

基于波前编码的消色差稀疏孔径超构透镜

张敬巍^{1,2}, 胡敬佩^{1,2*}, 董延更^{1,2}, 曾爱军^{1,2}, 黄惠杰^{1,2}¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光学稀疏孔径技术以其所具有的降低透镜加工面积、增大数值孔径和提升分辨率的能力被应用到超构透镜的设计和优化中。然而,目前稀疏孔径超构透镜的研究仅限于单波长,通常难以应用到宽波段成像领域。笔者基于波前编码和稀疏孔径技术设计了一种消色差稀疏孔径超构透镜。该消色差稀疏孔径超构透镜在加工面积降低至全孔径超构透镜 25% 的情况下,在可见光波段(400~700 nm)可实现与理想透镜一致的分辨率。该消色差稀疏孔径超构透镜既实现了对可见光波段的消色差,又解决了大孔径超构透镜的加工难题,具有加工成本低、消色差范围大、成像清晰等特点,在图像采集领域具有重要的应用价值。

关键词 光学器件; 超构透镜; 消色差; 光学稀疏孔径; 波前编码; 维纳滤波

中图分类号 TB133; O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230848

1 引言

随着现代光学技术和微纳加工技术的发展,光学设备朝着轻薄便携、高集成度和精密度的方向发展。传统的光学透镜基于折射和反射原理进行设计,通过镜片表面曲率改变光程来实现波前相位调制。然而,这类透镜体积大且沉重,不利于集成,极大地限制了现代光学设备的微型化、便携化和集成化^[1-4]。近年来,光子学研究和纳米制造技术的突破使得光学超表面的设计实现有了进一步发展。光学超表面通过几何等离子体共振、米氏共振、激子共振等原理,利用小于波长量级厚度的人工材料实现对电磁波振幅、相位、频率、偏振等参数的调控^[5-9]。其中,超构透镜是一种通过表面特殊排列的二维几何结构实现聚焦功能的超表面器件。由于其调制尺度在纳米量级,因此具有超轻、超薄和调控精度高的优点,在集成光学系统、轻量化成像设备和可穿戴光学领域具有巨大的应用潜力^[10-15]。

近年来,随着超构透镜口径的不断增大,数亿量级的亚波长纳米结构为超构透镜的加工带来了巨大挑战。为解决大孔径超构透镜加工的难题,2020年,本课题组^[16]率先提出稀疏孔径超构透镜的概念,并从理论上证明了它的可行性。2021年,Zhao等^[17]使用此技术制备了不同子孔径数量的传统稀疏孔径超构透镜,并将其用于近红外相机,有效提高了等面积超构透镜的成像分辨率。2022年,Lin等^[18]设计并制备了基于不同材料的非传统稀疏孔径超构透镜,进一步拓展了

该类透镜的设计自由度。然而,目前该类稀疏孔径超构透镜的研究仅限于单波长,极大地限制了它的使用场景。

针对稀疏孔径透镜成像需要用点扩散函数进行恢复的特点,笔者基于波前编码技术设计了一款孔径为 0.7 mm、焦距为 7 mm 的消色差稀疏孔径超构透镜,成功地在可见光波段(400~700 nm)实现了消色差功能。在设计中,采用波前编码技术对稀疏孔径超构透镜的相位进行重新编码,避免了超构透镜纳米结构的复杂优化和二级结构难以加工的难题。对全孔径系统、稀疏孔径超构透镜系统和波前编码稀疏孔径超构透镜系统在 400、475、550、625、700 nm 波段下进行仿真成像,结果表明,该外半径为 0.35 mm、内半径为 0.303 mm 的消色差稀疏孔径超构透镜在加工面积降至全孔径超构透镜 25% 的情况下,依然可以实现与理想全孔径超构透镜一致的分辨率。该消色差稀疏孔径超构透镜具有加工成本低、消色差范围大、成像清晰等特点,有望在成像、传感、观测等领域发挥重要作用。

2 原理与设计

2.1 超构透镜结构单元优化设计

超构透镜调控相位的方式主要包括传输相位型和几何相位型。在共振型纳米结构单元的设计中,相位对波长比较敏感,很难使所有波长的光束同时具有聚焦功能,给超构透镜纳米结构的设计带来了巨大困难。因此,传输相位调控方式不适合应用于基于波前编码

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-06-21; 录用日期: 2023-07-06; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 上海市集成电路科技专项支撑(20501110600)

通信作者: *hujingpei@siom.ac.cn

的具有消色差功能的超构透镜设计中。在几何相位调制方式中,相位延迟只与纳米结构的旋转角度有关,而与波长无关,因此所有波长的光经过超构透镜时具有相同的相位延迟,不同波长的光聚焦在不同的位置。波前编码可以通过分别增加各波长下系统的焦深来实现消色差功能。

具有消色差功能的稀疏孔径超构透镜的纳米结构单元设计如图 1(a)所示。根据可见光波长下材料的光学特性,选择熔石英(SiO₂)作为衬底,氮化镓(GaN)作为介质材料。其中,GaN 介质层被刻蚀成周期性的

纳米柱结构,纳米柱结构的排列周期 $P=320\text{ nm}$, GaN 纳米柱的长(L)、宽(W)、高(H)分别为 90、220、800 nm。每个周期中的 GaN 纳米柱可以看作是一个各向异性的电磁结构,通过改变纳米柱的旋转角度 θ 可以实现对圆偏振光相位的调制。纳米结构对入射光的电磁效应可以通过时域有限差分(FDTD)软件进行仿真,其中, x 、 y 方向为周期性边界条件, z 方向的边界条件为完美匹配层(PML)。纳米结构单元的透过率、偏振转换效率和相位设计结果如图 1(b)和图 1(c)所示。

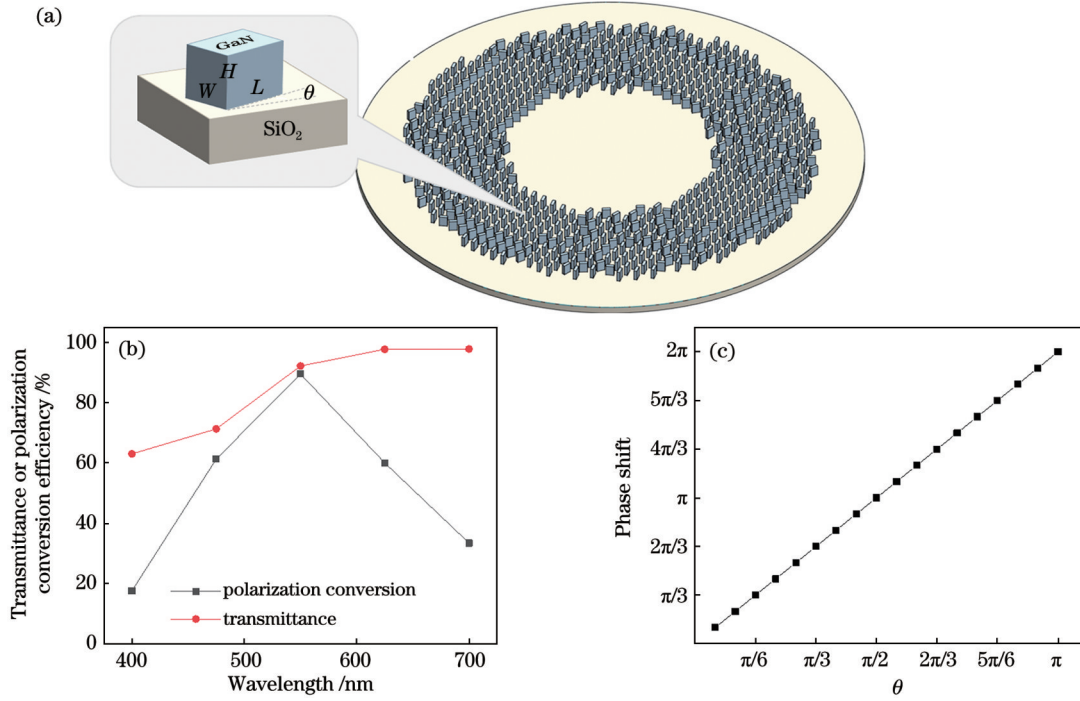


图 1 超构透镜示意图和 FDTD 仿真结果。(a)示意图;(b)设计的透过率和偏振转换效率;(c)设计的相位

Fig.1 Schematic diagram of a metalens and FDTD simulation results. (a) Schematic diagram; (b) designed transmittance and polarization conversion efficiency; (c) designed phase

2.2 波前编码稀疏孔径超构透镜相位设计及结构构建

波前编码技术以傅里叶光学为基础,利用三次相位、指数型相位、对数型相位等编码相位对非相干成像系统的波前进行预调制,使得光学系

统对焦面位置不敏感^[19],然后采用维纳滤波等反卷积算法解码复原^[20-21],实现光学系统的消色差功能。

任意掩模板的一维点扩散函数(PSF)为

$$h(u, v) = \frac{1}{2} \int_{-(1-\frac{|u|}{2})}^{1-\frac{|u|}{2}} \exp\left[j\varphi\left(x + \frac{u}{2}\right)\right] \exp\left[-j\varphi\left(x - \frac{u}{2}\right)\right] \exp(j2\pi vx) dx, \quad (1)$$

式中: u 为光频率; $\varphi(x)$ 为任意多项式编码相位; v 为离焦量。其中 $\varphi(x)$ 为

$$\varphi(x) = \alpha x^n, \alpha \neq 0, \quad (2)$$

式中: n 为编码相位次数; α 为相位编码因子。

将式(2)代入式(1),得

$$\begin{aligned} h(u, v) &= \frac{1}{2} \int_{-(1-\frac{|u|}{2})}^{1-\frac{|u|}{2}} \exp\left[j\alpha\left(x + \frac{u}{2}\right)^n\right] \exp\left[-j\alpha\left(x - \frac{u}{2}\right)^n\right] \exp(j2\pi vx) dx \\ &= \frac{1}{2} \int_{-(1-\frac{|u|}{2})}^{1-\frac{|u|}{2}} \exp\left\{j\alpha\left[\left(x + \frac{u}{2}\right)^n - \left(x - \frac{u}{2}\right)^n\right]\right\} \exp(j2\pi vx) dx. \end{aligned} \quad (3)$$

令

$$\phi(x) = \alpha \left[\left(x + \frac{u}{2} \right)^n - \left(x - \frac{u}{2} \right)^n \right], \quad (4)$$

当 $\phi(x)$ 快速变化时, 由稳相法可近似得

$$\begin{aligned} h(u, v) &\approx \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{\phi'(x_i)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp [j\psi(v)] \\ &= \frac{1}{2} \left(\left| \frac{\partial x_i}{\partial v} \right| \right)^{\frac{1}{2}} \exp [j\psi(v)], \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\psi(v) = 2\pi v x_i + \varphi(x_i). \quad (6)$$

当相位处于稳态相位时,

$$\frac{\partial \psi(v)}{\partial x_i} = 0. \quad (7)$$

对于三次相位板, 即 $n=3$ 时,

$$x_i = \frac{-\pi v}{3\alpha u}. \quad (8)$$

其一维点扩散函数代入稳相点后为

$$h(u, v) \approx \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp \left[j \left(\frac{\alpha u^3}{4} - \frac{\pi^2 v^2}{3\alpha u} \right) \right], \quad u \neq 0, \quad (9)$$

经傅里叶变换后其光学传递函数 (OTF) 为

$$\mathcal{H}(u, \psi) = \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp \left(\frac{j\alpha u^3}{4} \right) \exp \left(-\frac{j\psi^2 u}{3\alpha} \right), \quad u \neq 0. \quad (10)$$

因此, 近似 OTF 的振幅与离焦量无关, 相位部分 $\exp \left(-\frac{j\psi^2 u}{3\alpha} \right)$ 是离焦量的二次函数, 在很大的离焦范围内对点扩散函数基本没有影响。当 $\alpha \geq 20$ 时, 简化的三次相位板的 OTF 函数为

$$\mathcal{H}(u, \psi) = \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp \left(\frac{j\alpha u^3}{4} \right), \quad \alpha \geq 20, u \neq 0. \quad (11)$$

因此, 加入三次相位板后, 光学系统的 OTF 随着离焦量 v 变化几乎不发生改变, 可以实现消色差功能。

稀疏孔径技术同样基于非相干成像理论, 使用若干个子孔径来代替整个孔径, 在减小孔径面积的同时利用反卷积复原, 得到与全孔径超构透镜近乎一致的成像效果。具有聚焦效果的稀疏孔径超构透镜的相位应为

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi \left(f - \sqrt{f^2 + x^2 + y^2} \right)}{\lambda}, \quad (x, y) \in P(x, y), \quad (12)$$

式中: f 为超构透镜的焦距; λ 为入射光的中心波长; $P(x, y)$ 为稀疏孔径的孔径坐标区间, 其三维 (3D) 面型如图 2(a) 所示。

本文采用三次相位编码, 相位方程为

$$\varphi(x, y) = \frac{\alpha}{R^3} (x^3 + y^3), \quad (x^2 + y^2) < R^2, \quad (13)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 为编码相位; x, y 为透镜坐标; R 为透镜

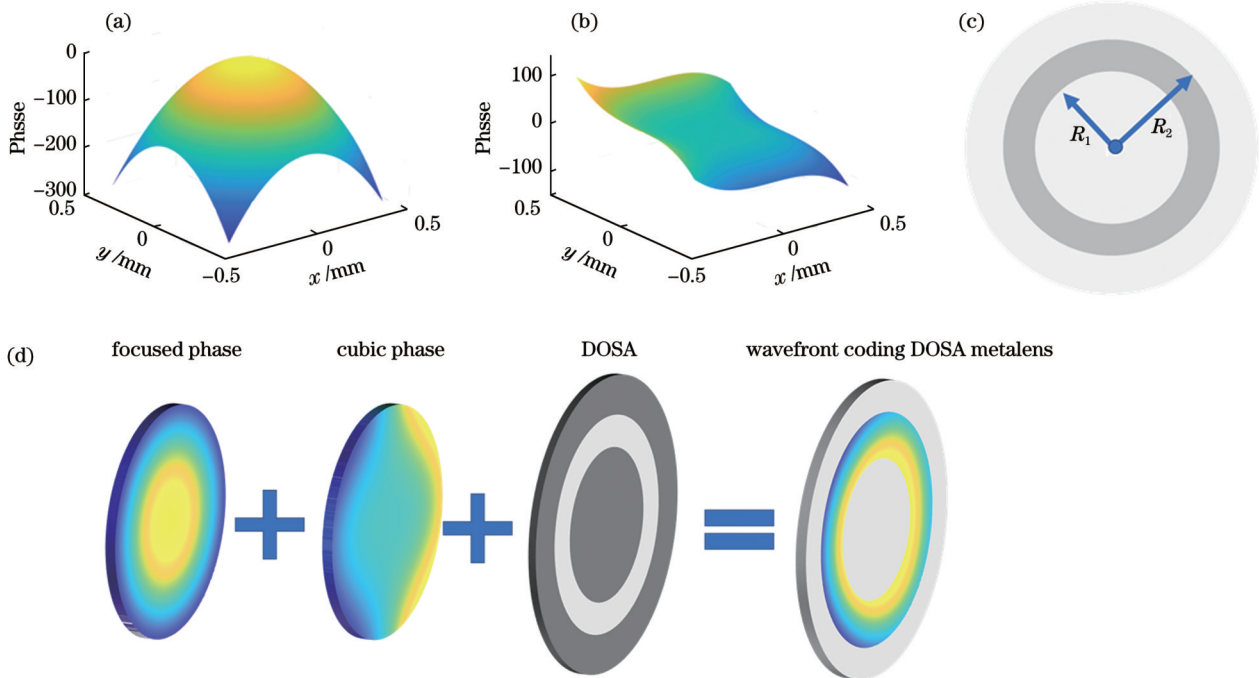


图 2 消色差稀疏孔径超构透镜相位设计示意图。(a) 聚焦超构透镜的三维面型; (b) 编码相位示意图; (c) DOSA 超构透镜的孔径结构示意图; (d) 基于三次相位波前编码的 DOSA 超构透镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the phase design of an achromatic sparse aperture metalens. (a) Three-dimensional surface of the focusing metalens; (b) schematic diagram of the encoding phase; (c) aperture structure of DOSA metalens; (d) schematic diagram of DOSA metalens based on the cubic phase wavefront encoding

孔径半径; α 此时为三次相位编码因子, 其相位轮廓如图 2(b) 所示。将聚焦相位与编码相位结合, 可以得到波前编码稀疏孔径超构透镜的表面相位为

$$\psi(x, y) = \varphi(x, y) + \phi(x, y), (x, y) \in P(x, y). \quad (14)$$

本文设计的超构透镜中的稀疏孔径系统采用环形稀疏孔径(DOSA), 其工作示意图如图 2(d) 所示, 波前透过熔石英基底并经过环形区域介质层后, 受到介质层的相位调制, 产生聚焦效果。介质层区域为优化的纳米柱结构, 按照以下方式构建: 首先将式(3)得到的最终相位 $\psi(x, y)$ 转换至 $0 \sim 2\pi$ 以内, 然后根据偏转转换效率对纳米柱尺寸进行优化, 在稀疏孔径区域构建纳米柱结构。如图 2(c) 所示, 灰色环形区域为氮化镱介质层区域, 其外半径 R_2 为超构透镜的有效半孔径, R_1 为内半径。通过增大 R_1 可以有效降低超构透镜的加工面积, 从而降低加工成本。

2.3 维纳滤波恢复算法

本文使用维纳滤波算法对经光学系统后的退化图像进行恢复。以光学稀疏孔径成像为例, 其成像过程在频域空间可以描述为

$$F'(f_x, f_y) = F(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) + N(f_x, f_y), \quad (15)$$

式中: $F(f_x, f_y)$ 、 $N(f_x, f_y)$ 和 $F'(f_x, f_y)$ 分别为原图、噪声函数和退化图像的傅里叶形式; $H(f_x, f_y)$ 为频域的光学系统传递函数。

维纳滤波算法利用的是最小均方误差原则, 当恢复信号和原始信号之间的均方误差最小时得到解, 即

$$\delta^2 = E \left\{ [f(x, y) - f'(x, y)]^2 \right\} = \min, \quad (16)$$

式中: $f(x, y)$ 和 $f'(x, y)$ 分别为原始图像和退化后图像; $E(\cdot)$ 表示参数的期望值; δ 表示恢复信号和原始信号之间的均方根误差。

在仿真过程中, 当对图像进行逆卷积恢复时, 认为成像过程是理想无噪的, 因此所恢复图像的频谱为

$$F(f_x, f_y) = \frac{H^*(f_x, f_y)}{|H(f_x, f_y)|^2} F'(f_x, f_y), \quad (17)$$

式中: $H^*(f_x, f_y)$ 为光学系统调制函数的复共轭形式。 $F(f_x, f_y)$ 经过傅里叶逆变换后即即为所恢复的图像。

3 仿真与分析

3.1 设计参数及仿真方法

笔者使用上述方法设计了有效半孔径 R_2 为 0.35 mm、内半径 R_1 为 0.303 mm、焦距 f 为 7 mm、三次相位编码因子 α 为 20 的三次相位波前编码的光学稀疏孔径超构透镜, 并分别在 400、475、550、625、700 nm 波段对其进行成像恢复仿真模拟, 以验证此超构透镜在可见光区域的消色差能力。然而, 对于如此大面积的超构透镜来说, 基于矢量衍射的 FDTD 计算方法对硬件要求较高, 且时间消耗很大, 很难在短时间内取得精确结果。与多数研究者一样, 笔者基于超构透镜仿真中常用的远场理论模型进行仿真计算, 即利用超构透镜设计结果的结构表面电场数据直接进行远场计算, 以获取透镜后的光场数据。

3.2 MTF 函数对比

调制传递函数(MTF)作为非相干成像系统的重要评价指标, 是成像系统脉冲响应函数的傅里叶变换形式, 表示系统对各种频率的加权调制。图 3 分别为全孔径系统、稀疏孔径超构透镜系统和波前编码稀疏孔径超构透镜系统在 400、475、550、625、700 nm 波长处的一维 MTF 函数。由图 3(a) 可以看出, 在除设计波长 550 nm 以外的其他波段下, 由于波长的改变, 全孔径超构透镜成像系统的 MTF 随着空间频率增大而急剧降低, 大量频域信息丢失, 导致成像分辨率严重降低, 图片变得模糊。图 3(b) 是稀疏孔径超构透镜在不同波长下的 MTF 函数, 其中 550 nm 波长处的 MTF 在中高频率下由于孔径的改变而改变, 然而 MTF 的数值并不为 0。经过此系统后, 成像结果会因为频率的改变而发生退化, 进而变得模糊, 但成像结果中被改变的频率信息经图像恢复算法后能够得到还原, 因此稀疏孔径成像系统可以达到与全孔径成像系统一致的分辨率。这就是稀疏孔径超构透镜成像的理论基础。然

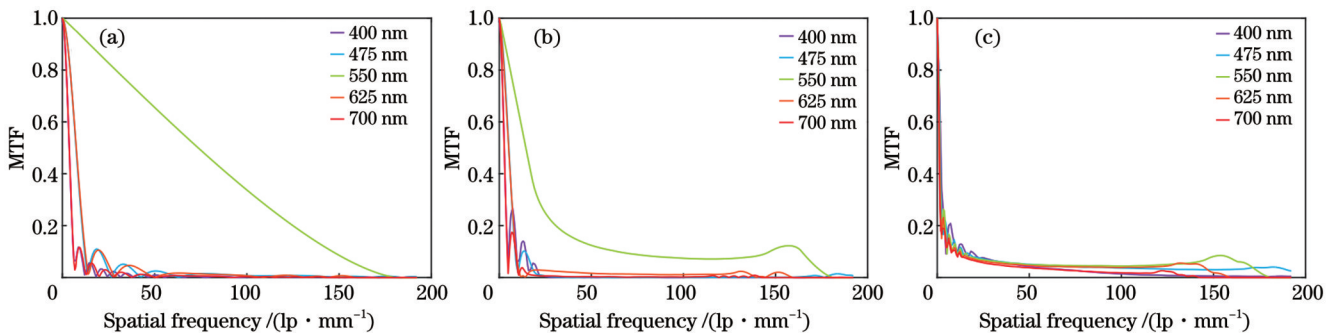


图 3 不同超构透镜在不同波长下的 MTF。(a) 全孔径超构透镜在不同波长下的 MTF; (b) 稀疏孔径超构透镜在不同波长下的 MTF; (c) 波前编码稀疏孔径超构透镜在不同波长下的 MTF

Fig. 3 MTF of different kinds of metalens at different wavelengths. (a) MTF of the FA metalens at different wavelengths; (b) MTF of the DOSA metalens at different wavelengths; (c) MTF of wavefront encoded DOSA metalens at different wavelengths

而,在其他波段下,MTF函数在中高频区域的频率依旧存在不同程度的丢失,从而导致成像结果发生不可逆的模糊。图3(c)是经过波前编码后的稀疏孔径超构透镜在不同波长下的一维 MTF 函数。从该图可以看出,各个波长的 MTF 在中频区域虽然有所降低但并没有丢失,理论上可以恢复。另外需要注意的是,不同波长 MTF 截止的空间频率不同,这是正常的。由非相干成像理论可知,理想透镜的截止频率可由公式 $F_{\text{cut-off}} = D/(\lambda f)$ 得到,其中 D 为透镜的孔径, λ 为波长, f 为透镜焦距。可以得到 5 种波长下的截止频率分别为 250、211、182、160、143 lp/mm。

3.3 色散成像对比

为了进一步验证此透镜的成像效果,分别采用全孔径超构透镜、稀疏孔径超构透镜以及波前编码稀疏孔径超构透镜三种成像系统在可见光不同波段下对美国空军 1951 标准分辨率板进行成像,并利用点扩散函数对稀疏孔径超构透镜和波前编码稀疏孔径超构透镜的成像结果进行图像恢复。此外,为了更好地展示不同波长下各种透镜的成像分辨率,在

仿真时将标准分辨率板的尺寸缩小为原来的 1/2,即分辨率板上的每一组线条所表示的分辨率为实际标准数值的 2 倍。

图 4 为全孔径超构透镜的 PSF 和成像结果。从图中可以看出,在除了设计波长 550 nm 外的其他波长下,由于波长改变产生的色差使聚焦光斑出现了散焦,成像很模糊,即便是经维纳滤波算法恢复后,图像仍旧发生了严重失真,线条变得扭曲,细节严重丢失且背景产生了大量噪声。图 5 为稀疏孔径超构透镜的仿真结果。可以看出:在设计波长 550 nm 下,聚焦光斑很小,虽然成像效果由于 MTF 的改变而发生退化变得模糊,但是由于其频率信息没有丢失,经维纳滤波算法恢复后,图片变得清晰;在 625 nm 波段,虽然恢复效果较全孔径超构透镜更加清晰,但是从图 3(b)中可以看出图像的 MTF 变得很小,这会给图像的恢复带来很大困难;在其他波段下,恢复后的图像也存在大量信息丢失的现象。以上结果说明传统透镜和稀疏孔径超构透镜无论是否借助恢复算法,都无法解决色散问题。

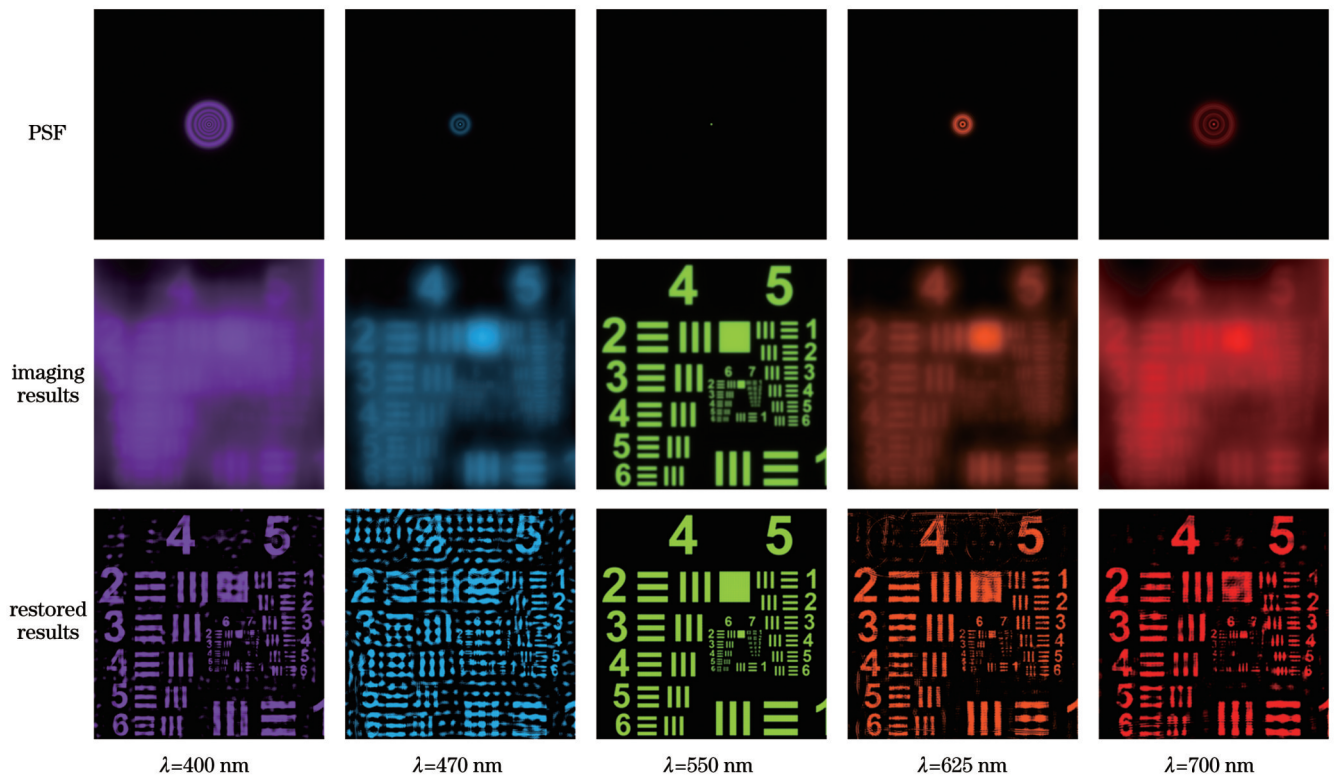


图 4 全孔径超构透镜在不同波长下的成像恢复

Fig. 4 Image recovery of FA metalens at different wavelengths

图 6 为波前编码稀疏孔径超构透镜成像恢复结果。与图 3(c)中 MTF 函数曲线一致,5 个波长下的图像经过维纳滤波算法恢复后清晰度基本相同。通过观察分辨率板上的第 6 组和第 7 组线条可以看出,5 个波长恰好可以分辨的最细线条分别为第 7 组中的第 1 条、第 6 组中的第 5 条、第 6 组中的第 4 条、第 6 组中的第 3

条和第 6 组中的第 2 条。根据分辨率板标准数据以及仿真时对分辨率板的缩放(缩小至原来的 1/2),得到了这些线条对应的实际分辨率以及根据 MTF 仿真部分计算的 5 种波长在相同孔径理想聚焦透镜下的截止频率,如表 1 所示。

由表 1 可以看出理想聚焦透镜的截止频率与所设

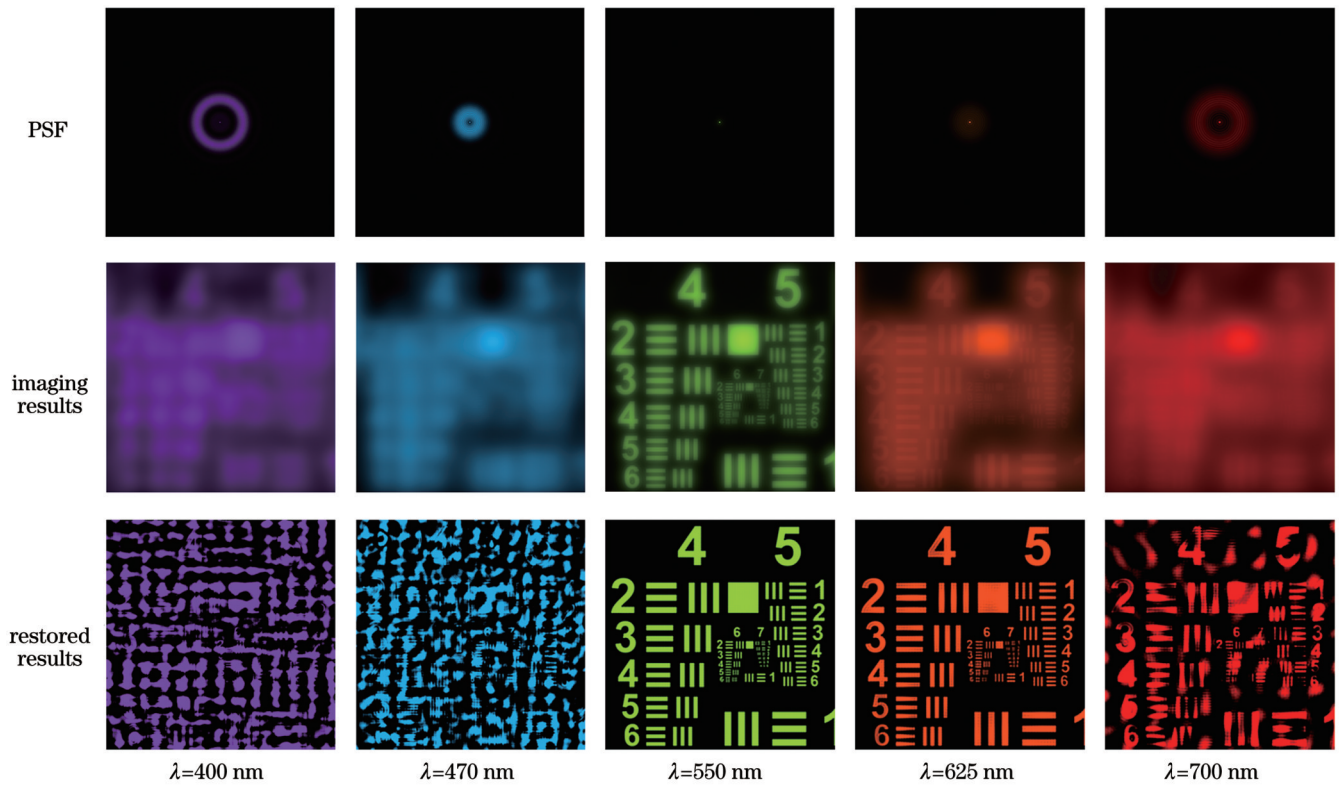


图 5 稀疏孔径超构透镜在不同波长下的成像恢复

Fig. 5 Image recovery of DOSA metalens at different wavelengths

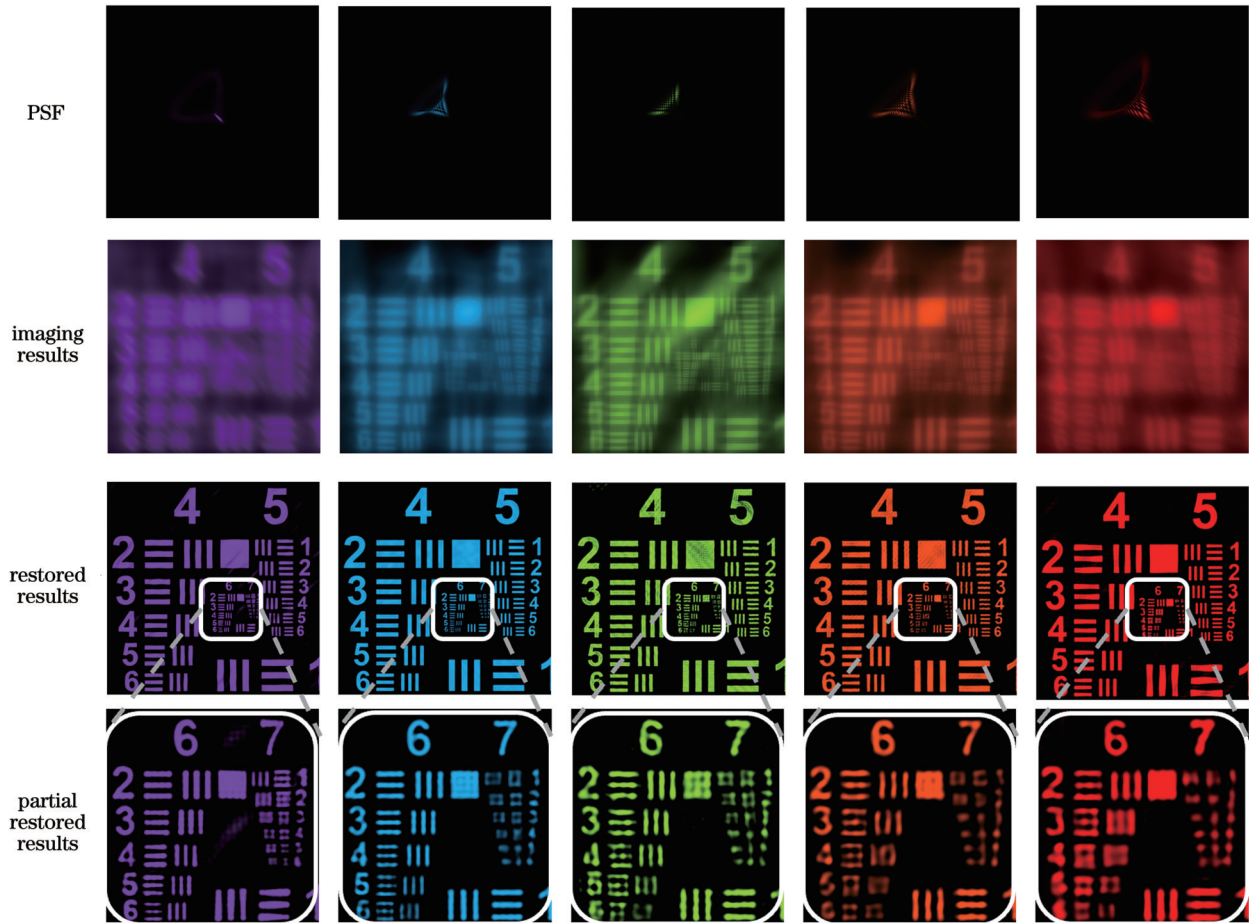


图 6 波前编码稀疏孔径超构透镜在不同波长下的成像恢复

Fig. 6 Image recovery of wavefront encoded DOSA metalens at different wavelengths

表1 理想聚焦透镜截止频率以及所设计的超构透镜的分辨率
Table 1 Cut-off frequency of ideal focusing metalens and resolution of designed metalens

Wavelength /nm	Cut-off frequency of MTF / (lp·mm ⁻¹)	Resolution of the designed metalens / (lp·mm ⁻¹)
400	250	256
470	211	203
550	182	181
625	160	161
700	143	144

计的超构透镜的分辨率在数值上基本一致,这说明波前编码稀疏孔径超构透镜经过成像恢复后可以达到传统理想透镜在非色散情况下的成像分辨率,而且实现了可见光范围内的消色差。

4 结 论

笔者基于波前编码成像原理,将三次波前编码相位叠加到稀疏孔径聚焦相位上,设计了一款消色差稀疏孔径超构透镜,实现了可见光波段的消色差成像。在成像过程中,由于波长改变引起了色散,使得除设计波长外的其他波段经过全孔径超构透镜及稀疏孔径超构透镜后产生了色散,因此成像质量严重下降。为了在可见光波段获得更加清晰的成像效果,通过周期排列的纳米柱结构对成像波前进行编码,以实现不同波长光的相位调制。在上述理论的基础上利用氮化镓材料设计了有效半孔径 R_2 为 0.35 mm、内半径 R_1 为 0.303 mm、焦距 f 为 7 mm、三次相位编码因子 α 为 20 的三次相位波前编码光学稀疏孔径超构透镜。最后分别在 400、475、550、625、700 nm 波段下对全孔径超构透镜、稀疏孔径超构透镜和消色差稀疏孔径超构透镜的 MTF 以及成像效果进行仿真,证明了基于波前编码的稀疏孔径超构透镜可以实现可见光波段的消色差成像,并且理论上可以达到全孔径下理想透镜的截止频率。

参 考 文 献

- [1] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(11): 113901.
- [2] Qian Q Y, Ti S, Wang C. All-dielectric ultra-thin metasurface angular filter[J]. Optics Letters, 2019, 44(16): 3984-3987.
- [3] She A L, Zhang S Y, Shian S, et al. Large area metalenses: design, characterization, and mass manufacturing[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1573-1585.
- [4] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses?[J]. Optica, 2019, 6(6): 805-810.
- [5] 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.
- [6] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [7] 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.
- [8] Park J S, Zhang S Y, She A L, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. Nano Letters, 2019, 19(12): 8673-8682.
- [9] Zuo R Z, Liu W W, Cheng H, et al. Breaking the diffraction limit with radially polarized light based on dielectric metalenses[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(21): 1800795.
- [10] Chen B H, Wu P C, Su V C, et al. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light[J]. Nano Letters, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [11] Dai X M, Dong F L, Zhang K, et al. Holographic super-resolution metalens for achromatic sub-wavelength focusing[J]. ACS Photonics, 2021, 8(8): 2294-2303.
- [12] 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.
- [13] Yu L G, Fan Y B, Wang Y J, et al. Spin angular momentum controlled multifunctional all-dielectric metasurface doublet[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(6): 2070035.
- [14] 廖启明, 杨静育, 王涌天, 等. 基于微纳光学元件的增强现实技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011003.
Liao Q M, Yang J Y, Wang Y T, et al. Augmented reality technology based on micro-and nano-optical elements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011003.
- [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] Liu T C, Hu J P, Zhu L L, et al. Large effective aperture metalens based on optical sparse aperture system[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(10): 100001.
- [17] Zhao F, Shen Z C, Wang D C, et al. Synthetic aperture metalens [J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2388-2397.
- [18] Lin Y, Dong Y G, Sun T, et al. High-efficiency optical sparse aperture metalens based on GaN nanobrick array[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(22): 2102756.
- [19] Cathey W T, Dowski E R. New paradigm for imaging systems[J]. Applied Optics, 2002, 41(29): 6080-6092.
- [20] Wiener N. Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series, with engineering applications[M]. Cambridge: Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, 1949.
- [21] Liu L, Jiang Y S, Wang C W. Noise analysis and image restoration for optical sparse aperture systems[C]//2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing, December 21-22, 2008, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2009: 353-356.

Achromatic Sparse Aperture Metalens Based on Wavefront Coding

Zhang Jingwei^{1,2}, Hu Jingpei^{1,2*}, Dong Yangeng^{1,2}, Zeng Aijun^{1,2}, Huang Huijie^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Optical sparse aperture technology is applied to the design and optimization of metalenses to reduce the lens processing area, increase the numerical aperture, and improve the resolution. Currently, optical sparse aperture metalenses are limited to a single wavelength, and thus are difficult to use in broadband imaging fields. There are two primary types of metalens phase modulation: transmission and geometric. Transmission phase modulation is wavelength sensitive, making it difficult to focus beams of all wavelengths simultaneously; therefore, this type of structure is unsuitable for application in wavefront-encoding achromatic metalenses. Alternatively, during geometric phase modulation, the phase delay is wavelength independent, which makes the optical system insensitive to the position of the focal plane. As a result, geometric phase wavefront-encoding technology can achieve achromatism by increasing the focal depth of the system for all wavelengths. In this study, the cubic-phase wavefront encoding method is introduced for the design of an achromatic donut-like optical sparse aperture (DOSA) metalens. After cubic phase modulation, the optical transfer function of the proposed metalens hardly changes with the defocus. Furthermore, we hope that the proposed achromatic optical sparse aperture metalens can achieve a resolution consistent with that of an ideal lens in the visible light band (400–700 nm).

Methods An achromatic optical sparse aperture metalens was designed based on the wavefront encoding method and optical sparse aperture technology. The designed metalens employed a donut-like optical sparse aperture. After passing through a fused quartz substrate, the wavefront reaches a donut-like medium layer, and the phase is modulated by periodically arranged nanopillar structures in the layer. An optimized geometric nanopillar structure was adopted to achieve greater polarization conversion efficiency at various wavelengths. In addition, cubic phase encoding based on Fourier optics was applied to preset the wavefront phase of an incoherent imaging system. When adjusting the cubic phase encoding factor, the optical transfer function (OTF) of the designed metalens barely changed with the defocus. The surface phase of the designed metalens was obtained by combining the focusing phase of the DOSA metalens with the cubic encoded phase. In addition, Wiener filtering was employed to restore the degraded images after passing through the metalens.

Results and Discussions The processing area of the designed metalens is reduced to 25% of the full-aperture transmittance metalens. Simultaneously, through the analysis of the modulation transfer functions (MTF) of the metalens at different wavelengths, the results show that the frequencies of the full-aperture and DOSA metalenses suffer severe losses at all wavelengths except 550 nm, leading to irreversible image blurring. Although the MTFs of the proposed achromatic DOSA metalens based on wavefront encoding decrease in the mid-frequency domain at all wavelengths, they are retained and can theoretically be restored (Fig. 3). To further verify the imaging quality, image formation simulations are conducted on three types of metalenses. The restored images of the full-aperture metalens at 400 nm, 470 nm, 625 nm, and 700 nm exhibit extreme minutia loss (Fig. 4). Similarly, the restored images of the DOSA metalens at 400 nm, 470 nm, and 700 nm profoundly lose minutia (Fig. 5). After wavefront encoding modulation, the quality of the restored image from the proposed metalens is basically the same at all wavelengths (Fig. 6). Consequently, this achromatic DOSA metalens not only achieves broadband achromatism, but also reduces the processing area of large-aperture metalenses.

Conclusions In this study, an achromatic DOSA metalens based on wavefront encoding is realized by the superposition of the cubic encoded phase and DOSA focusing phase, realizing achromatic imaging in the visible light band. During the imaging processes of the full-aperture and DOSA metalenses, chromatic dispersion caused by changes in the incident wavelength leads to poor image quality. To obtain more minutiae and achieve a higher resolution in the visible light band instead of at a single wavelength, cubic wavefront phase encoding is introduced to achieve the phase modulation of all wavelengths. Based on the above theories, a cubic-phase wavefront encoding DOSA metalens is designed using gallium nitride with an effective half aperture of 0.35 mm, internal radius of 0.303 mm, focal length of 7 mm, and a cubic phase encoding factor of 20. Finally, simulations including MTF and image restoration of the full-aperture metalens, DOSA metalens, and achromatic DOSA metalens are conducted at 400 nm, 475 nm, 550 nm, 625 nm, and 700 nm. It is demonstrated that the DOSA metalens based on wavefront encoding can achieve achromatic imaging in the visible light band and theoretically achieve the same cut-off frequency as the ideal full-aperture metalens. Accordingly, it has excellent value in image acquisition owing to its low processing cost, large achromatic range, and high imaging quality.

Key words optical devices; metalens; achromatism; optical sparse aperture; wavefront coding; Wiener filtering