

正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真

赵峰^{1,2*}, 陈向宁¹, 王得成¹

¹航天工程大学航天信息学院, 北京 101416;

²61618 部队, 北京 100094

摘要 从光学多维信息获取器件的小、简洁、易集成化的设计角度出发,对超透镜偏振、相位调控的原理进行分析,基于传输相位和几何相位设计了硅基正交圆偏振光同时聚焦的超透镜(工作波长为 800 nm),该器件可同时获取目标的两个正交圆偏振光强度信息。利用 x 偏振光矩形结构和 y 偏振光矩形结构的相似性简化设计流程,缩短了设计时间;选择深宽比较小和尺寸容差较大的基元结构,降低了加工工艺要求。使用有限时域差分(FDTD)软件仿真验证了器件的偏振分光 and 聚焦成像功能,超透镜在数值孔径为 0.45 时的聚焦效率为 56.2%。

关键词 表面光学; 超透镜; 偏振; 相位; 成像; 仿真

中图分类号 TH383

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1024001

Metalens Design and Simulation for Simultaneous Focusing of Orthogonal Circularly Polarized Light

Zhao Feng^{1,2*}, Chen Xiangning¹, Wang Decheng¹

¹School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

²61618 Troops, Beijing 100094, China

Abstract From the design perspective of an optical multi-dimensional information acquired device with small scale, simplicity, and easy integration, we analyze the principle of polarization and phase control of metalens, and design a metalens which can simultaneously focus Si-based orthogonal circularly polarized light based on geometry and transmission phases. The working wavelength of this metalens is 800 nm. It can simultaneously obtain two orthogonal circularly polarized light intensities of a target. The similarity between x/y polarized light rectangular structures is used to simplify the design process and reduce the design time consumption. From design perspective, we select the elementary structure with small depth-width ratio and large scale tolerance to reduce the processing difficulty. The finite difference time-domain (FDTD) simulation tool is used to verify the device function of polarization splitting and focusing imaging. The focusing efficiency is 56.2% when the numerical aperture of this metalens is 0.45.

Key words optics at surfaces; metalens; polarization; phase; imaging; simulation

OCIS codes 240.5440; 050.6624; 080.3630

1 引 言

超透镜是一种由超表面构成的平面光学器件^[1-3],能够对光的相位、振幅及偏振方向等多参量进行精确调节,具有设计灵活、质量小、平面化及结构紧凑等优点。它可以被现有的微电子加工技术制造,能够实现传统大而复杂的光学系统的集成化和平面化,具有很大的应用前景^[4-5]。偏振成像探测技术除能获取目标的传统成像信息外,还能获取目标

的偏振信息,对隐身、伪装、虚假目标具有很强的识别能力,对雾霾、烟尘、沙尘等恶劣环境下的目标具有很强的探测能力^[6-7]。目前,偏振探测设备主要利用机械调节或者变换光路的方式提取目标偏振信息,实现方式主要包括分时、分孔径及分焦面等,在质量、体积、集成化、小型化、时间分辨率等某方面存在不足^[8],制约了偏振成像器件的大规模应用。根据超透镜可以灵活调控光的偏振方向、相位等特点,Arbabi 等^[9-10]利用多种不同偏振敏感结构组成宏结

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-01-19; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 国防科技创新特区专项(18-H863-01-ZT-002-055)

* E-mail: 514954347@qq.com

构,设计制备了硅基全斯托克斯偏振成像超透镜(波长为850 nm),同时实现了偏振识别与聚焦成像,不足之处是多种结构平面拼接在一起形成的宏结构影响了聚焦效率;该组还利用椭圆形状介质柱实现了入射光相位和偏振完全被控制的具有亚波长空间分辨率和高透射率的介质超透镜(波长为915 nm)。Khorasaninejad 等^[11-13]利用几何相位原理,使用由两种偏振结构组合的宏结构实现了基于 TiO₂ 材料多光谱手性成像的超透镜,其聚焦效率理论阈值为50%;该组还利用传输相位和几何相位调控的原理,设计了基于 TiO₂ 材料可见光波长的高效率手性成像的超透镜,效率超过了50%;还利用矩阵傅里叶光学设计了紧凑型全斯托克斯偏振相机,该相机采用 TiO₂ 材料,最大深宽比较大,导致加工制备难度较大、成本较高。

综上所述,偏振成像超透镜设计灵活、结构紧凑,能够在同一平面实现两种偏振成像或全斯托克斯偏振成像,但由于传输相位调控方法对波长敏感和 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 加工工艺等限制,在宽带消色散设计、加工等方面存在困难。针对目标偏振信息获取需求和器件轻量化、集成化发展方向^[14],基于超透镜偏振成像的研究成果和遥感应用需求,本文研究了遥感波段(800 nm)的多维信息,同时获取超透镜;基于当前微电子加工工艺和硅材料禁带宽度研究硅基超透镜;基于当前加工难点,从设计角度出发降低基元结构深宽比,为下一步超透镜的加工制备和遥感应用打下基础。

2 设 计

超透镜的相位调控原理主要包括传输相位型、几何相位型、电路型及三者的任意融合。传输相位型和几何相位型超表面器件均可以利用介质材料的单层周期性结构实现;电路型超表面器件通常为金属材料的多层结构,加工复杂、透射效率较低^[15]。因而从硅材料和加工复杂度、聚焦效率等方面考虑,本文研究传输相位型和几何相位型介质超表面调控原理,并提出设计方案。

2.1 相位调控原理

1) 传输相位型

传输相位型调控原理是通过光在传输过程中产生的光程差来实现相位调控,表达式为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} d, \quad (1)$$

式中: φ 是相位差; λ 是波长; n_{eff} 是等效折射率; d 是厚度。从(1)式可知,可以通过调节厚度或者折射率实现相位差大小的调控。调节厚度时为了实现聚焦,透镜需要中心厚而边缘薄,厚度变化较大且不是平面器件,难于实现共形设计、集成化和小型化;调节等效折射率 n_{eff} 时可以保持厚度 d 不变,从而获得平面光学器件和超薄型光学器件。

传输相位型介质超表面的相位调控原理为介质等效折射理论,即采用两种或多种折射率差距较大的介质组成单元结构,通过调节单元结构内介质占空比来实现相位调制^[16]。该相位调节方法由单元结构尺寸决定,结构通常为单层结构,有利于制作透射型器件。

2) 几何相位型

几何相位也叫 Pancharatnam-Berry(PB)相位。与通过调节基元几何形状来调节相位或幅值的传输相位不同,几何相位是通过调整具有相同几何形状的天线方向角来实现相位控制的^[16-18]。假设光正向入射一个各向异性的几何结构,PB相位可利用琼斯矩阵推理,即

$$\begin{bmatrix} E_{x,\text{out}} \\ E_{y,\text{out}} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} E_{x,\text{in}} \\ E_{y,\text{in}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

如(2)式所示,假设入射光电场分解为 $E_{x,\text{in}}$ 和 $E_{y,\text{in}}$,传输矩阵为 \mathbf{T} ,则透射光电场分解为 $E_{x,\text{out}}$ 和 $E_{y,\text{out}}$ 。假设各向异性超表面基元结构的两个主轴分别是 u 和 v ,主轴 u 与 x 轴夹角为 θ , t_u 和 t_v 为两个主轴方向的复透射系数,则传输矩阵 \mathbf{T} 可以表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} t_u & 0 \\ 0 & t_v \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \theta + t_v \sin^2 \theta & (t_u - t_v) \cos \theta \sin \theta \\ (t_u - t_v) \cos \theta \sin \theta & t_u \sin^2 \theta + t_v \cos^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta)$ 为旋转矩阵。当右旋圆偏振(RCP)光入射时,透射电场可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{x,\text{out}} \\ E_{y,\text{out}} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left\{ (t_u + t_v) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + (t_u - t_v) \exp(2\theta i) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right\}. \quad (4)$$

如(4)式所示,透射光包含两部分:与入射光同相位、同旋性的复振幅为 $(t_u + t_v) \frac{1}{2\sqrt{2}}$ 的圆偏振光;与入射光旋性相反并携带几何相位为 2θ 、复振

幅为 $(t_u - t_v) \exp(2\theta i) \frac{1}{2\sqrt{2}}$ 的圆偏振光。左旋圆偏振(LCP)光入射时亦然。因此可以通过控制旋转角度实现相反旋性出射偏振光的 $0 \sim 2\pi$ 相位变化。

2.2 本文设计

为了实现正交圆偏振并能同时聚焦的超透镜,需要将 LCP 光和 RCP 光聚焦到不同的位置,聚焦示意图如图 1(a)所示。

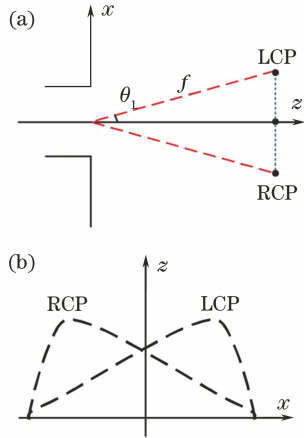


图 1 超透镜聚焦和相位示意图。(a)焦点位置;(b)目标相位
Fig. 1 Schematic of metalens focusing and phase.

(a) Focal position; (b) target phase

LCP 光和 RCP 光分别聚焦在 z 轴的两侧对称位置。 f 为焦距, LCP 与 z 轴夹角为 θ_1 , RCP 与 z 轴夹角为 $-\theta_1$, 焦点位置坐标分别为 $(f \sin \theta_1, 0, f \cos \theta_1)$ 和 $(-f \sin \theta_1, 0, f \cos \theta_1)$, 超透镜各点到两焦点的相位差分别表示为

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{LCP}} = & -\frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{(x + f \sin \theta_1)^2 + y^2 + (f \cos \theta_1)^2} - f] = \\ & -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2 + 2xf \sin \theta_1} - f), \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{RCP}} = & -\frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{(x - f \sin \theta_1)^2 + y^2 + (f \cos \theta_1)^2} - f] = \\ & -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2 - 2xf \sin \theta_1} - f). \quad (6) \end{aligned}$$

超透镜目标相位分布示意图如图 1(b)所示, 两相位曲线差异很大, 为使超透镜每一点既符合 RCP 相位分布, 又符合 LCP 相位分布, 利用几何相位对相反旋性偏振光产生相反相位差的原理, 可以通过几何相位和传输相位相结合的方式实现。传输相位(φ_P)和几何相位(θ')的计算公式分别为

$$\varphi_P = 1/2(\varphi_{\text{LCP}} + \varphi_{\text{RCP}}), \quad (7)$$

$$\theta' = 1/4(\varphi_{\text{LCP}} - \varphi_{\text{RCP}}). \quad (8)$$

几何相位由于只与基元结构的旋转方向相关, 因此比较容易设计和加工。基元结构的几何尺寸影响透射光两相反旋性分量的复振幅, 即能量比例, 为了能提高能量转换比例, 实现高效聚焦, 需要优化设计基元几何结构, 使与入射光旋性相反的透射光能量最高。

采用有限时域差分(FDTD)法设计超透镜, 具体设计流程如下。

1) 在 x 偏振光入射情况下, 利用 FDTD 软件扫描纳米柱高度、周期及结构变化时的透射相位和透射率分布, 根据能实现高透射率的 $0 \sim 2\pi$ 相位分布和相位变化速度确定高度和周期。

2) 在选定的周期和高度下, 扫描 x 偏振光入射时结构长宽变化的透射相位和透射率分布。

3) 将扫描得到的 x 偏振光透射相位和透射率分布矩阵转置得到 y 偏振光扫描结果, 这样可以节省 $1/2$ 相位扫描时间。

4) 通过计算得到左/右旋圆偏振光入射时透射光相位、透射率及转换效率分布。寻找符合 $0 \sim 2\pi$ 相位分布的最高透射率和转换效率点集合, 利用最小方差法寻找最优八阶基元。

5) 在仿真软件中建立超透镜, 利用坡印廷矢量计算聚焦效率。

超透镜的制备主要利用微电子加工工艺, 即光刻、电子束曝光、聚焦粒子束刻蚀等^[19]。大深宽比结构容易存在刻蚀深度较浅、柱子倾倒、稳定性较差等问题, 因此本文从设计角度出发, 降低微结构深宽比和加工难度, 提高了微结构的稳定性。

3 仿真实验

3.1 扫描相位透射率分布

为加快仿真速度, 采用纳米柱作为选择周期和高度的扫描结构, 只需要扫描半径变化即可得到相位和透射率信息。使用 FDTD 软件构建相位和透射率单结构扫描模型, 如图 2(a)所示, substrate-SiO₂ 指材料为 SiO₂ 的衬底, antenna-Si 指硅材料纳米柱。图 2(b)方框内为 FDTD 仿真区域; x 、 y 边界条件为周期性, z 边界条件为 PML (perfectly matched layer); source 为波长为 800 nm 的 x 偏振平面光光源; monitor 为监视器, 包括一个 z 平面监视器和一个点监视器, 分别记录透射率和相位信息。为了避免衬底谐振等影响, 衬底高度设置较大且边缘超出仿真区域。

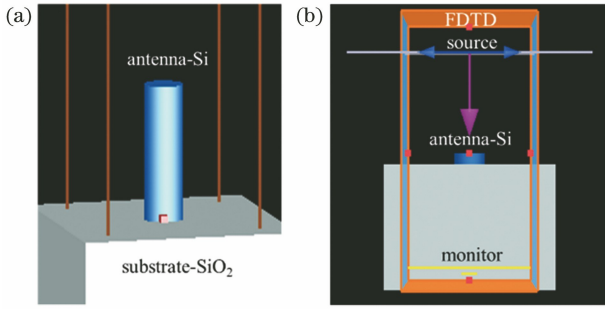


图 2 仿真模型。(a)单元结构；(b)仿真环境
Fig. 2 Simulation model. (a) Cell structure;
(b) simulation environment

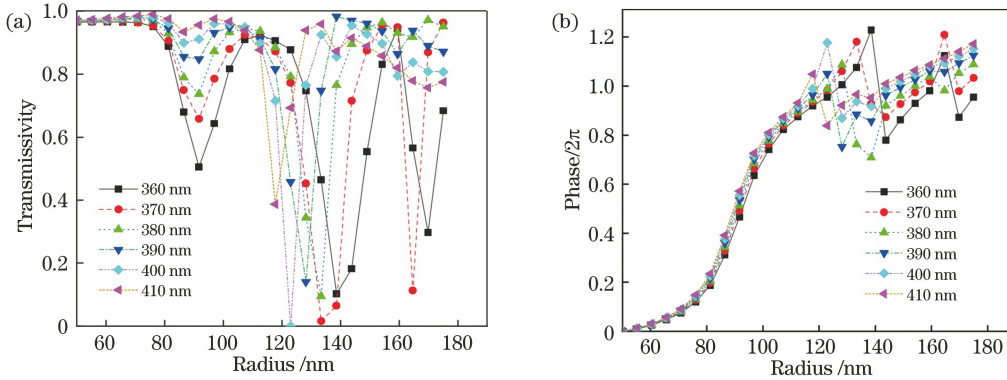


图 3 扫描结果。(a)透射率；(b)相位

Fig. 3 Scanning results. (a) Transmissivity; (b) phase

布,不同基元之间尺寸变化较大,有利于提高加工容错度。

3.2 计算最优基元

设置周期为 380 nm,高度为 400 nm,扫描 x 偏振光入射时矩形纳米柱长宽变化相位和透射率分布,如图 4(a)所示。图 4(b)为 y 偏振光入射时相位和透射率分布,由 x 偏振光相位和透射率分布转置得到。左/右旋圆偏振光扫描相位和透射率分布表达式为

$$\begin{cases} E_{LCP} = E_x + iE_y \\ E_{RCP} = E_x - iE_y \end{cases}, \quad (9)$$

式中: E_{LCP} 和 E_{RCP} 分别为左旋圆偏振光入射电场和右旋圆偏振光入射电场; E_x 和 E_y 分别为 x 轴和 y 轴的电场分量,即左/右旋圆偏振光入射可以分解为 E_x 入射和 iE_y 入射。已知 $E_{x,out}$ 和 $E_{y,out}$ 分别为 E_x 出射电场和 E_y 出射电场,则左/右旋圆偏振光入射时输出圆偏振光电场可以表示为

$$\begin{cases} E_{LCP,out} = E_{x,out} - E_{y,out} \\ E_{RCP,out} = E_{x,out} + E_{y,out} \end{cases}. \quad (10)$$

根据(10)式和 x/y 偏振光扫描结果,可以计算出任意输出圆偏振光的相位和光强。出射光中包含

为了减小深宽比,降低加工难度,高度变化范围为 350~410 nm,周期变化范围为 350~400 nm。周期为 380 nm 时对应 360~410 nm 高度的具体结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在纳米柱半径为 50~120 nm 时,相位均能满足 $0 \sim 2\pi$;透射率存在谷值,为了避免低透射率影响,选择 400 nm 作为 Si 材料高度,即深宽比最大为 4。同理,对高度为 400 nm,周期为 360~450 nm 的结构单元进行相位和透射率扫描,通过透射率、相位分布及相位变化快慢三方面因素确定周期为 380 nm。选择变化幅度较慢的相位分

左/右旋性圆偏振光,因此首先计算出透射光中与入射光相反旋性的能量比例,然后乘以总透射率(此处假设基元结构绕 z 轴旋转时的透射率为常数),结果作为目标偏振光综合输出透射率并进行排序。根据八阶划分 2π 相位,即每个基元相位变化 $\frac{\pi}{4}$ 相位,以此作为步长($\pm 7\%$)在透射率排序数组中寻找基元尺寸,最后利用八阶基元与标准基元的最小方差确定最优相位基,这样结构容差较大,结果如图 5 所示,最大深宽比为 4。

3.3 超透镜仿真

根据选定的基元,构建直径 D 为 $10 \mu\text{m}$ 、焦距 f 为 $10 \mu\text{m}$ 、数值孔径(NA)为 0.45 的超透镜来进行 FDTD 仿真,设置 z 平面监视器记录焦平面处电场信息和能量信息,光源为高斯光源,三轴边界条件全部为 PML。仿真结果如图 6 所示,可以实现 LCP 光聚焦在左侧,RCP 光聚焦在右侧,包含两种偏振光分量的线偏振(Line)光同时聚焦在左右两侧,焦距均为 $10 \mu\text{m}$ 。最后使用坡印廷矢量计算半峰全宽(FHWM)内能量比例,以得到聚焦效率,FHWM 为 $M_{FWHM} = 0.514 \frac{\lambda}{NA}$,以 3 倍 FHWM 为半径的圆内聚

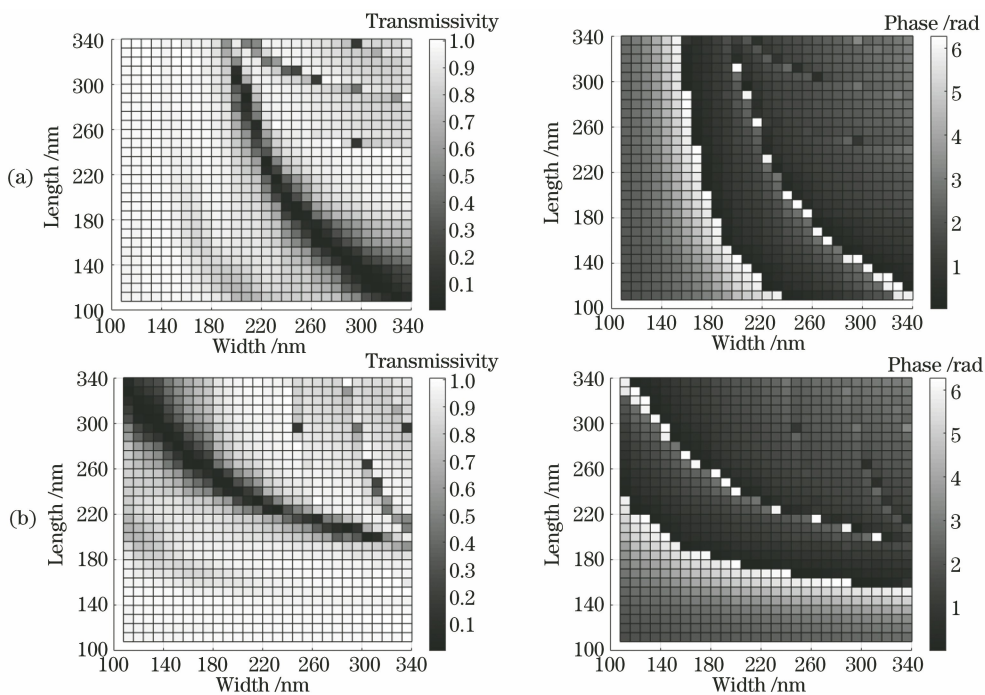


图 4 相位和透射率 (a) x 偏振光; (b) y 偏振光

Fig. 4 Phase and transmissivity. (a) x polarized light; (b) y polarized light

焦效率为 56.2%，本文设计的超透镜聚焦效率高于共面宏结构的理论聚焦效率阈值(50%)，实现了设计目标。

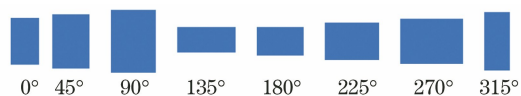


图 5 基元结构

Fig. 5 Base structure

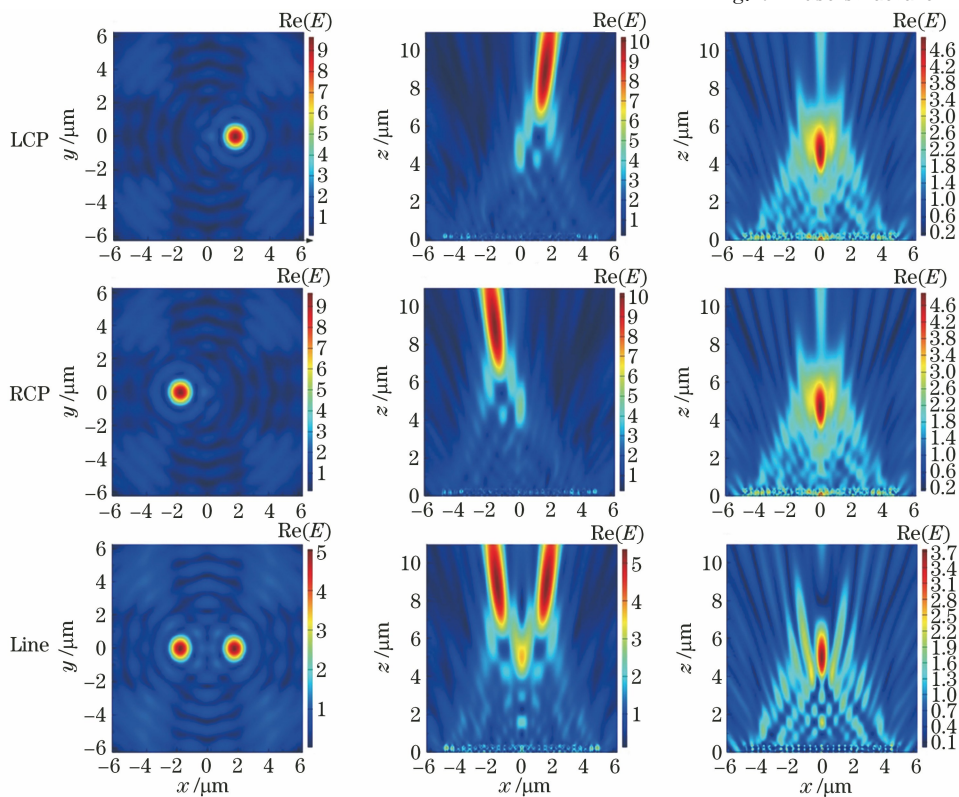


图 6 聚焦效果

Fig. 6 Focusing effect

4 结 论

针对偏振多维信息同时向获取、设计复杂度及加工难度等问题,利用传输相位和几何相位相结合的调控原理设计了波长为 800 nm 的 Si 材料超透镜。利用将纳米柱半径和 x 偏振光扫描结果转置得到 y 偏振光扫描结果的方法提高了仿真效率,节省了仿真时间;从设计角度缩小最大深宽比到 4,降低了加工难度,有利于超透镜加工制备;利用最小方差法得到最优八阶基元;利用 FDTD 仿真验证了设计效果,测得聚焦效率为 56.2%,为超透镜的快速设计、降低制备门槛提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [2] Tseng M L, Hsiao H H, Chu C H, et al. Metalenses: advances and applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(18): 1800554.
- [3] 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.
- [4] Capasso F. The future and promise of flat optics: a personal perspective [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 953-957.
- [5] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics [J]. *Nature*, 2018, 560(7720): 565-572.
- [6] Mo C H, Duan J, Fu Q, et al. Review of polarization imaging technology for international military application (II) [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 265-270.
莫春和, 段锦, 付强, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下) [J]. *红外技术*, 2014, 36(4): 265-270.
- [7] Duan J, Fu Q, Mo C H, et al. Review of polarization imaging technology for international military application (I) [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3): 190-195.
段锦, 付强, 莫春和, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上) [J]. *红外技术*, 2014, 36(3): 190-195.
- [8] Li S J, Jiang H L, Zhu J P, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2013, 6(6): 803-809.
李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 803-809.
- [9] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Full-Stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3132-3140.
- [10] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [11] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Multispectral chiral imaging with a metalens [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4595-4600.
- [12] Groeuer B, Rubin N A, Mueller J P B, et al. High-efficiency chiral meta-lens [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 7240.
- [13] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera [J]. *Science*, 2019, 365(6448): eaax1839.
- [14] Schechner Y Y, Averbuch Y. Regularized image recovery in scattering media [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(9): 1655-1660.
- [15] 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.
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.
- [16] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1041-1068.
- [17] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes [J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [18] Li X N, Zhou L, Zhao G Z. Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(23): 238101.
李晓楠, 周璐, 赵国忠. 基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束 [J]. *物理学报*, 2019, 68(23): 238101.
- [19] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Metasurfaces: fundamentals and applications of metasurfaces [J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.