获得较大衍射效率的聚焦光束<sup>[4-7]</sup>。然而,超透镜作为一种衍射型器件,受限于亚波长结构单元的波长敏感性,往往存在较强的色散,严重影响其在全色光学应用中的性能。

为解决超透镜的色散问题,国内外的研究者提出了多种方法。2015年,Capasso等人实现了采用色散相位补偿的多波长消色差超表面<sup>[8]</sup>,使得各个波长在焦距为7.5 mm处聚焦良好。2019年,Hu等人使用了一种圆柱形单元结构实现了工作在234~274 nm的消色差超透镜。使得在宽带范围内焦距为4.75 μm几乎保持不变,并且测得的爱里斑的最大半峰宽度(FWHM)值接近衍射极限尺寸<sup>[9]</sup>。2022年,Chen等人采用了硅纳米柱和相板组成的集成单元结构实现了波长在1100~1500 nm范围内焦距在32 μm处保持基本不变的消色差超透镜<sup>[10]</sup>。以上工作是由科学家根据计算和经验,挑选出光学响应接近于设计目标的单元结构,进行组合构成超透镜初始结构,然后再仿真分析其性能,并对结构进行优化微调,如此反复迭代,直到超透镜光学响应能够满足设计要求。人工挑选单元结构可能存在偏差,多次仿真与参数优化耗费大量时间<sup>[11]</sup>。

为实现自动设计与优化,Capasso团队在聚焦公式中引入一个仅与波长相关的优化因子,采用粒子群优化算法来确定每个波长的优化因子,实现了反射式消色差超透镜<sup>[12]</sup>。另外,国内学者申益佳同样利用粒子群优化算法设计了一种相位调控型透射式超透镜,实现了400~650 nm波段的宽带消色差聚焦功能,并且仿真出的半峰宽度与计算的理论衍射极限相比具有较高的一致性<sup>[13]</sup>。粒子群优化算法虽然实现方式简单,全局搜索能力强,但缺乏速度的动态调节,容易陷入局部最优,导致收敛慢且精度低<sup>[14-16]</sup>。

而智能优化算法中另一种算法是遗传算法,遗传算法是借鉴自然界生物的进化方式,将生物进化的过程算法化,并在计算机上进行模拟实现,从而用来解决实际领域中的优化问题,是一种可以避免限于局部最值的全局搜索算法<sup>[17-18]</sup>。

因此,为实现宽带超透镜的自动设计,本文首先在高透过率SiO<sub>2</sub>基底以及高折射率Si纳米柱所组成的微纳结构基础上,研究固定高度下,不同直径纳米柱在宽波长范围的调制特性。之后,通过改进粒

子群优化算法并引入遗传算法组成混合算法,搜索超透镜中每个位置的最佳单元结构,实现了宽带的消色差超透镜的设计,达到了在正入射的条件下,将1000~1250 nm红外波段的平面波汇聚到轴上同一焦点。

## 2 宽带消色差超透镜设计原理

为实现波长为 $\lambda$ 的平面波在正入射条件下透过焦距为 $f$ 的超透镜聚焦,要求超透镜上距透镜中心为 $R$ 的任一点,对中心提供的相对相位偏移 $\phi(R)$ 为<sup>[19]</sup>:

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

其中, $R^2 = \sqrt{x^2 + y^2}$ 是超透镜上任意位置 $(x, y)$ 到光心的距离(超透镜位于 $z = 0$ 平面)。

当入射波长带宽为 $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$ 时,由于不同波长的光在介质中的传播速度不同,并不能对不同波长入射光产生同样的相位延迟,即不能透过超透镜聚焦于同一个位置,从而产生色差效应。在固定焦距 $f$ 下, $R$ 点的相位分布同波长的函数关系表示下为式:

$$\phi_{\text{lens}}(R, \lambda) = \phi(R, \lambda_{\max}) + \Delta\phi(R, \lambda) \quad (2)$$

其中:

$$\Delta\phi(R, \lambda) = -[2\pi(\sqrt{R^2 + f^2} - f)]\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}}\right)$$

式(2)表明:偏移相位可以被分为两部分,其中 $\phi(R, \lambda_{\max})$ 为参考相位,仅仅与 $\lambda_{\max}$ 相关而独立于工作波长 $\lambda$ ,利用式(1)就可以获得; $\Delta\phi(R, \lambda)$ 是一个与工作波长相关的函数,与 $1/\lambda$ 成线性关系,可被看作在波长 $\lambda$ 相对波长 $\lambda_{\max}$ 在 $R$ 点产生的相位差。

消色差超透镜设计的目的即寻找最佳结构参数,使其在宽波段约束下,能够提供最接近 $\phi(R)$ 的调制特性。因此,相位分布 $\phi_{\text{lens}}(R, \lambda)$ 需要根据波长修正,使 $\Delta\phi(R, \lambda)$ 在各波长下都为0或常数,进而使其焦点位置调整。

恒定相位差 $\Delta\phi(R, \lambda)$ 可以通过设计每个单元结构的传输响应来实现。由于微纳结构对波长的敏感性,因此引入一个额外的优化因子 $C(\lambda)$ ,通过对特定波长的相位补偿,实现 $\Delta\phi(R, \lambda)$ 定值化。消色差超透镜的相位分布改写为下式:

$$\phi_{\text{lens}}(R, \lambda) = \phi(R, \lambda_{\max}) + \Delta\phi(R, \lambda) + C(\lambda) \quad (3)$$

由于构建超透镜所需要的理想相位  $\phi(R)$  是根据目标超透镜的参数直接计算出来的,而实际相位由微纳单元结构对光波的调制所提供。因此,需研究单元结构的调制特性,构建调制特性数据集,从中筛选符合调制要求的单元结构。

### 3 微单元结构响应特性数据库构建

由于柱形结构具有结构简单、光学性能优异(可以实现超广角、低畸变、高分辨率的光学成像)、体积小、易于模块化等优点,因此本文选取的纳米结构的形状为柱形结构。首先,选择如图 1 所示的微结构作为消色差超透镜的基本单元,该结构由二氧化硅基底和硅纳米柱两部分构成。超透镜的局部相位调控功能由微单元的材料及结构参数决定。在材料选定的情况下,调整硅纳米柱形状,考察其调制特性。

用于聚焦成像的超透镜单元应当满足  $0 \sim 2\pi$  的相位调制深度覆盖,需要对单元结构的初始参数进行相应的设置。已有研究表明,固定硅纳米柱直径情况下,相位调制深度随单元柱高度的增高而变大<sup>[2]</sup>。因此,本文采用固定单元结构高度,改变单元结构直径的方式来实现相位调制。在数值仿真软件 FDTD 中搭建如图 1 所示的单元结构,并设置仿真区域及虚拟监视器。受制造工艺限制,设置单元结构高度为  $0.6 \mu\text{m}$  定值。由于目前超透镜制造的最小可实现宽度限制为  $0.08 \mu\text{m}$ ,同时为保障聚焦效率,最大实现宽度一般设置为相邻单元中心至中心的距离,故纳米柱半径  $r$  的设置范围为  $(0.04 \mu\text{m}, 0.2 \mu\text{m})$ 。

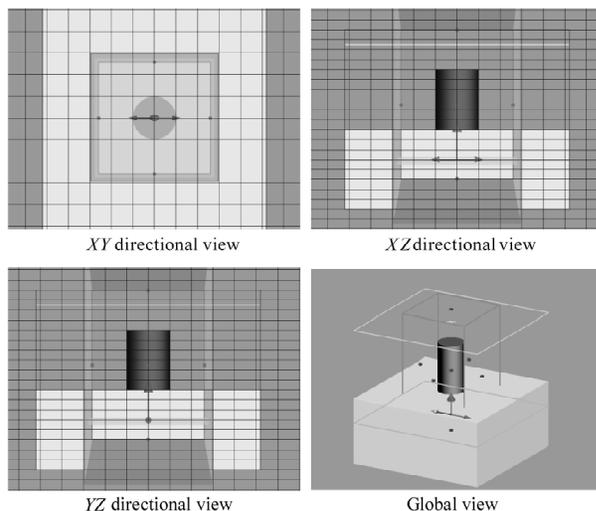


图 1 消色差超透镜的单元结构

Fig. 1 The cell structure of the achromatic superlens

之后,调整硅纳米柱形状,考察其在不同波长下的调制特性。以硅纳米柱最小半径  $r_{\min} = 0.04 \mu\text{m}$

起始,逐步增大,增大步长  $\Delta r = 0.0008 \mu\text{m}$ ,直至最大半径  $r_{\max} = 0.2 \mu\text{m}$  为止。选择工作波段  $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) = (1000 \text{ nm}, 1250 \text{ nm})$  上的 6 个特征波长  $(\lambda_0 = 1000 \text{ nm}, \lambda_1 = 1050 \text{ nm}, \lambda_2 = 1100 \text{ nm}, \lambda_3 = 1150 \text{ nm}, \lambda_4 = 1200 \text{ nm}, \lambda_5 = 1250 \text{ nm})$ ,考察不同半径微纳结构对每个特征波长的调制特性,记录 FDTD 计算所得此半径单元结构对此波长入射光产生的相位延迟。最后将所得到的 6 个波长的半径与相位一一对应构建实际离散相位数据集  $\phi[r, \lambda]$ ,其中  $r$  为微纳单元结构半径,  $\lambda$  为特征波长。

相位延迟数据集  $\phi[r, \lambda]$  如图 2 所示,可以看出 6 个波长的相位覆盖都在  $[0, 2\pi]$  之间。

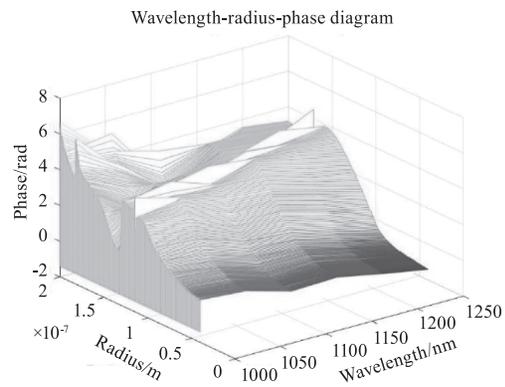


图 2 各波长下微纳结构调制特性曲线图

Fig. 2 Modulation characteristic curves of micro-nano structures at each wavelength

### 4 PSO\_GA 算法寻找最优解

超透镜设计的目的是使单元结构对每个波长所给出的实际相位波面与理想相位分布之间的差异最小,如式(4),即使各位置  $R$  上的相位误差函数  $\varepsilon$  最小:

$$\varepsilon = \sum_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda_5} \sum_{R=0}^{R_{\max}} |\phi(R) - \phi_{\text{lens}}(R, \lambda)| \quad (4)$$

超透镜设计转化为求解  $C(\lambda)$  使上式取得极小值的数学问题。本文利用粒子群优化算法加上遗传算法(PSO\_GA)搜索最优  $C(\lambda)$ 。PSO\_GA 是以粒子群优化算法作为基本框架,在其中加入了遗传算法的交叉、变异操作,用于对种群进行更新。该算法是通过主循环不断的迭代得到适应度最小所对应的最佳种群。其中交叉算子的引入可以提升算法的全局搜索性能,有效避免单一粒子群算法搜索陷入局部最优值的缺陷。因此组合后的 PSO-GA 混行算法的优化性能可以得到很大的提升<sup>[20]</sup>。本文设计的是数值孔径为  $\text{NA} = 0.5$ 、焦距  $f = 20 \mu\text{m}$  的宽带消色差超透镜。利用 PSO\_GA 算法得到最优  $C(\lambda)$  具

体流程如下:

Step1:初始化种群。以 30 个取值在  $(0, 2\pi)$  间的随机数作为某波长下  $C(\lambda)$  的初始种群  $C^0$ , 每个值的位置用下标  $i$  表示, 分别设置不同波长初始化种群  $C^0(\lambda)$ , 特征波长标号以下标  $j$  表示, 因此,  $C^0(\lambda)$  构成维度为  $30 \times 6$  的向量空间  $C_{i,j}^0$ 。另外, 初始化种群速度  $v^0$ , 构成  $30 \times 6$  空间向量  $v_{i,j}^0$ , 每个值为  $(0, 1)$  之间的随机数。之后, 对于种群  $C^0$  中的每个粒子  $C_i^0$ , 根据式(4)依次计算其适应度  $\varepsilon_i^0$  并组成初始种群适应度  $\varepsilon^0$ 。假设每次迭代种群的最优粒子为  $a$ , 对整个初始种群的适应度  $\varepsilon^0$  取最小值得到最优粒子对应的适应度, 即  $\varepsilon_a^0 = \min\{\varepsilon^0\}$ 。

Step2:利用粒子群优化算法迭代更新种群  $C_{i,j}^t$ 。第  $i$  个粒子第  $j$  个列向量  $C_{ij}^t$  在第  $t$  次迭代的更新如式(5), 其中参数设定为:惯性因子  $w = 0.8$ , 个体学习因子  $c_1 = 1.49445$ , 群体学习因子  $c_2 = 1.49445$ ,  $r_1^t, r_2^t$  为  $[0, 1]$  内的随机数, 每次迭代时随机更新。

$$\begin{cases} V_{ij}^{t+1} = wv_{ij}^t + c_1r_1^t[\varepsilon_i^t - C_{ij}^t] + c_2r_2^t[\varepsilon_a^t - C_{ij}^t] \\ C_{ij}^{t+1} = C_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \end{cases} \quad (5)$$

Step3:对更新后的种群  $C'$  进行交叉、变异操作, 具体过程为:

交叉操作:随机选择  $C'$  中的两个行向量  $C'_{i_1}$  和  $C'_{i_2}$  对其采用公式(6)进行交叉操作得到  $C'_{i_{11}}$  和  $C'_{i_{22}}$ , 其中  $\beta_1, \beta_2$  为数值为  $(0, 1)$  的随机数, 将  $C'$  中  $C'_{i_1}$  和  $C'_{i_2}$  的两个行向量用  $C'_{i_{11}}$  和  $C'_{i_{22}}$  来替换得到种群  $C''$ 。

$$\begin{cases} C'_{i_{11}} = \beta_1^T \cdot C'_{i_1} + (1 - \beta_1)^T \cdot C'_{i_2} \\ C'_{i_{22}} = \beta_2^T \cdot C'_{i_1} + (1 - \beta_2)^T \cdot C'_{i_2} \end{cases} \quad (6)$$

变异操作:首先生成取值在  $(0, 1)$  间的  $10 \times 6$  维度的随机向量  $T_{ij}$ , 对其进行放大、偏移计算, 得到  $T'_{ij}$ 。再从种群  $C''$  随机挑选 10 行向量, 用  $T'_{ij}$  代替原向量, 得到种群  $C^1$ , 计算过程如式(7)所示:

$$\begin{cases} T'_{ij} = 2\pi T_{ij} + 2\pi \\ C''_{pj} = T'_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

其中, 下标  $p$  表示随机挑选某一行向量。

Step4:由式(4)计算种群  $C^1$  中每个粒子  $C_i^1$  的适应度  $\varepsilon_i^1$  并组成种群  $C^1$  的适应度  $\varepsilon^1$ , 对  $\varepsilon^1$  取最小值得到该种群最优粒子对应的适应度  $\varepsilon_{a1}$ , 将其保存到集合  $M$  中, 集合  $M$  是每次迭代后种群中最优粒子对应的适应度所组成的集合。返回 Step2 继续迭代。

Step5:迭代若干次后, 使用 matlab 将集合  $M$  中的值画成适应度曲线, 观察其是否收敛。若不收敛返回 Step2 继续迭代, 若收敛则计算最终迭代那一次种群的适应度  $\varepsilon^N$  (假设第  $N$  次迭代适应度曲线收敛), 并对  $\varepsilon^N$  取最小值计算其最优粒子对应的适应度  $\varepsilon_a^N$ , 并返回该适应度  $\varepsilon_a^N$  对应的最优粒子  $C_a^N$ 。

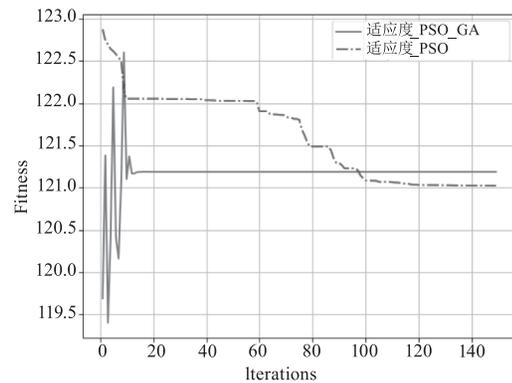
利用 PSO\_GA 算法得到最佳的 6 个  $C(\lambda)$  列于表 1。

表 1 各个波长对应的最优的优化因子  $C(\lambda)$

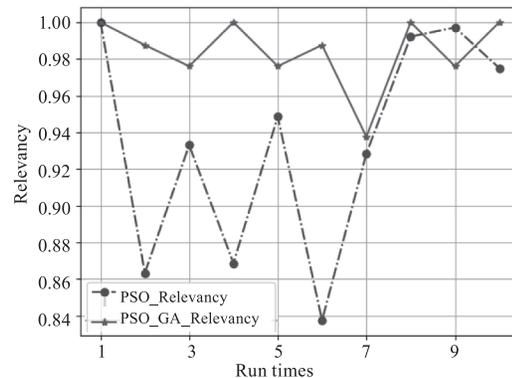
Tab. 1 The optimal optimization factors corresponding to each wavelength  $C(\lambda)$

| Wavelength /nm | $C(\lambda)$ |
|----------------|--------------|
| 1000           | 0.4764       |
| 1050           | 0.6698       |
| 1100           | 2.62         |
| 1150           | 4.434        |
| 1200           | 4.718        |
| 1250           | 5.116        |

同时, 考察本文提出的 PSO\_GA 算法和传统 PSO 算法的性能, 结果如图 3 所示。



(a) 两种算法均迭代200次所得的适应度收敛曲线图



(b) 10次蒙特-卡罗实验结果, 第一次与之后每次的最优解相关度变化曲线

图 3 PSO 以及 PSO\_GA 寻找最优  $C(\lambda)$  的性能对比图

Fig. 3 PSO and PSO\_GA performance comparison chart for finding the optimal  $C(\lambda)$

其中, 图 3(a) 绘制了两种算法优化下, 适应度

值的下降曲线。可以看出:要使适应度趋于稳定, PSO\_GA 算法所需的迭代次数要小于 PSO 算法, 这表明 PSO\_GA 算法的收敛性更好。图 3(b) 则是 10 次蒙特-卡罗实验结果, 两种算法分别运行得到最优解, 计算第 1 次的最优解与之后每次的最优解的相关度, 并画出折线图。通过比较可以看出: PSO\_GA 算法每次运行结果的相关度起伏较小(实线型), 而 PSO 算法每次运行结果的相关度起伏剧烈(虚线型), 这表明 PSO\_GA 算法的稳定性更好。

5 实验验证

5.1 根据得到的最佳  $C(\lambda)$  利用 FDTD 构建超透镜

首先将得到的各个波长最优  $C(\lambda)$  带入式(3) 得到超透镜中每个位置对应的最佳相位  $\phi_{\text{lens}}(R, \lambda)$ 。

其次, 让超透镜每个位置的最佳相位  $\phi_{\text{lens}}(R, \lambda)$  分别与相位数据库  $\phi[r, \lambda]$  中的值做差, 从相位数据库  $\phi[r, \lambda]$  中找到与各个位置最佳相位  $\phi_{\text{lens}}(R, \lambda)$  最接近的那个相位值, 其中二者之间的最大误差为构建相位数据库时单元结构纳米柱半径增大步长的一半, 即  $\Delta r/2 = 0.0004 \mu\text{m}$ 。根据  $\phi[r, \lambda]$  中相位与单元结构半径的对应关系, 找到每个位置最优的单元结构。

最后根据选择好的单元结构使用数值仿真软件 FDTD 构建超透镜, 本文构建的是直径为  $23.3 \mu\text{m}$  的圆形超透镜, 其中超透镜的每条直径上分布着 40 个微单元结构, 构建结果如图 4 所示。

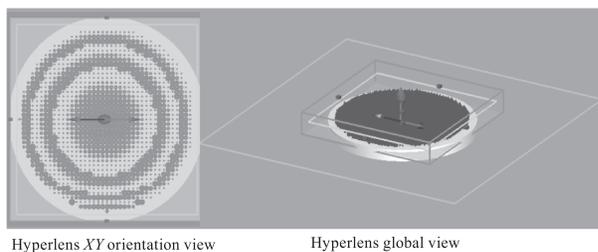


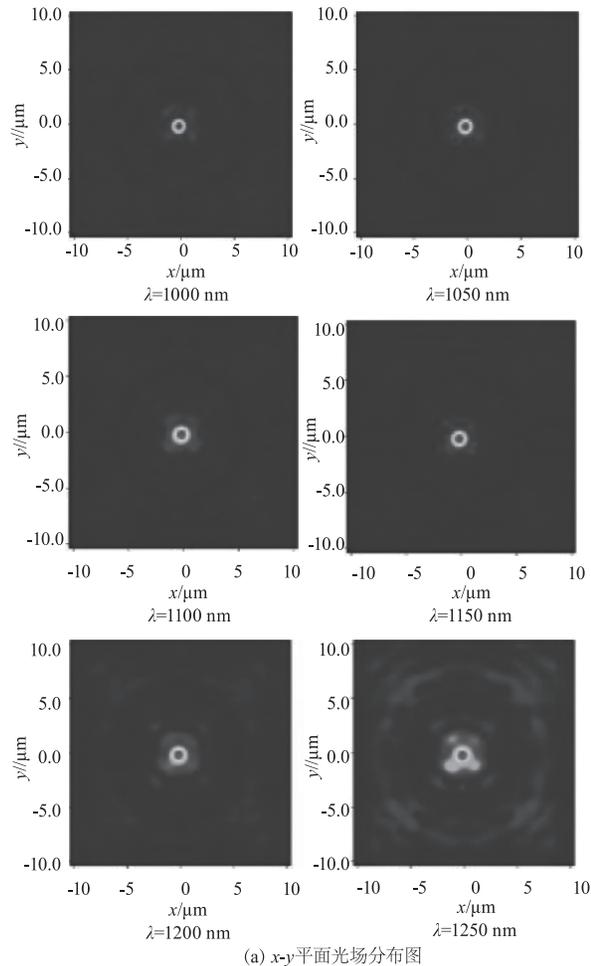
图 4 微单元阵列构建的超透镜

Fig. 4 Metalenses constructed from microcell arrays

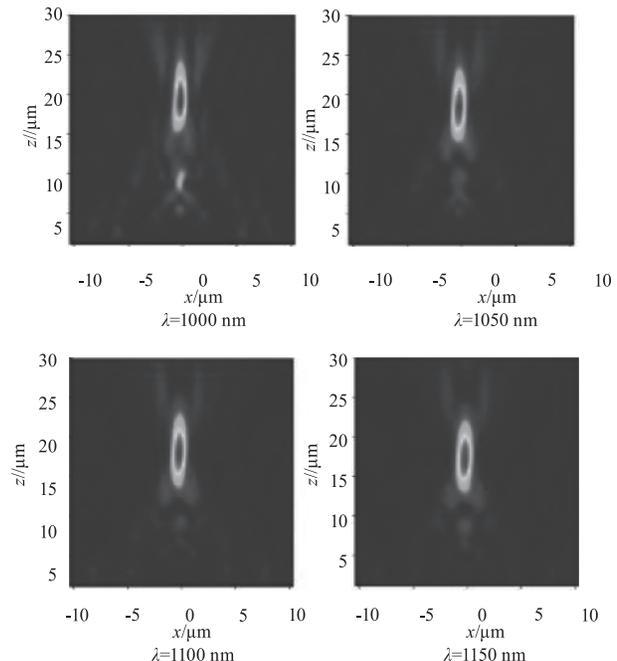
5.2 验证超透镜是否满足消色差需求

超透镜构建完成之后, 在数值仿真软件 FDTD 中分别使用波长为 1000 nm, 1050 nm, 1100 nm, 1150 nm, 1200 nm, 1250 nm 的平面波照射超透镜, 计算获得焦平面处的远场光强度分布, 如图 5 所示。其中, 超透镜位于  $z=0$  处, 图 5(b) 是每个波长下,  $x-z$  平面内的光场强度分布图, 可以看出每个波长对应的焦距都在  $20 \mu\text{m}$  附近; 图 5(a) 是每个波长下,  $z =$

$20 \mu\text{m}$  距离处  $x-y$  平面的光场分布图, 可以看出  $\lambda = (1000 \sim 1150 \text{ nm})$  的爱里斑能量都比较集中, 聚焦效果较好, 而随着波长的增大, 即  $\lambda = (1200 \sim 1250 \text{ nm})$  的爱里斑弥散, 表明出现色差。



(a)  $x-y$  平面光场分布图



(b)  $x-z$  平面光场强度分布图

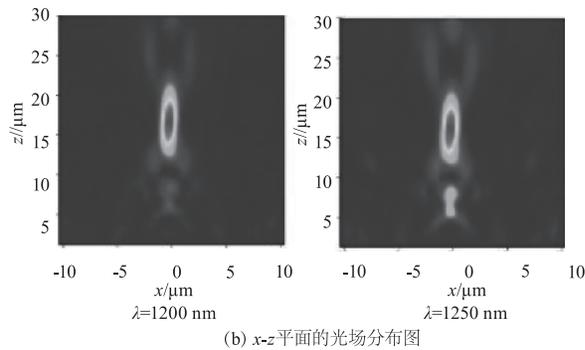


图 5 不同波长通过超透镜后的平面光场分布图

Fig. 5 Planar light field distribution diagram after different wavelengths pass through the metalens

### 5.3 定量的评估与对比

为定量评估宽带消色差透镜的聚焦性能,分别计算特征波长的衍射极限,并搜索图 4(b) 中的爱里斑的半峰宽度(FWHM),列于表 2。通过比较可以看出,二者具有较好的一致性,说明聚焦效果良好。

另外,表 2 还列出了利用 PSO 算法得到的 FWHM。通过计算得出利用 PSO 算法得到的 FWHM 与衍射极限的最大误差  $err_{max1} = 0.581$ , 利用 PSO\_GA 算法得到的 FWHM 与衍射极限的最大误差  $err_{max2} = 0.259$ 。通过比较可以看出利用 PSO\_GA 算法得到的 FWHM 与衍射极限的最大误差较小,说明利用 PSO\_GA 算法得到超透镜聚焦效果更好。

表 2 理论衍射极限与优化设计所得超透镜爱里斑直径比较

Tab. 2 Comparison of the theoretical diffraction limit and the diameter of the Airy spot obtained by the optimized design of the superlens

| Wavelength /nm | Diffraction limit      | FWHM( PSO)             | FWHM( PSO_GA)          |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1000           | $0.86 \times 10^{-6}$  | $1.096 \times 10^{-6}$ | $0.896 \times 10^{-6}$ |
| 1050           | $0.903 \times 10^{-6}$ | $1.136 \times 10^{-6}$ | $1.024 \times 10^{-6}$ |
| 1100           | $0.946 \times 10^{-6}$ | $1.152 \times 10^{-6}$ | $1.024 \times 10^{-6}$ |
| 1150           | $0.989 \times 10^{-6}$ | $1.372 \times 10^{-6}$ | $1.224 \times 10^{-6}$ |
| 1200           | $1.032 \times 10^{-6}$ | $1.476 \times 10^{-6}$ | $1.327 \times 10^{-6}$ |
| 1250           | $1.075 \times 10^{-6}$ | $1.656 \times 10^{-6}$ | $1.316 \times 10^{-6}$ |

## 6 总结

本文设计了以二氧化硅为基底的硅纳米柱单元结构,首先通过改变其半径来获取不同半径对应的不同相位构建相位数据库,然后通过 PSO\_GA 算法找到每个波长最优的  $C(\lambda)$ , 并根据  $C(\lambda)$  从相位数据库中找到超透镜每个位置最佳的单元结构,最后

在 FDTD 上构建超透镜,此透镜对 1000 ~ 1250 nm 波长范围光波聚焦效果,最大焦深差  $< 3 \mu\text{m}$ ,最大焦斑半径差  $< 1 \mu\text{m}$ ,说明具有良好的聚焦效果。本文所使用的 PSO\_GA 算法相对于传统的 PSO 算法具有更快的收敛速度以及更高的稳定性,另外利用 PSO\_GA 算法构建的超透镜相较于利用 PSO 算法构建的超透镜在聚焦效果以及光斑质量上也具有明显的改善。

## 参考文献:

- [1] Yu N, 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.
- [2] Xiao Bo, Yin, Junsuk, et al. Photonic spin hall effect at metasurfaces[J]. Science, 2013, 339: 1405 - 1407.
- [3] Xingjie N, Zi Jing W, Michael M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. Science, 2015, 349(6254): 1310 - 1314.
- [4] Dou K, Xie X, Pu M, et al. Off-axis multi-wavelength dispersion controlling metalens for multi-color imaging[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(4): 7.
- [5] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 85 - 96.
- [6] Li Y, Li X, Pu M B, et al. Achromatic flat optical components via compensation between structure and material dispersions[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 19885.
- [7] Yan C, Li X, Pu M, et al. Midinfrared real-time polarization imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(16): 161904. 1 - 161904. 5.
- [8] Zhao Z, Pu M, Gao H, et al. Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition[J]. Scientific Reports, 2015, 5(13): 15781.
- [9] None. Findings in the area of nanophotonics reported from Huazhong university of science and technology (polarization-insensitive and achromatic metalens at ultraviolet wavelengths)[J]. Nanotechnology Weekly, 2019.
- [10] Chen Yufeng, Huang Lingling, Liu Bingyi, et al. Broadband achromatic metalens and meta-deflector based on integrated metasurface[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(2).
- [11] An Xipeng. Broadband achromatic metalens design based on deep learning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021. (in Chinese)

安希鹏. 基于深度学习的宽谱消色差超透镜设计研究

- [D] 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [12] M Khorasanineja, Z, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1819 – 1824.
- [13] Shen Yijia, Xie Xin, Pu Mingbo, et al. Achromatic metalens based on coordinative modulation of propagation phase and geometric phase [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2020, 47(10): 10 – 118. (in Chinese).  
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): 110 – 118.
- [14] Fitas Ricardo, das Neves Carneiro Gonçalo, Conceição António Carlos. An elitist multi-objective particle swarm optimization algorithm for composite structures design [J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116158.
- [15] Liu Xu, Li Zhenhao, Xu Peng, et al. Joint optimization for bandwidth utilization and delay based on particle swarm optimization [J]. *IEEE ACCESS*, 2021, 9: 92125 – 92133.
- [16] Rehman Atiq Ur, Islam Ashhadul, Belhaouari Samir Brahim. Multi-cluster jumping particle swarm optimization for fast convergence [J]. *IEEE ACCESS*, 2020, 8: 189382 – 189394.
- [17] Liu Tianwei, Bai Jiangbo, Fantuzzi Nicholas, et al. Multi-objective optimisation designs for thin-walled deployable composite hinges using surrogate models and genetic algorithms [J]. *Composite Structures*, 2022, 280: 114757.
- [18] García-Carrillo Miguel, Espinoza-Martínez Adriana B., Ramos-de Valle Luis F., et al. Simultaneous optimization of thermal and electrical conductivity of high density polyethylene-carbon particle composites by artificial neural networks and multi-objective genetic algorithm [J]. *Computational Materials Science*, 2022, 201: 110956.
- [19] Kanwal S, Wen J, Yu B, et al. High-efficiency, broadband, near diffraction-limited, dielectric metalens in ultraviolet spectrum [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(3).
- [20] Harish Garg. A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2016, 274: 292 – 305.