

## 超分辨波长调控变焦超透镜

黄宝泽<sup>1</sup>, 赵芬<sup>1,2\*</sup>, 刘钦晓<sup>1</sup>, 杨俊波<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>重庆理工大学两江人工智能学院, 重庆 401135;<sup>2</sup>国防科技大学理学院物质与材料科学实验中心, 湖南 长沙 410073

**摘要** 提出了一种超分辨波长调控变焦超透镜的设计方法,同时对相位、色散、振幅进行调控,在提升超透镜轴向变焦能力的基础上,采用分层粒子群优化(HPSO)算法不断压缩超透镜的点扩散函数,使超透镜的半峰全宽(FWHM)不断逼近甚至小于衍射极限 $0.5\lambda/NA$ ( $NA$ 为数值孔径)。作为理论验证,设计了一种工作在 $68\sim 80\ \mu\text{m}$ 波长范围内的超分辨波长调控变焦超透镜。仿真结果表明,其轴向变焦能力约为常规衍射超透镜的1.52倍,在 $73\sim 78\ \mu\text{m}$ 波长范围内的横向分辨率小于衍射极限。

**关键词** 光学设计; 超透镜; 波长调控光学变焦; 振幅调控; 分层粒子群优化算法; 超分辨

**中图分类号** O436

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231310

## 1 引言

在当今信息多元化的时代,图像仍然是获取和存储信息最有效的方式之一。然而,图像的质量受限于光学成像系统,如照相机、望远镜、光学显微镜和手机镜头等。在光学成像系统中,由于色散引起的色差通常会降低系统成像质量<sup>[1-5]</sup>,这是目前亟待解决的重要问题,因此大量研究人员使用各种方法来消除器件及系统中的色差<sup>[6-11]</sup>。但是色差在某些特定领域具有实用价值<sup>[12-13]</sup>,例如利用色差实现波长调控光学变焦,从而使变焦系统不再需要机械地移动部件,仅通过改变入射波长就可实现快速连续、可重复变焦,不仅有效提高了光学系统的探测效率,还促进了光学变焦系统往集成化、微型化方向发展。

光学超表面可以对光波的振幅<sup>[14-15]</sup>、相位<sup>[16]</sup>和偏振<sup>[17]</sup>进行灵活调控,为解决当前变焦系统面临的轻量化、集成化和快速变焦等关键问题提供了新的技术途径<sup>[18-20]</sup>。已有研究团队利用动态可调超透镜改良了传统变焦系统<sup>[21]</sup>,主要包括基于机械变形或位移的变焦技术、基于偏振调控的变焦技术和基于可重构材料的变焦技术。基于位移的变焦方法需要借助微机电系统进行控制<sup>[22]</sup>,调控精度欠缺且协同一致性差;基于入射光偏振态切换进行变焦的方法一般采用多层结构来实现<sup>[23]</sup>,聚焦效率低且加工难度大;基于相变材料进行变焦的方法依赖晶态和非晶态之间的相互转换<sup>[24]</sup>,系统在

在易失性且可重复性不理想;利用向列型液晶和超透镜配合进行变焦的方法需要外加电控制<sup>[25]</sup>,且系统的紧凑性和微型化有所降低。与折射型器件相比,超表面器件和常规衍射型光学元件的色散恰好相反,且波长依赖性更加突出<sup>[26]</sup>。通过改变亚波长结构的几何参数及空间排列方式可以调节器件的色散性能,既可以在一定程度上消除由色散引入的色差,也可以进一步增加器件的色差。因此,本文利用超透镜的强色散特性,通过色散调控进一步提升超透镜的轴向色散能力。

前期研究工作主要在消色差调控的基础上,通过类似于中心挡光设计的振幅调控实现了宽带消色差超分辨聚焦<sup>[27]</sup>。本文进一步研究振幅调控的作用,在提升超透镜轴向色散能力的基础上,对器件的点扩散函数进行压缩,以突破衍射极限的制约,进而实现超分辨波长调控光学变焦。在 $68\sim 80\ \mu\text{m}$ 波长范围内,设定超透镜焦距与光波角频率的平方成正比关系,将满足色散条件的结构排布在超透镜的环带区域内,以完成变焦设计。由于满足特定群延迟(Group delay, GD)、群延迟色散(Group delay dispersion, GDD)的结构具有不同的振幅,本文利用分层粒子群优化(HPSO)算法对每个环带的振幅进行优化,进而使超透镜在 $73\sim 78\ \mu\text{m}$ 波长范围内的聚焦光斑尺寸小于衍射极限。

## 2 超分辨波长调控光学变焦方法

光学变焦在相干层析等领域具有重要的应用价

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2023-08-18; 录用日期: 2023-08-30; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0706005)、国家自然科学基金(12272407, 60907003, 61805278, 62275269, 62275271)、重庆理工大学引进人才科研启动项目(0121210528)

通信作者: \*ZhaoF@cqut.edu.cn; \*\*yangjunbo@nudt.edu.cn

值,波长调控光学变焦是一种无需机械移动的变焦方式,可通过切换不同的波长使入射光聚焦在预设焦平面,从而实现快速变焦的目的。为了使宽带内的入射光波在预设焦平面实现聚焦,超透镜在不同频率、不同径向位置处需要满足的目标相位分布为

$$\varphi(r, \omega) = -\frac{\omega}{c} \left( \sqrt{r^2 + f^2} - f \right), \quad (1)$$

式中:  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  是超透镜上任一点  $(x, y)$  到中心点的距离;  $c$  是光速;  $f$  是焦距;  $\omega$  是角频率。若  $f$  为固定

值,则所设计超透镜是消色差透镜。变焦超透镜需要根据实际情况设计焦距与角频率的依赖关系,设定焦距与角频率的关系为

$$f = f_0 / \omega_0^n \times \omega^n, \quad (2)$$

式中:  $f_0$  是中心波长对应的焦距;  $\omega_0$  是中心角频率。常规衍射超透镜的色散约束关系  $n=1$ 。为获得更强的变焦能力,在所提方法中设置色散约束关系  $n=2$ 。

为进行宽带色散调控,将式(1)以  $\omega_0$  为中心进行泰勒展开,可得

$$\begin{aligned} \varphi(r, \omega) = & \varphi(r, \omega_0) + \left. \frac{\partial \varphi(r, \omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0) + \left. \frac{\partial^2 \varphi(r, \omega)}{2\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \\ & \left. \frac{\partial^3 \varphi(r, \omega)}{6\partial \omega^3} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)^3 + o[(\omega - \omega_0)^3], \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\varphi(r, \omega_0)$  为中心角频率对应的相位,该相位不与宽带内变化的角频率直接相关,可通过几何相位(或 PB 相位)进行调控;  $\partial \varphi(r, \omega) / \partial \omega$ 、 $\partial^2 \varphi(r, \omega) / (2\partial \omega^2)$  和  $\partial^3 \varphi(r, \omega) / (6\partial \omega^3)$  分别是 GD、GDD 和三阶导数(Third order)项,这些色散项建立了相位延迟与角频率之间的映射关系,通过调节相位对角频率的各阶导数可以有效调节各个频率分量到达预设焦平面的时间,进而实现波长调控光学变焦。

根据色散约束关系[式(2)]设定目标焦距与角频率之间的映射关系,利用几何相位和色散相位调控使超透镜将工作带宽内的入射光波聚焦到预设焦平面上。非等间隔的同心环滤波器可以有效压缩超透镜的点扩散函数<sup>[28]</sup>,值得注意的是,所提出的超分辨变焦超透镜需要同时进行相位、色散和振幅调控,若在变焦设计的基础上再次采用相位调控对点扩散函数进行压缩,会破坏超透镜的聚焦性能和变焦能力。因此,在不影响超透镜相位调控和色散调控的基础上,所提方法采用 HPSO 算法优化超透镜的振幅,从而不断压缩变焦超透镜的点扩散函数,使变焦超透镜的半峰全宽(FWHM)不断逼近甚至小于衍射极限。由于采用商业软件 FDTD Simulation 进行全器件仿真所需的内存和时间消耗过大,所以在优化过程中利用矢量角谱衍射方法(VASM)<sup>[27,29-31]</sup>计算超透镜的远场响应。

设定超透镜的工作波长范围为 68~80  $\mu\text{m}$ , 中心波长  $\lambda_0$  为 74  $\mu\text{m}$ , 中心波长对应的焦距  $f_0$  为  $315\lambda_0$ , 根据式(1)~(3)计算得到超透镜的色散参数沿半径方向的分布,如图 1(a)所示,其中,  $R$  是单元结构在器件表面的径向位置。从图 1(a)中可以看出,三阶导数项相对于 GD 和 GDD,其数值范围约小一个量级,导数越高阶其值越小,即三阶乃至更高阶导数项对相位的级数展开结果贡献更小。因此,在后续结构匹配工作中,所提方法仅考虑 GD 和 GDD 对变焦调控的影响。

图 1(b)给出了组成器件的单元结构示意图,考虑加工深宽比和单元结构的振幅响应,选择结构高度

$H=65.7 \mu\text{m}$ , 周期  $P=46.4 \mu\text{m}$ , 长度  $L$  的取值范围为 8~44  $\mu\text{m}$ , 宽度  $W$  的取值范围为 7~43  $\mu\text{m}$ , 步长为 0.1  $\mu\text{m}$  或 0.2  $\mu\text{m}$ , 设置入射光源为左旋圆偏振光,波长范围为 68~80  $\mu\text{m}$ , 等间隔采样波长为  $\lambda_i$ ,  $i$  的取值为 1, 2, 3, ..., 37, 通过商业软件 FDTD Simulation 依次计算单元结构在宽带内的振幅和相位。对仿真的大量不同单元结构数据进行处理,以获得可以表征该结构色散能力的参数。基于最小二乘法原理,将单调处理后的相位作为角频率的函数进行 2 次多项式拟合,所获得函数的 2 次项和 1 次项系数分别为该结构的 GDD 和 GD。为了减小拟合误差,筛掉拟合精确度  $R^2$  值小于 0.98 的单元结构,以此创建单元结构数据库,大约有 3 万多个不同结构。图 1(c)给出了数据库中单元结构的 GD-GDD 数据点分布和组成超透镜所需的理论 GD-GDD 曲线。理论曲线与仿真获得的数据点覆盖范围存在差异,故将数据点进行平移处理,这种处理方式不会影响色散调控的效果。选择其中一个距原点较近的数据点(三角形)作为平移标准,其对应 GD 约为 2.744 ps, GDD 约为 0.277  $\text{ps}^2/\text{rad}$ , 然后将该点移动到原点,其余数据点以相同标准进行平移处理。

数据点经过平移处理后,开始进行色散调控。将所有数据点与理论 GD 和 GDD 进行数值匹配,设定合理的匹配误差,即理论色散参数与所匹配结构色散参数之间的误差,获取超透镜平面每个环带处的单元结构数据集合。为了方便描述,后续将此种结构集合,简称为“环带数据集”。图 2(a)给出进行色散调控获得相应环带数据集的具体方式。其中,  $T_{\text{GD},l}$  和  $T_{\text{GDD},l}$  分别代表第  $l$  环带对应的 GD 和 GDD 理论值,  $S_{\text{GD},\text{all}}$  和  $S_{\text{GDD},\text{all}}$  分别代表所有单元结构对应的 GD 和 GDD 仿真值,  $T_1$  和  $T_2$  分别代表 GD 和 GDD 的匹配误差。对于第  $l$  个环带 ( $l=1, 2, \dots, s$ ), 其中  $s$  为器件的环带数。若在数据库找不到合适的结构,即  $T_1$  和  $T_2$  不满足要求,则在匹配误差的基础上附加额外的叠加误差  $t_1$  和  $t_2$ , 以此不断更新  $T_1$  和  $T_2$ , 后续分析和讨论环节会给出具体数

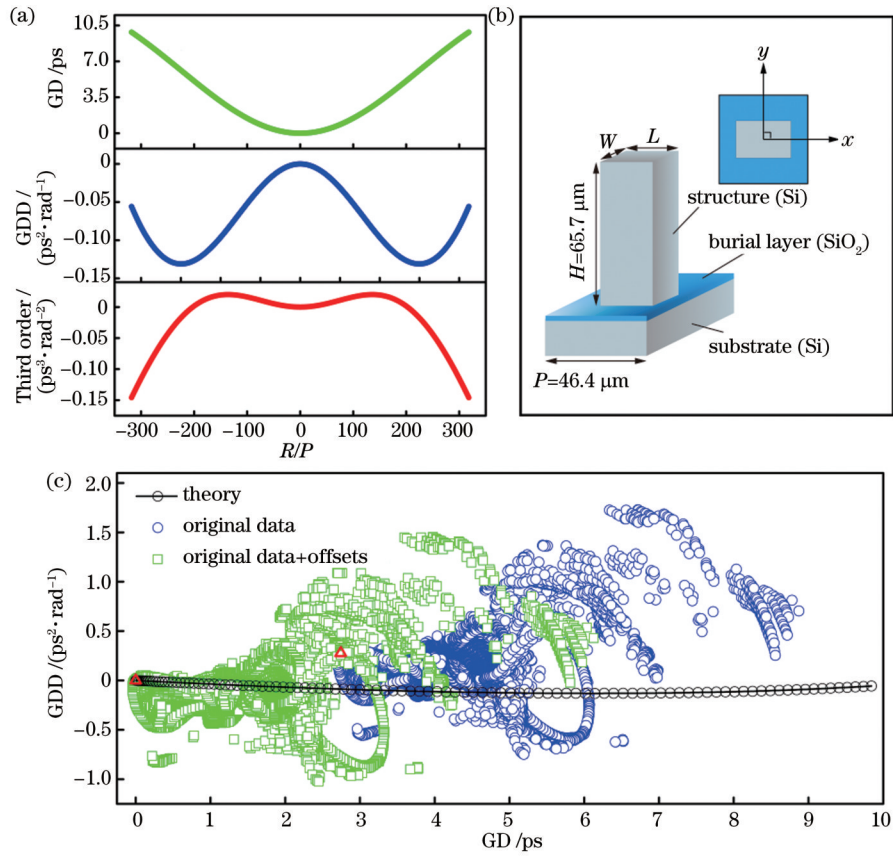


图 1 理论上的各阶导数值、结构示意图和数据库单元结构分布。(a)理论上的各阶导数值;(b)单元结构具体设计示意图;(c)数据库单元结构分布及平移处理情况

Fig. 1 Theoretical values of the derivative terms of each order, schematic diagram of the structure and distribution of unit structures in the database. (a) Theoretical values of the derivative terms of each order; (b) specific design diagram of unit structure; (c) distribution of unit structure and translation processing in the database

值。图 2(b)给出了环带的划分方式,以单元结构的周期  $P$  为间隔,从器件中心位置开始划分等大的方形框,根据各个方形框所处位置近似计算环带编号  $l$ ,然后从每个集合中选择相同的结构放入方形框,即为第  $l$  环带。

设定匹配误差后,在色散调控的同时创建环带数据集,每个环带数据集中的结构具有相近的色散调控能力和不同的振幅响应。在振幅调控过程中,为了使超透镜的变焦能力保持不变,基于该环带数据集,使用 VASM 进行仿真计算,同时采取 HPSO 算法优化超透镜的振幅。

首先,需要获得初始化粒子群。粒子个数设置为  $M$ ,每个粒子维度大小为器件的环带数  $s$ ,每个维度值代表相应环带单元结构在中心波长下的振幅,如图 2(b)所示。在每个环带数据集中随机选择单元结构,获得一个初始化器件环带粒子,振幅分布为  $A_{\text{band},0}$ ,依照该方式初始化  $M$  次,即获得初始化粒子群,振幅分布为  $A_{\text{allband},0}$ 。初始化粒子为

$$A_{\text{band},0,j} = \{A_{j_s}, A_{j_{(s-1)}}, \dots, A_{j_1}\}, j = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

在第  $k$  次迭代过程中,粒子每个环带更新速度为

$$v_{k,j} = \{v_{j_s}, v_{j_{(s-1)}}, \dots, v_{j_1}\}, j = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

在第  $k+1$  次迭代过程中,粒子每个维度对应速度与振幅按以下方式更新

$$v_{k+1,j} = \omega v_{k,j} + c_1 r_1 (A_{\text{band},k,j,\text{best}} - A_{\text{band},k,j}) + c_2 r_2 (A_{\text{allband},k,\text{best}} - A_{\text{band},k,j}), \quad (6)$$

$$A_{\text{band},k+1,j} = A_{\text{band},k,j} + v_{k+1,j}, \quad (7)$$

式中:  $A_{\text{band},k,j,\text{best}}$  是第  $k$  次迭代的第  $j$  个粒子历史最优振幅分布;  $A_{\text{allband},k,\text{best}}$  是第  $k$  次迭代的粒子群最优振幅分布;  $\omega$  是惯性权重系数;  $c_1, c_2$  是学习因子;  $r_1, r_2$  是  $[0, 1]$  之间的随机数。

迭代总次数为  $N$ ,惯性权重系数  $\omega$  随着迭代次数  $k$  的动态变化关系为

$$\omega = \omega_{\text{max}} - (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) / N^2 \cdot k^2. \quad (8)$$

基于确定的粒子分布,通过 VASM 计算目标场,从而获得相应聚焦光斑的有关参数,表达式为

$$x_{\text{FWHM},i} / \lambda_i = x_{\text{fwhm},i}, \quad (9)$$

$$NA_i = \sin \left[ \arctan \left( R_0 / f_i \right) \right], \quad (10)$$

式中:  $x_{\text{FWHM},i}$  是  $\lambda_i$  对应聚焦光斑的半峰全宽;  $x_{\text{fwhm},i}$  是对应聚焦光斑的半峰全宽处理值;  $NA_i$  是  $\lambda_i$  对应仿真焦



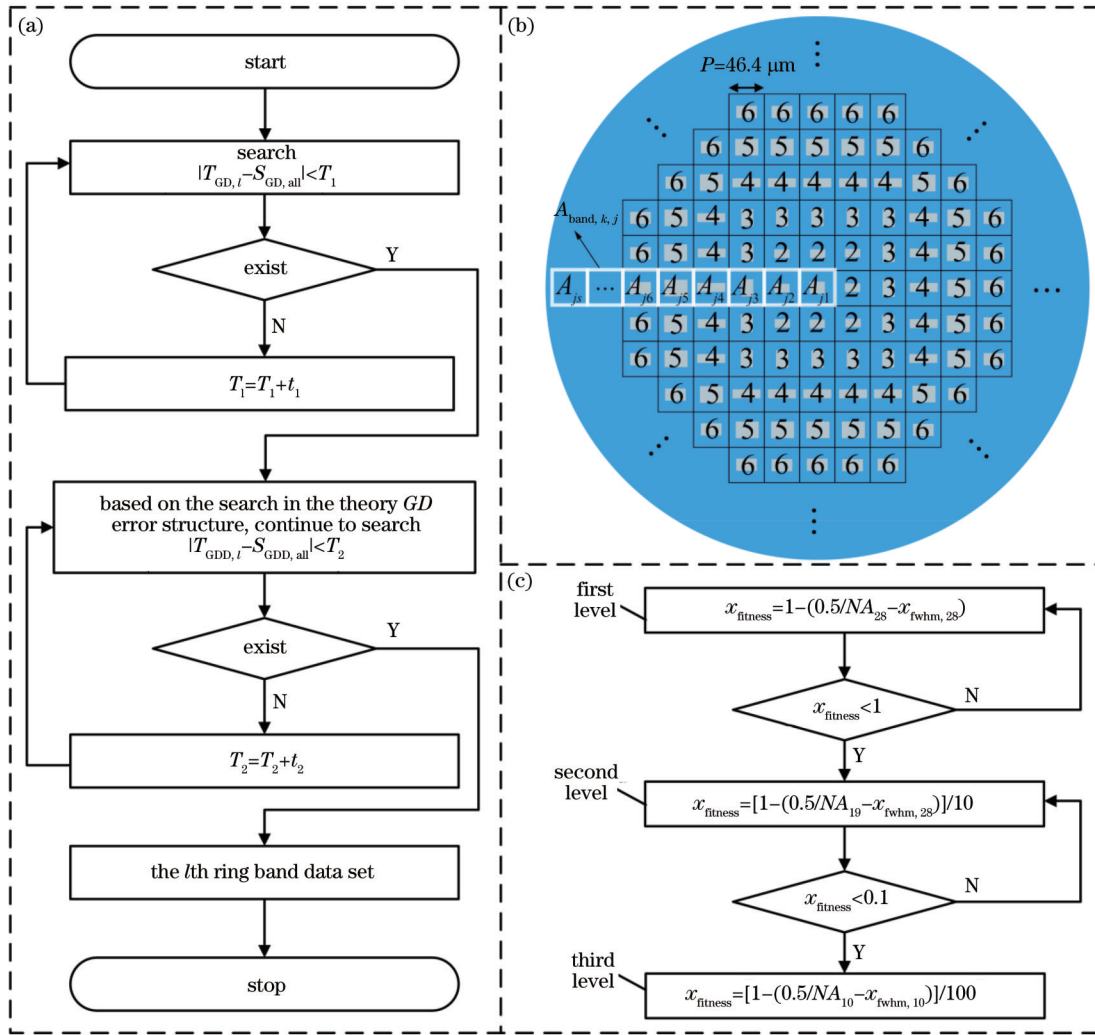


图2 环带匹配流程图、分布图和分层优化。(a)环带匹配和环带数据集划分流程图;(b)结构分布和粒子各维度取值示意图;(c)分层适应度函数设计

Fig. 2 Ring band matching flow chart, distribution chart and hierarchical optimization. (a) Flow chart for ring band matching and ring-band-dataset partitioning; (b) distribution of the structure and schematic diagram of the values taken for each dimension of the particle; (c) hierarchical fitness function design

距  $f_i$  下的数值孔径,其随着每次迭代过程中仿真焦距  $f_i$  的动态变化而变化;  $R_0$  是器件半径,由选定的器件环带数  $s$  确定。其中,  $i$  的取值为 28、19、10,其波长分别为 77、74、71  $\mu\text{m}$ 。

根据聚焦光斑的有关参数,分层适应度函数设计如图 2(c) 所示,开始时,优化处于第一层,适应度值  $x_{fitness}$  随着长波  $\lambda_{28}$  对应的半峰全宽减小而减小,直至  $x_{fitness}$  小于 1 时,长波  $\lambda_{28}$  对应聚焦光斑突破衍射极限,优化过程随即跳到第二层,对中心波长  $\lambda_{19}$  对应的半峰全宽进行优化;当适应度值  $x_{fitness}$  小于 0.1 时,中心波长  $\lambda_{19}$  对应聚焦光斑突破衍射极限,优化随即来到第三层,对短波  $\lambda_{10}$  对应的半峰全宽进行优化;直至  $x_{fitness}$  小于 0.01 时,三个波长对应聚焦光斑皆突破衍射极限,优化随即结束。在优化过程中,随着目标波长对应聚焦光斑尺寸的不断压缩,相邻的波长对应聚焦光斑尺寸也会得到不同程度的压缩。

优化开始时,在环带数据集中随机选择单元结构的振幅作为初始化粒子的振幅,但由于环带数据集中单元结构的振幅是离散的,粒子在每次迭代更新后,其每个维度对应振幅在相应环带数据集中不存在,所以无法依据此振幅找到相应环带单元结构以组成器件并进行仿真计算。因此,将该振幅转换为环带数据集中与之最接近的仿真振幅,其中,将仿真振幅对应单元结构作为相应环带结构组成器件,操作如图 3(a) 所示。注意,这里转换后的振幅与粒子振幅是一一对应关系,同时将粒子振幅更新为转换后的振幅,继续参与下一次迭代更新。综上,整个 HPSO 流程,如图 3(b) 所示。

整体设计流程如图 4 所示,首先设置色散约束关系  $n=2$  [式(2)],然后创建单元结构数据库,通过色散调控创建环带数据集,在数据集中随机选择环带结构组成变焦超透镜。为了进一步压缩聚焦光斑尺寸,在

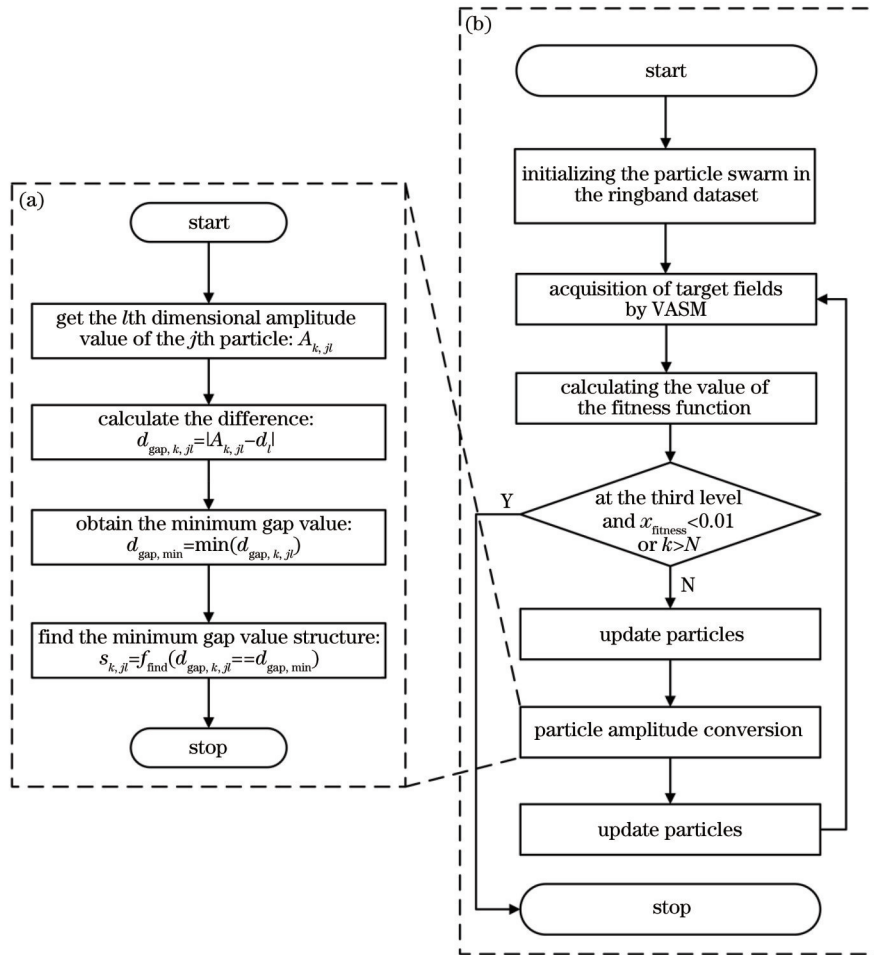


图 3 各优化环节流程图。(a)振幅转换方式流程图;(b)HPSO 总体流程图

Fig. 3 Flow chart for each optimization step. (a) Flow chart of the amplitude conversion method; (b) overall flow chart of HPSO

振幅调控过程中,基于该环带数据集,使用 VASM 进行仿真计算,同时采取 HPSO 算法优化超透镜的振

幅。最终经过优化后,可得到超分辨率波长调控变焦超透镜,并对该超透镜产生的变焦结果进行分析。

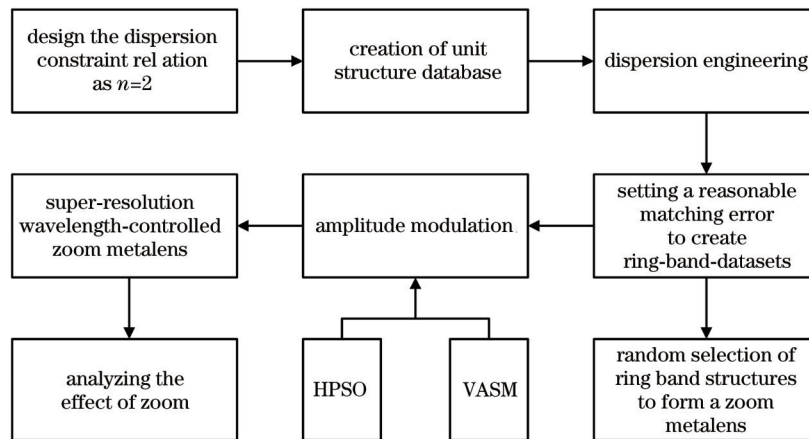


图 4 超分辨率波长调控变焦超透镜的整体设计流程

Fig. 4 Overall design flow of super-resolution wavelength-controlled zoom metalens

### 3 分析与讨论

根据上述获取环带数据集的方式,为了平衡色散匹配误差对聚焦效果和环带数据集容量的影响,匹配

误差需要经过反复调试,既不能过大,也不能过小。误差过大会使超透镜的变焦范围大幅缩小;误差过小会使生成的环带数据集数据量锐减,而且会将大量振幅较高的单元结构筛掉,削弱振幅调控的效果,难以压缩

聚焦光斑的尺寸,进而无法突破衍射极限的制约。基于上述考虑,经过多次调试和验证,分别设置 GD 和 GDD 的初始匹配误差  $T_1=0.1$  和  $T_2=0.5$ , GD 和 GDD 的初始叠加误差  $t_1$  和  $t_2$  均为 0.001,最终得到每个环带的匹配误差,如图 5(a)所示。图 5(b)给出了每个环带数据集中所含单元结构在中心波长  $\lambda_{19}$  下的振幅分布,其中,  $R_{\text{band}}$  表示环带在器件表面的径向位置。由图 5 可知,考虑 GD 和 GDD 匹配误差对色散调控的影响,同时考虑在优化过程中有更多可选的结构用于振幅调控,在器件尺寸不减小的情况下,所提方法选取环带数  $s=156$  来设计超分辨变焦超透镜。

根据创建的环带数据集和划分的环带数,在 156 个环带数据集中随机选择 1 个单元结构放在环带中,进行 3 次随机操作得到 3 个不同的超透镜。超透镜的焦距、半峰全宽和聚焦光斑强度通过 VASM 计算获得,三者随波长变化的曲线如图 6 所示,其中波长为  $\lambda_i$ ,  $i$  的取值分别为 1, 2, 3, ..., 37。图 6(a)~(c)表明所设计变焦超透镜的仿真变焦能力接近理论设计 ( $n=2$ ), 其变焦能力相较于相同口径的常规衍射超透镜有较大的提升。其中,常规衍射超透镜的色散规律与色散约束关系  $n=1$  的理论聚焦情况一致<sup>[4]</sup>。同时,图 6(g)~(i)给出了 3 个超透镜的聚焦光斑强度归一化值随波长变化的曲线,光斑强度随波长增加而增大,在 73~75  $\mu\text{m}$  波长范围内,超透镜的聚焦强度出现明显差异。由图 6(a)~(f)可知,所设计的超透镜在不同波长下的仿真焦距基本满足设定要求,但对应的半峰全

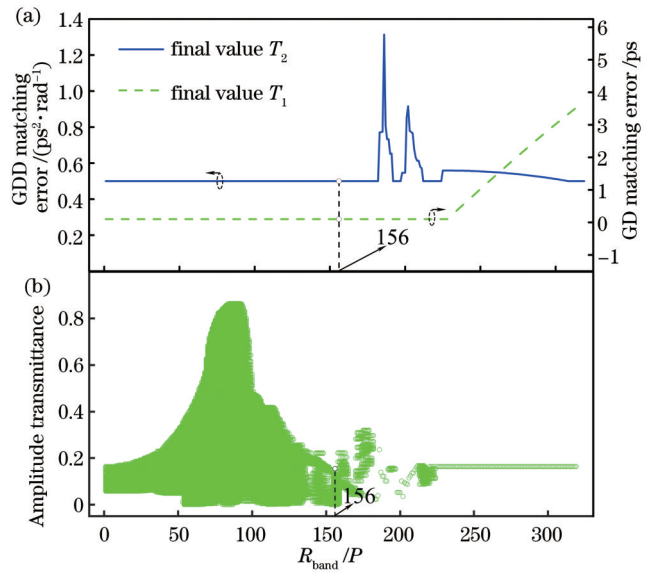


图 5 GD 和 GDD 匹配情况与环带结构振幅分布。(a) GD 和 GDD 匹配误差;(b)各环带结构振幅分布  
Fig. 5 GD and GDD matching situation and ring band structures amplitude distribution. (a) GD and GDD matching error; (b) amplitude distribution of each ring band structure

宽均无法突破衍射极限的制约。

由于各个环带数据集的结构具有相近的色散调控能力和不同的振幅,如第 89 环带数据集中有 7500 多个不同的单元结构[图 5(b)],如果全部遍历每个环带数据集中的单元结构,再设计出超分辨变焦超透镜,需

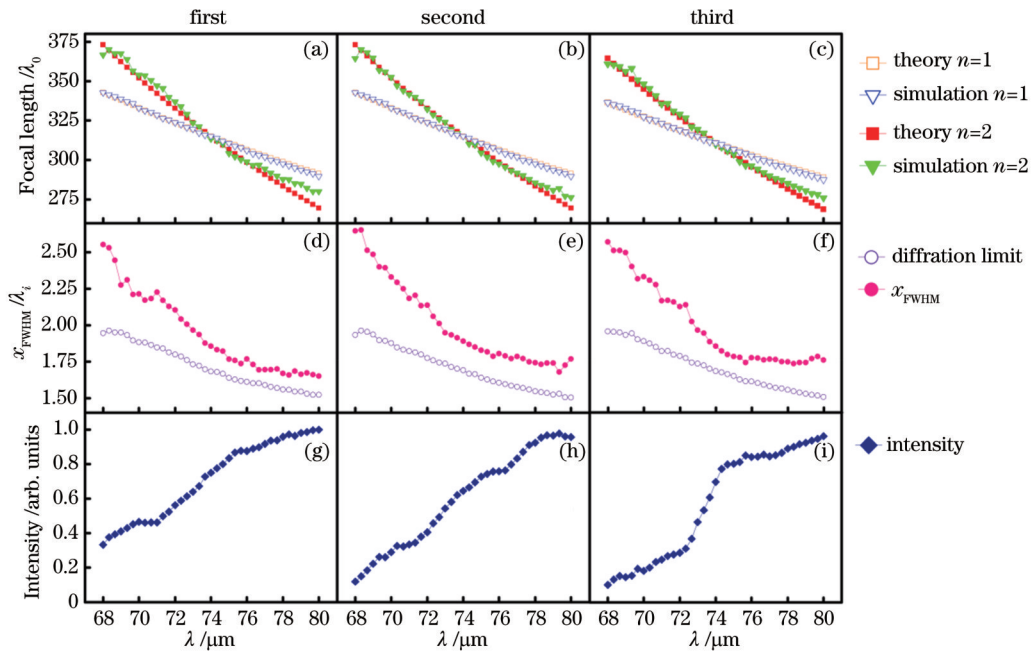


图 6 基于 VASM 获得的 3 次随机选择环带结构组成的超透镜随波长变化的焦距、半峰全宽和聚焦光斑强度曲线图。(a)~(c)焦距曲线图;(d)~(f)半峰全宽曲线图;(g)~(i)聚焦光斑强度归一化曲线图

Fig. 6 Curves of focal length, FWHM and focused spot intensity normalization with wavelength of metalenses composed of three times randomly selected ring band structures obtained with VASM. (a)~(c) Curves of focal length;(d)~(f) curves of FWHM;(g)~(i) curves of focused spot intensity normalization

要进行大量的计算,这种操作笨拙且不易实现。因此,为了快速实现目的,采取 HPSO 算法和 VASM 对超透镜的振幅进行调控,不断压缩各个波长对应的聚焦光斑尺寸,直至突破衍射极限。其中,HPSO 算法采用超参数设计:粒子个数  $M$  为 5,粒子维度  $s$  即环带数为 156,初始速度  $v_0$  为  $-0.001 \sim 0.001$  范围内的随机生成数,每次迭代更新速度范围设置为  $-0.01 \sim 0.01$ ,粒子每个维度值更新范围为相应环带数据集中振幅最小值  $A_{\min}$  到最大值  $A_{\max}$  之间,惯性权重系数  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别设为 0.9 和 0.4,迭代总次数  $N$  设为 100,学习因子  $c_1$  和  $c_2$  分别设为 2 和 3。

图 7 给出优化过程中对应的各参数随迭代次数变

化的曲线。按照以上相关超参数设置进行迭代优化,经过 100 次迭代,相应适应度值不断下降,如图 7(a) 所示,其中,迭代优化每层对应波长为  $\lambda_i$ ,  $i$  取值为 28、19、10。由图 7 可知,HPSO 算法在优化和实现第一层目标后 ( $x_{\text{fwhm},28} < 0.5/NA_{28}$ ),接着去优化和实现第二层目标 ( $x_{\text{fwhm},19} < 0.5/NA_{19}$ ),继而再去优化第三层目标 ( $x_{\text{fwhm},10} < 0.5/NA_{10}$ )。然而,由于器件中心和边缘环带的可选单元结构数量有限,且振幅调控范围较小,当优化进行到第三层时,虽然  $x_{\text{fwhm},10}$  可以不断逼近衍射极限,但是缺少足够适配的结构,以致于后面的优化进程陷入了停滞。图 7(b)~(d) 分别给出基于 VASM 获得的半峰全宽、焦距和强度随迭代次数变化的曲线。

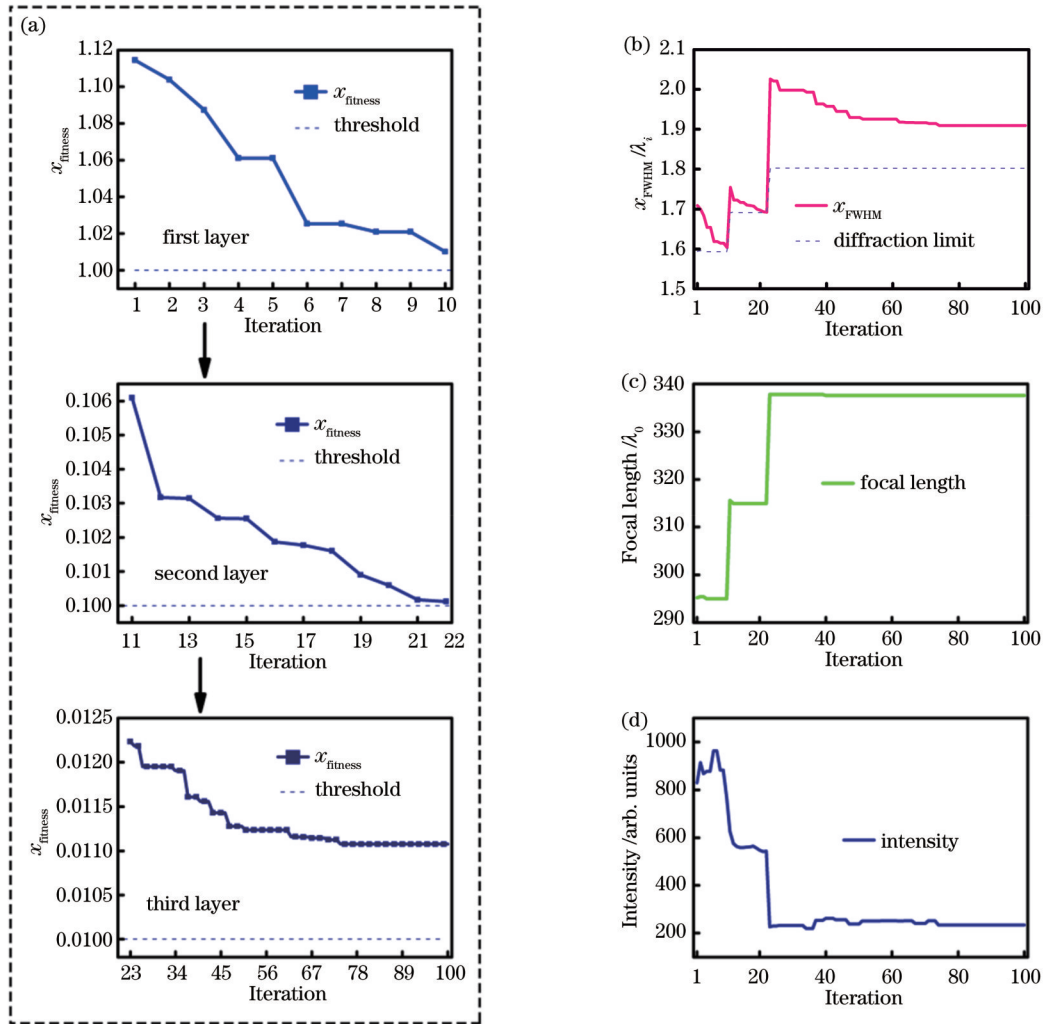


图 7 基于 VASM 获得的超透镜随迭代次数变化的分层适应度、半峰全宽、衍射极限、焦距和聚焦光斑强度归一化曲线图。(a) 分层适应度曲线图;(b) 半峰全宽和衍射极限曲线图;(c) 焦距曲线图;(d) 聚焦光斑强度归一化曲线图

Fig. 7 Curves of hierarchica fitness, FWHM, focal length and focused spot intensity normalization with iterative optimization of metalenses obtained with VASM. (a) Curves of hierarchical fitness; (b) curves of FWHM and diffraction limit profile; (c) curve of focal length; (d) curve of focused spot intensity normalization

图 8 给出了基于 VASM 计算的超透镜优化结果。如图 8(a)~(b) 所示,在工作波长范围内,变焦超透镜的焦距变化情况基本满足设定的变焦要求,对应变焦范围约为  $80.6 \mu\text{m}$ ,常规衍射超透镜的变焦范围约为

$53 \mu\text{m}$ ,即变焦超透镜的变焦能力约为常规衍射超透镜的 1.52 倍。常规衍射超透镜虽然在宽带内的半峰全宽接近衍射极限,然而对应的聚焦光斑无一突破衍射极限,在同等的宽带内,变焦超透镜经过优化后,



$\lambda_{16} \sim \lambda_{31}$  (即  $73 \sim 78 \mu\text{m}$ ) 对应的聚焦光斑基本实现超分辨, 其中, 在图 8(b) 中为了区分曲线,  $n=1$  对应半峰全宽整体向上平移 1 个  $\lambda_i$ , 在  $69 \mu\text{m}$  附近衍射极限有明显突起, 这是对应仿真焦距突增导致数值孔径  $NA$  变小引起的。由于衍射极限是按照超透镜在某个波长下的具体数据计算的, 因此, 衍射极限在整体上没有呈现出单调变化趋势。虽然其余波长仍然没有突破衍射极限, 但相比随机生成的器件排列方式, 通过振幅调控可使变焦超透镜的聚焦光斑得到有效压缩, 使其不断接近衍射极限。图 8(c) 给出了聚焦光斑强度归一化值

随波长变化的曲线。常规衍射超透镜的聚焦强度归一化值在宽带内保持在 0.6 以上, 没有持续的单调变化, 相比之下, 变焦超透镜的强度归一化值会随着波长的增加而不断增大。图 8(d) 给出变焦超透镜 ( $n=2$ ) 和常规衍射超透镜 ( $n=1$ ) 在传播面上的聚焦光斑强度分布, 其中虚线表示中心波长为  $74 \mu\text{m}$  对应的理论焦距  $315\lambda_0$ 。变焦超透镜对应的光斑分布范围大于常规衍射超透镜, 但在短波  $68 \sim 71 \mu\text{m}$  波长范围内出现较明显的旁瓣, 主要是由单元结构的拟合误差以及在色散匹配过程中存在的匹配误差引起的。

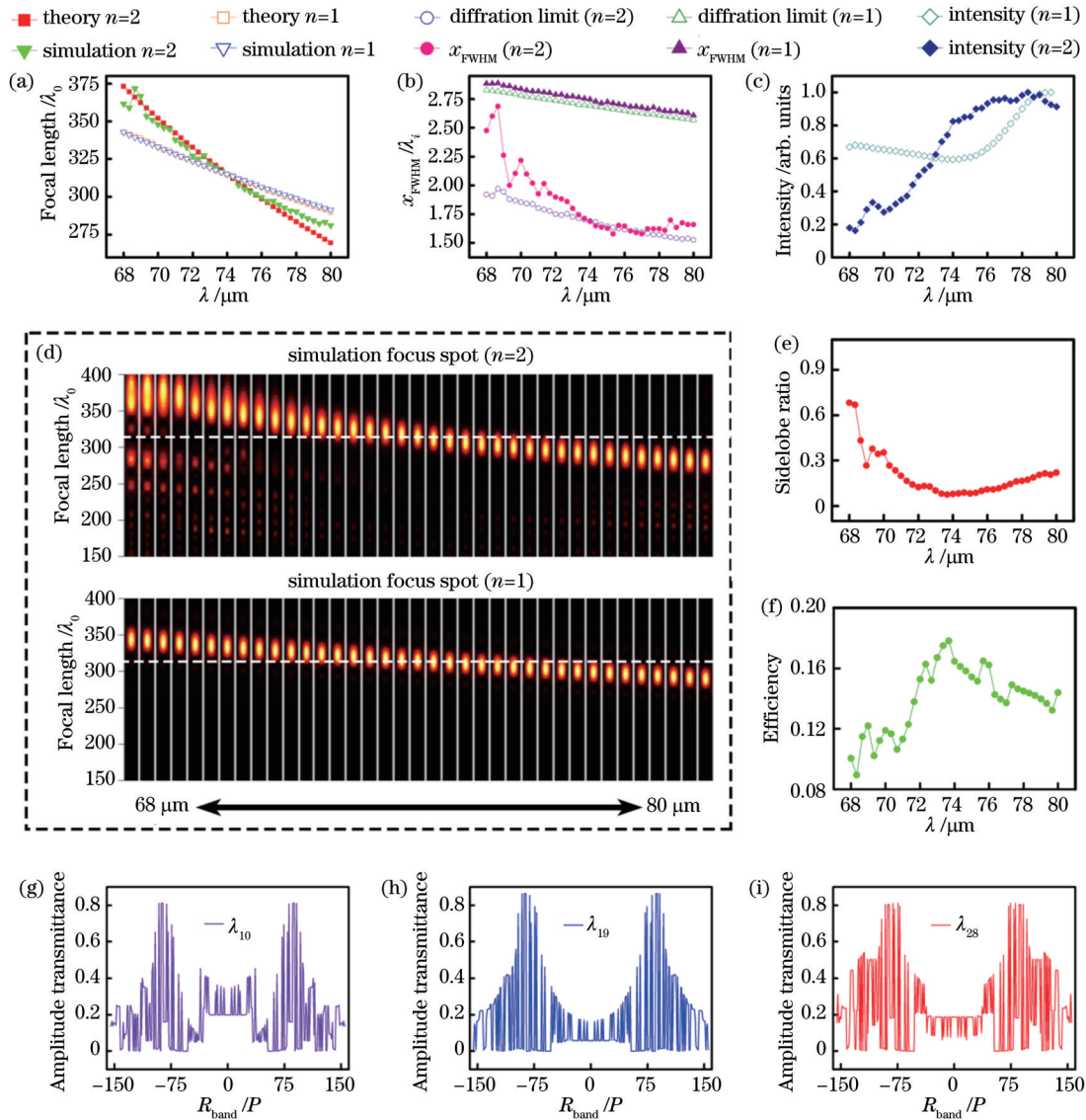


图 8 优化得到的超透镜在 37 个波长下基于 VASM 获得的焦距、半峰全宽、强度曲线和聚焦光斑强度分布图和相关振幅分布图。(a) 焦距曲线图; (b) 半峰全宽曲线图; (c) 强度归一化曲线图; (d) 两个超透镜的聚焦光斑强度分布对比; (e) 旁瓣比分布; (f) 聚焦效率曲线图; (g)~(i) 超分辨变焦超透镜在 3 个波长下的振幅分布

Fig. 8 Focal length, FWHM, intensity profile and focused spot intensity distribution of the optimized metalens obtained with VASM at 37 wavelengths and relevant amplitude distribution. (a) Curves of focal length; (b) curves of FWHM; (c) intensity normalization curves of metalens; (d) comparison of focused spot intensity distribution for two metalenses; (e) sidelobe ratio distribution; (f) curve of focused efficiency; (g)~(i) amplitude distribution of super-resolution zoom metalens at 3 wavelengths

图 8(e)~(f) 给出了变焦超透镜在各个波长下聚焦光斑的旁瓣比和聚焦效率, 超分辨变焦超透镜在 37 个波长下的平均聚焦效率约为 14%, 其中在  $68 \sim 71 \mu\text{m}$  波长范围内的聚焦效率相对较低, 产生这种现



象的主要原因是这个波长范围内的聚焦光斑的旁瓣比较大。图 8(g)~(i) 给出可代表宽带振幅情况的 3 个波长( $\lambda_{10}$ 、 $\lambda_{19}$  和  $\lambda_{28}$ ) 对应的振幅分布, 3 个波长对应的振幅分布基本呈现中间低、两边高的情况, 但  $\lambda_{10}$  对应的中间振幅分布比其余两波长高,  $\lambda_{28}$  对应的中间振幅分布比  $\lambda_{19}$  整体低。综上所述, 虽然经过优化的变焦超透镜不但实现了变焦能力的提升, 而且使得宽带内的聚焦光斑在整体上得到了有效压缩, 尤其在 73~78  $\mu\text{m}$  波长范围内, 基本可以实现超分辨, 但是在短波 68~71  $\mu\text{m}$  波长范围内对应的旁瓣比仍然较大, 导致宽带内的聚焦效率不高。针对这个问题, 后续可从结构的响应入手, 若能够找到色散值和振幅值俱佳的结构数据库, 基于此优化出来的器件经过加工后, 各方面性能都会得到极大的改善, 在光学变焦领域将具有十分重要的应用价值和实用意义。

优化得到的超分辨变焦超透镜由 89 种单元结构组成, 直径为 1.44 cm, 包含 156 个环带, 结构参数如表 1 所示。图 9 给出拟采用单元结构对应的环带位置, 编号 1 结构放在 1~14、16、18~24 环带, 编号 20 结构放在

42、44、45、52 环带, 编号 29 结构放在 54~61、63、64 环带, 编号 34 结构放在 69~72 环带, 编号 42 结构放在 81、83~86 环带, 编号 44 结构放在 87~89、92 环带, 编号 49 结构放在 96、98、99 环带, 编号 57 结构放在 106、107、109 环带, 编号 59 结构放在 110~113 环带, 编号 73 结构放在 129、130、133、134 环带, 编号 75 结构放在 135~137 环带, 编号 81 结构放在 144~147 环带。超分辨变焦超透镜由 89 种结构按照相位-色散-振幅调控的要求排列在 156 个环带内, 由于组成超透镜的各个单元结构在宽带内的响应不同, 故选定单元结构( $L=16.8 \mu\text{m}$ ,  $W=10.8 \mu\text{m}$ ) 作为相位调控  $[\varphi(r, \omega_0)]$  的基本单元, 以中心波长  $\lambda_0=74 \mu\text{m}$  对应的理论相位为目标, 通过旋转该结构角度  $\theta$  获得 16 值相位后进行匹配。为了保证超透镜在各个预设焦平面都能获得优异的聚焦性能, 需要计算出各个单元结构的旋转角度<sup>[32-35]</sup>, 即根据单元结构在设计波长下的初始相位  $\phi_0$ , 计算其与选定结构的相对相位差  $\Delta\phi$ , 得到每个结构需要附加的旋转角度  $\Delta\phi_i/2$  ( $i=1, 2, \dots, 89$ ), 最后将单元结构按照计算的旋转角度  $\theta + \Delta\phi_i/2$  排列在基底上。

表 1 单元结构参数

Table 1 Unit structure parameters

NO.	$L/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	NO.	$L/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	NO.	$L/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	NO.	$L/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$
1	36.7	8.0	24	30.1	8.0	47	13.6	13.5	70	19.8	19.7
2	41.2	8.0	25	36.3	19.8	48	14.9	14.8	71	39.2	18.5
3	41.4	8.0	26	29.3	8.2	49	14.5	14.4	72	39.2	18.6
4	41.6	8.0	27	36.7	20.0	50	16.2	12.9	73	33.5	20.9
5	39.4	8.4	28	27.8	8.5	51	15.6	13.4	74	19.6	19.5
6	36.1	8.2	29	8.6	8.5	52	15.4	13.5	75	39.4	19.0
7	42.2	8.0	30	25.2	9.5	53	24.4	19.6	76	39.4	19.1
8	35.6	8.3	31	9.1	9.0	54	24.2	19.8	77	37.3	21.5
9	42.4	8.0	32	24.2	9.9	55	39.5	16.2	78	16.2	16.0
10	41.8	8.2	33	8.5	8.4	56	39.4	16.3	79	16.2	16.1
11	35.8	20.0	34	11.8	11.7	57	24.1	20.1	80	16.3	16.2
12	36.1	20.1	35	19.2	9.1	58	42.7	17.4	81	32.7	21.0
13	36.1	20.2	36	11.3	11.2	59	42.8	17.4	82	32.9	20.7
14	36.2	20.2	37	18.4	9.8	60	42.8	18.4	83	38.3	21.3
15	43.0	8.0	38	12.2	12.1	61	23.7	20.9	84	38.1	21.4
16	33.5	8.8	39	12.3	12.2	62	42.0	17.9	85	37.7	21.6
17	36.7	20.2	40	12.4	12.3	63	20.3	20.2	86	37.5	21.7
18	36.8	20.2	41	19.6	10.4	64	19.9	19.8	87	17.8	16.4
19	31.3	8.0	42	17.9	16.3	65	39.1	17.9	88	18.6	16.6
20	36.8	20.3	43	17.2	11.7	66	39.0	17.9	89	37.7	21.8
21	30.7	8.1	44	16.8	12.1	67	39.2	18.3			
22	29.9	8.2	45	15.8	15.7	68	20.8	20.7			
23	29.9	8.1	46	13.1	13.0	69	39.2	18.4			

## 4 结 论

针对现有光学变焦系统通常需要进行机械扫描且

系统复杂笨重、难以集成的问题, 提出一种基于超透镜的色散特性, 通过同时进行相位和色散调控来提升超透镜的轴向色散能力, 从而实现波长调控光学变焦的

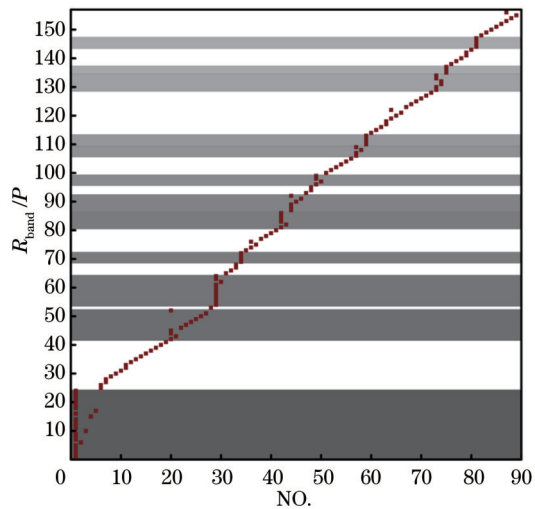


图 9 单元结构对应环带位置

Fig. 9 Unit structure corresponds to the position of the ring

方法。由于衍射效应的影响,所设计变焦超透镜的分辨率无法突破衍射极限的制约。因此,在进行变焦设计时,通过调节 GD 和 GDD 的匹配误差,在保障预设变焦性能的同时,通过 HPSO 寻找最优环带结构排列,实现了对变焦超透镜点扩散函数的有效压缩。仿真结果表明,所设计变焦超透镜的轴向变焦能力约为常规衍射超透镜的 1.52 倍,在工作带宽 (68~80  $\mu\text{m}$ ) 内的横向分辨率不断接近衍射极限,对于部分区域 (73~78  $\mu\text{m}$ ) 甚至突破了衍射极限的制约。然而,在短波 68~71  $\mu\text{m}$  波长范围内对应的旁瓣比仍然较大,最高旁瓣比约为 68%,这会导致宽带内的聚焦效率不高,平均聚焦效率约为 14%。上述情况主要源于单元结构对宽带光波的响应特性,器件中心和边缘环带可选单元结构数量有限,且振幅调控范围较小,后续将进一步扩充结构集合,为振幅调控提供更多的选择,进而实现高性能的宽带超分辨波长调控光学变焦,为高紧凑、高分辨率、非移动式变焦系统提供核心元件。

## 参 考 文 献

[1] Ndao A, Hsu L, Ha J, et al. Octave bandwidth photonic fishnet-achromatic-metalens[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3205.

[2] Arbabi E, Li J Q, Hutchins R J, et al. Two-photon microscopy with a double-wavelength metasurface objective lens[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 4943-4948.

[3] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.

[4] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.

[5] 何书宸, 魏志伟, 葛睿, 等. 基于消色差超构光栅的 AR 显示光波导[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 2011016.

He S C, Wei Z W, Ge R, et al. AR display optical waveguide based on achromatic superstructure grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 2011016.

[6] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic

dielectric metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.

[7] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 355.

[8] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. Broadband achromatic metasurface-refractive optics[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7801-7808.

[9] Avayu O, Almeida E, Prior Y, et al. Composite functional metasurfaces for multispectral achromatic optics[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14992.

[10] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, 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.

[11] 梁瑜, 徐媛媛, 邹阳, 等. 免偏振敏感消色差超构透镜设计研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0303001.

Liang Y, Xu Y Y, Zou Y, et al. Design of achromatic polarization-insensitive metalens[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0303001.

[12] Pahlevaninezhad H, Khorasaninejad M, Huang Y W, et al. Nano-optic endoscope for high-resolution optical coherence tomography *in vivo*[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(9): 540-547.

[13] Chen C, Song W G, Chen J W, et al. Spectral tomographic imaging with aplanatic metalens[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 99.

[14] Remnev M A, Klimov V V. Metasurfaces: a new look at Maxwell's equations and new ways to control light[J]. *Physics-Uspeski*, 2018, 61(2): 157-190.

[15] 倪一博, 闻顺, 沈子程, 等. 基于超构表面的多维光场感知[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1918003.

Ni Y B, Wen S, Shen Z C, et al. Multidimensional light field sensing based on metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918003.

[16] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255-275.

Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275.

[17] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139-152.

[18] Li Y, Li X, Chen L W, et al. Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(2): 1600502.

[19] Chen S Q, Li Z C, Liu W W, et al. Metasurfaces: from single-dimensional to multidimensional manipulation of optical waves with metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(16): 1970118.

[20] Shaltout A M, Shalae V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces[J]. *Science*, 2019, 364(6441): eaat3100.

[21] Pan M Y, Fu Y F, Zheng M J, et al. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 195.

[22] Luo Y, Chu C H, Vyas S, et al. Varifocal metalens for optical sectioning fluorescence microscopy[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(12): 5133-5142.

[23] Fu R, Li Z L, Zheng G X, et al. Reconfigurable step-zoom metalens without optical and mechanical compensations[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12221-12230.

[24] Shalaginov M Y, An S S, Zhang Y F, et al. Reconfigurable all-dielectric metalens with diffraction-limited performance[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1225.

[25] Hu Y Q, Ou X N, Zeng T B, et al. Electrically tunable multifunctional polarization-dependent metasurfaces integrated with liquid crystals in the visible region[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(11): 4554-4562.

- [26] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [27] Zhao F, Li Z P, Dai X M, et al. Broadband achromatic sub-diffraction focusing by an amplitude-modulated terahertz metalens[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(21): 2000842.
- [28] Reza N, Hazra L. Toraldo filters with concentric unequal annuli of fixed phase by evolutionary programming[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(2): 189-195.
- [29] Wu Z X, Dong F L, Zhang S, et al. Broadband dielectric metalens for polarization manipulating and superoscillation focusing of visible light[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(1): 180-189.
- [30] Zhao F, Li Z P, Li S, et al. Terahertz metalens of hyperdispersion[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(4): 886-895.
- [31] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [32] Hasman E, Kleiner V, Biener G, et al. Polarization dependent focusing lens by use of quantized Pancharatnam - Berry phase diffractive optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(3): 328-330.
- [33] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [34] Zhou J X, Qian H L, Hu G W, et al. Broadband photonic spin hall meta-lens[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(1): 82-88.
- [35] Hsiao H H, Chen Y H, Lin R J, et al. Integrated-resonant units: integrated resonant unit of metasurfaces for broadband efficiency and phase manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(12): 1870047.

## Super-Resolution Wavelength-Controlled Zoom Metalens

Huang Baoze<sup>1</sup>, Zhao Fen<sup>1,2\*</sup>, Liu Qinxiao<sup>1</sup>, Yang Junbo<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Artificial Intelligence, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China;*

<sup>2</sup>*Center of Material Science, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China*

### Abstract

**Objective** Chromatic aberration caused by dispersion usually degrades the system imaging quality in optical imaging systems. Therefore, a large number of researchers have used various methods to correct chromatic aberration in devices and systems. However, chromatic aberration is of practical value in certain specific areas, such as wavelength-controlled optical zoom by chromatic aberration, so that mechanical moving parts are no longer required in zoom systems with fast, continuous, and repeatable zoom by only changing the incident wavelength. It effectively improves the detection efficiency of optical systems and promotes the development of optical zoom systems in the direction of integration and miniaturization. Optical metasurfaces have powerful multi-dimensional light field modulation capabilities. Metasurface planar lenses, namely metalenses, are realized based on the local abrupt phase introduced by sub-wavelength structures, which allow complex and bulky conventional lens sets to be converted into single-layer structures with multi-functional integrated modulation characteristics. In addition, the dispersion of a metalens is more pronounced than that of a conventional refractive lens, but the zoom mode and axial zoom range of conventional diffracted metalenses are influenced by the inherent diffraction dispersion, and its resolution is constrained by the diffraction limit. To address this challenge, one method of designing super-resolution wavelength-controlled zoom metalenses has been proposed by simultaneously modulating the phase, dispersion, and amplitude. After enhancing the axial zoom capability of the metalens, we utilize a hierarchical particle swarm optimization (HPSO) algorithm to further compress the point spread function of the metalens, which makes the full width at half maximum (FWHM) of the metalens close to or even less than the diffraction limit ( $0.5\lambda/NA$ ).

**Methods** First, the relation between the focal length and angular frequency, i. e., the dispersion constraint relationship, is set to  $n=2$ , and the theoretical group delay (GD) and group delay dispersion (GDD) are obtained by Taylor expansion. Then, the unit structure database is created. The wavelength range is set to  $68\text{--}80\ \mu\text{m}$ , and 37 wavelengths are sampled at equal intervals. The amplitude and phase of the unit structure within the bandwidth are sequentially calculated by the commercial software FDTD Simulation. The simulated GD and GDD of each structure are obtained by fitting the simulated data. In order to minimize the fitting error, the unit structures with  $R^2$  values of fitting accuracy less than 0.98 are screened out to create the unit structure database, which consists of more than 30000 different structures. In order to cover a larger range of group delay, the simulated data points are shifted. In the next step, based on the unit structure database, a reasonable matching error is set to create ring-band-dataset by dispersion engineering. The structures in each ring-band-dataset have similar dispersion and different amplitude, thus randomly selecting structures from the datasets can achieve a zoom metalens. Although the above zoom metalenses have a greater axial zoom capability than conventional



diffracted metalens, none of their FWHM values within the bandwidth is less than the diffraction limit. Finally, in order to further compress the point spread function of the metalens while keeping the zoom capability of the metalens unchanged, each structure located in the ring is selected from the created datasets, and the amplitude of the metalens is optimized by using the vectorial angular spectrum method (VASM) and the HPSO, resulting the FWHM of the metalens close to or even less than the diffraction limit.

**Results and Discussions** The focal length variation of the zoom metalens operating in the range of 68 – 80  $\mu\text{m}$  basically meets the demand of set value, and the zoom range is about 80.6  $\mu\text{m}$  while that of the conventional diffracted metalens with the same diameter is about 53  $\mu\text{m}$ . Hence, the zoom capability of the zoom metalens is about 1.52 times that of the conventional diffracted metalens (Fig. 8 (a)). The FWHM of the conventional diffracted metalens is close to the diffraction limit within the bandwidth, and none of its focal spots is less than  $0.5\lambda/NA$ . However, the optimized zoom metalens operating in 73–78  $\mu\text{m}$  (i. e. ,  $\lambda_{16}-\lambda_{31}$ ) achieves super-resolution focusing (Fig. 8 (b)). Although the focal spots of other wavelengths are still limited by the diffraction limit, the spot size of the zoom metalens can be effectively compressed by amplitude modulation compared with the randomly composed metalens. The two-dimension intensity profiles of the zoom metalens ( $n=2$ ) and the conventional diffracted metalens ( $n=1$ ) along the propagation direction are depicted in the figure, which shows that the range of the focal shift of the zoom metalens is larger than that of the conventional diffracted metalens.

**Conclusions** The existing optical zoom systems usually require mechanical scanning, and these systems are complex, bulky, and difficult to be integrated. To meet this challenge, we propose a wavelength-controlled optical zoom metalens with enhanced axial zoom capability by simultaneously modulating the phase and dispersion. Affected by the diffraction effect, the resolution of the randomly composed zoom metalens cannot break the diffraction limit. Therefore, on the basis of maintaining the preset zoom performance by adjusting the matching error of GD and GDD, we utilize the HPSO algorithm to further compress the point spread function of the zoom metalens. Simulation results show that the axial zoom capability of the designed zoom metalens is about 1.52 times that of the conventional diffracted metalens, and the transverse resolution within the working bandwidth (68–80  $\mu\text{m}$ ) is approaching the diffraction limit. Particularly, the resolution is less than the diffraction limit in the range of 73–78  $\mu\text{m}$ . Due to the response characteristics of the unit structure within the operating bandwidth, a few unit structures can be selected in the center and edge rings, and the range of amplitude is relatively small, resulting in limited device diameter and focusing efficiency. The unit structure database will be further expanded to provide more choices for amplitude modulation, thereby realizing a high-performance broadband super-resolution wavelength-controlled optical zoom metalens and providing a core element for a highly compact, high-resolution, and non-moving zoom system.

**Key words** optical design; metalens; wavelength-controlled optical zoom; amplitude modulation; hierarchical particle swarm optimization algorithm; super resolution