

激光与光电子学进展

基于梯形结构的超表面透镜特性

刘慧敏, 陈德利, 孙晓红*

郑州大学信息工程学院河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450001

摘要 为了实现对可见光波束的自由调控,提出了一种梯形单元结构的超表面。改变硅纳米微元的上下底和宽,对传输相位进行调制,实现了在目标波长下 0 到 2π 透射相位的调控。利用该结构设计的超构表面可以同时在线偏振光和圆偏振光进行调控,实现了在波长为 640 nm 线偏振光和圆偏振光入射下的聚焦。此外,研究了聚焦特性以及在线偏振光入射下晶格周期对聚焦特性的影响。该项工作为基于超表面结构设计的集成光学提供了新的思路。

关键词 光学设计与制造; 超表面; 聚焦; 超透镜; 可见光; 电介质

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1722003

Characteristics of Metasurface Lens Based on Trapezoid Structure

Liu Huimin, Chen Deli, Sun Xiaohong*

Henan Key Laboratory of Laser and Optoelectronic Information Technology, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract A metasurface with a trapezoidal unit structure is proposed to realize the free regulation of visible light beams. To achieve the adjustment from 0 to 2π transmission phase at the target wavelength, the upper and lower bases and width of the silicon nanocells are changed, and the transmission phase is modulated. The metasurface designed with this structure can control linearly and circularly polarized lights simultaneously and realize focusing under the incidence of both linearly and circularly polarized lights with a wavelength of 640 nm. Additionally, under the incidence of linear polarized light, the focusing characteristics and the influence of the lattice period on these characteristics are studied. This research proposes new ideas for the integrated optics based on the design of metasurface structures.

Key words optical design and fabrication; metasurface; focus; metalens; visible light; dielectric

1 引言

超表面是近年来发展起来的一种由亚波长单元结构组成的二维超材料^[1],主要根据几何相位^[2]与传输相位对电磁波进行调控,可以作为超薄光学器件来实现对电磁波偏振、振幅、相位、极化方式和传播模式等特性的灵活有效调控^[3-5]。2011年Yu等^[6]提出了超表面结构的定义、引入了相位梯度的概念、提出了广义斯涅耳定律。2013年Ni等^[7]展示了一种基于v形金纳米天线阵列组成的超表面,实现了可见光波长下的聚焦透镜。2016年Khorasaninejad等^[8]利用圆柱形状的硅纳米天线设计了一种对偏振态不敏感的高效超表面透镜结构,可在入射波长为红色(660 nm)、绿色(532 nm)、蓝色(405 nm)三基色时都实现聚焦。2018年Wang^[9]

的研究团队设计了一种在透射模式下实现在整个可见光区域工作的消色差透镜。2021年Wang等^[10]展示了一种双焦点的透镜。随着研究的不断深入,许多不同类型的超表面结构被提出:通过控制电磁波的波前来实现异常折射^[11]、偏振转换、透镜^[12-13]、轨道角动量^[14]、全息图^[15]等。

超表面的研究前期主要集中在亚波长金属结构,然而金属结构存在欧姆损耗,尤其在可见光波段,限制了很多功能。相比于金属超表面,由低损耗、高折射率介质组成的超表面能够提供更高的效率,在最近几年中受到了广泛关注。通过控制介质谐振器的几何结构和空间间距,能够有效地调控电磁谐振,使其超越金属超表面实现更好的性能。虽然超表面的研究已经取得了很大的进展,但是介质谐振器的形状基本集中在长

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2021-12-02; 录用日期: 2021-12-21

基金项目: 河南省重大科技专项(161100210200)、河南省激光与光电信息技术重点实验室基金(22110002)

通信作者: *iexhsun@zzu.edu.cn

方体^[16]和圆柱^[17]结构,通常只有一个或者两个参数用于调控波前。本文提出了一种新的结构:梯形结构,丰富了介质谐振器的形状,使用该结构可以变换梯形的上底、下底、宽度 3 个参数实现电磁波的调控。提出的梯形结构可以同时实现在目标波长下对线偏振光和圆偏振光的调控。为了证明可以对波前进行调控,分别对 TM 线偏振光和右旋圆偏振光设计了相应的透镜。

2 基本原理

2.1 超构透镜设计原理

透镜作为光学系统中必不可少的元件,在光学应用中发挥着重要作用,然而传统透镜笨重,极大限制了集成光学的发展。基于超表面结构的透镜可以显著简化传统透镜。本文设计了一个通过控制梯形结构的相位来实现平面聚焦的透镜,其工作波长为 640 nm。超表面单元的相位补偿可以表示为

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

$$\text{NA} = \sin(\tan^{-1} \frac{D}{2f}), \quad (2)$$

式中:\$(x, y)\$ 是每个单元结构的位置坐标; \$\lambda\$ 是入射光的波长; \$f\$ 是透镜的焦距。可以通过数值孔径(NA)来衡量聚焦效果,数值孔径的计算如式(2),其中 \$D\$ 是透镜的直径。

2.2 超构单元结构仿真

如图 1 所示,超透镜的单元结构由 \$\text{SiO}_2\$ 衬底和高折射率的晶体 Si 纳米柱两部分组成。Si 纳米柱为梯形结构,其俯视图为直角梯形,放置在长方体衬底上表

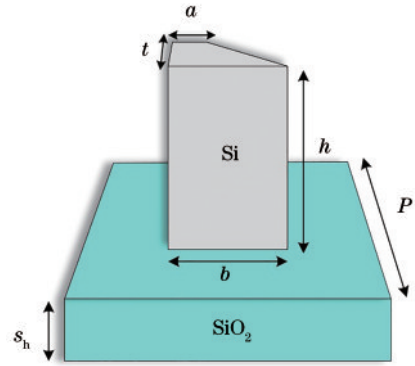


图 1 超透镜的单元结构图

Fig. 1 Unit structure of metalens

面的中心。高折射率的 Si 柱能够将光能量束缚在设计结构内,避免相邻单元之间的耦合。通过调整上底 \$a\$、下底 \$b\$、宽度 \$t\$ 可以得到 \$0 \sim 2\pi\$ 范围内不连续相位梯度分布。

为了得到高效率的相位调控微元,选择衬底的高度 \$s_h = 200\$ nm。针对可见光工作波段柱的高度设计为 \$h = 400\$ nm,以保证产生的传输相位能够覆盖 \$2\pi\$。当晶格的周期 \$P\$ 为 200 nm 时,仿真所有单元结构,图 2(a)、2(b)分别是当入射 640 nm 的 TM 波,偏振态不发生变化的相位和透射率;图 3(a)、3(b)分别是当入射 640 nm 的右旋圆偏振光,偏振态发生变化的相位与透射率。可以看出不管是线偏振还是圆偏振入射,变换单元结构的尺寸都可以覆盖 \$2\pi\$ 的相位变化,并且有较高的透射率。

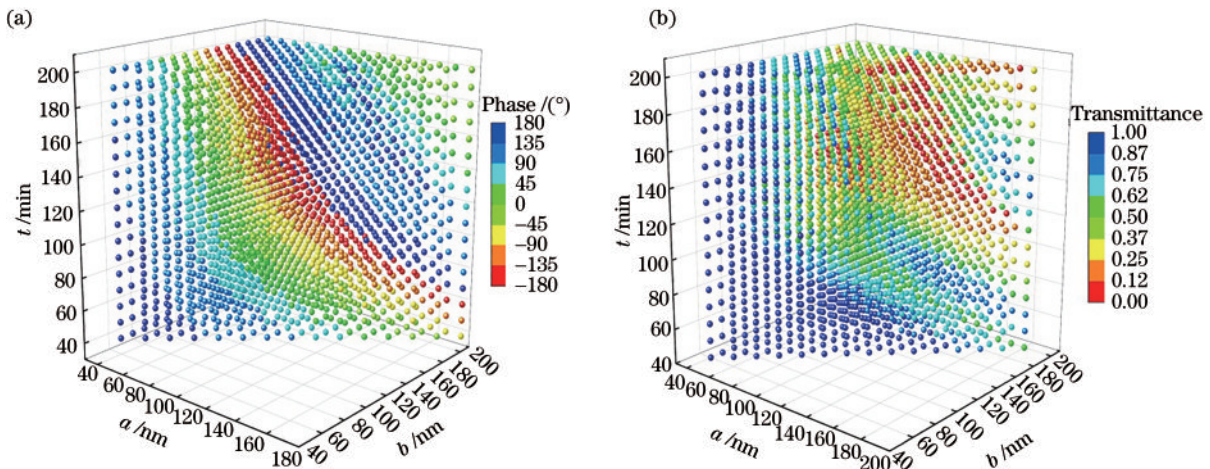


图 2 线偏振光入射时的(a)微元结构参数与相位和(b)微元结构参数与透射率

Fig. 2 (a) Structure parameters and phases and (b) structure parameters and transmittance when linearly polarized light is incident

3 分析与讨论

3.1 线偏振入射下的透镜

3.1.1 晶格周期为 200 nm 的聚焦透镜

对于晶格周期为 200 nm 的透镜来说,要想实现 \$2\pi\$

的相位覆盖,至少需要 13 个单元结构。调整硅柱的上底 \$a\$、下底 \$b\$、宽度 \$t\$ 值找到符合式(1)的相位,选出当入射 640 nm 的 TM 波时透射率较高的结构,各个单元结构的相位及透射率如图 4 所示。

为了节省仿真内存和时间,只对单排结构进行仿

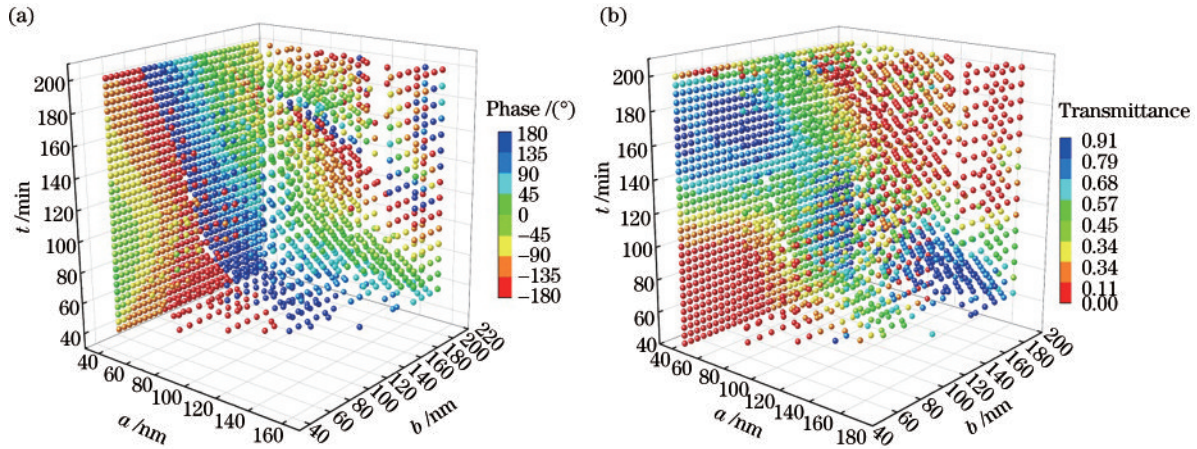


图3 圆偏振光入射时的(a)微元结构参数与相位和(b)微元结构参数与透射率

Fig. 3 (a) Structure parameters and phases and (b) structure parameters and transmittance when circularly polarized light is incident

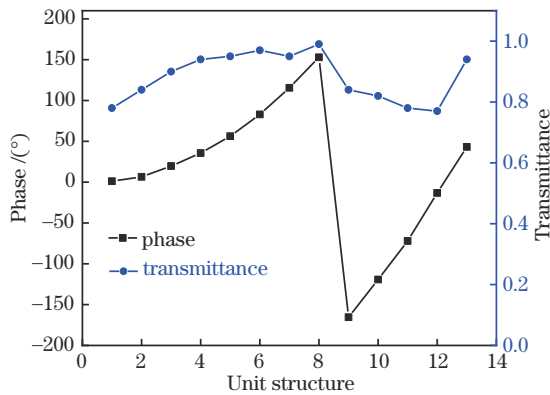


图4 周期为 200 nm 的单排结构下各个结构的相位和透射率
Fig. 4 Phase and transmittance of each structure in a single-row structure with period of 200 nm

真分析,根据一维纵向场强分布图 5(a)可以发现,能量最大值在 3610 nm 处,所以仿真的焦距为 3610 nm,和理论设置的焦距 4000 nm 对比,误差约为 10%。图 5(b)、5(c)分别为单排结构聚焦的半峰全宽 (FWHM) 和能量分布。聚焦效率为焦平面能量与入

射平面能量的比值,焦平面为长为 FWHM 的 3 倍、宽为衬底宽度所组成的平面,求得效率 $\eta=0.47$ 。根据式 (2) 计算的数值孔径 NA 为 0.55,根据仿真焦距 3610 nm,计算得到的 NA 为 0.58。

3.1.2 不同晶格周期聚焦透镜特性的分析

为了分析不同周期对聚焦效果的影响,分别仿真了周期 P 为 250、300 nm 的单排结构。图 6 为 $P=250$ nm 和 $P=300$ nm 单排单元结构的相位和透射率。根据图 7(a) 一维纵向场强分布图得出 $P=250$ nm 单排结构仿真的焦距为 3120 nm,图 7(b)、7(c)分别为 $P=250$ nm 单排结构聚焦的 FWHM 和能量分布。根据图 8(a) 一维纵向场强分布图得出 $P=300$ nm 单排结构仿真的焦距为 2610 nm,图 8(b)、8(c)分别为 $P=300$ nm 单排结构聚焦的 FWHM 和能量分布。根据式 (2) 计算得到 $P=250$ nm 和 $P=300$ nm 时 NA 分别为 0.63 和 0.68。效率 η 分别为 0.43 和 0.42。为了直观地看出不同晶格周期单排结构仿真的效果,将实际焦距 F 、FWHM、NA、 η 汇总到表 1。

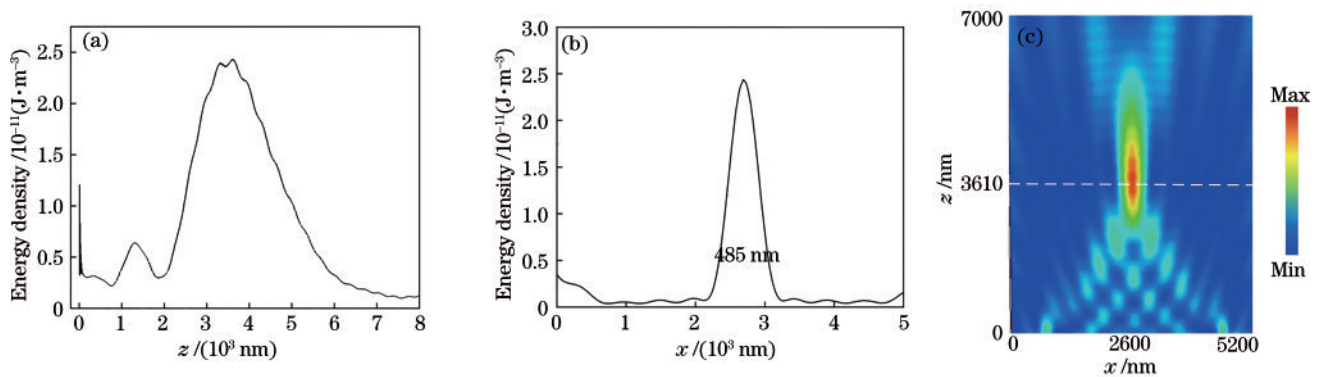


图5 周期为 200 nm 的单排结构聚焦效果。(a)一维纵向场强;(b) FWHM;(c)能量分布

Fig. 5 Focusing effect of single-row structure with period of 200 nm. (a) One-dimensional longitudinal field strength; (b) full width at half maximum (FWHM); (c) energy distribution

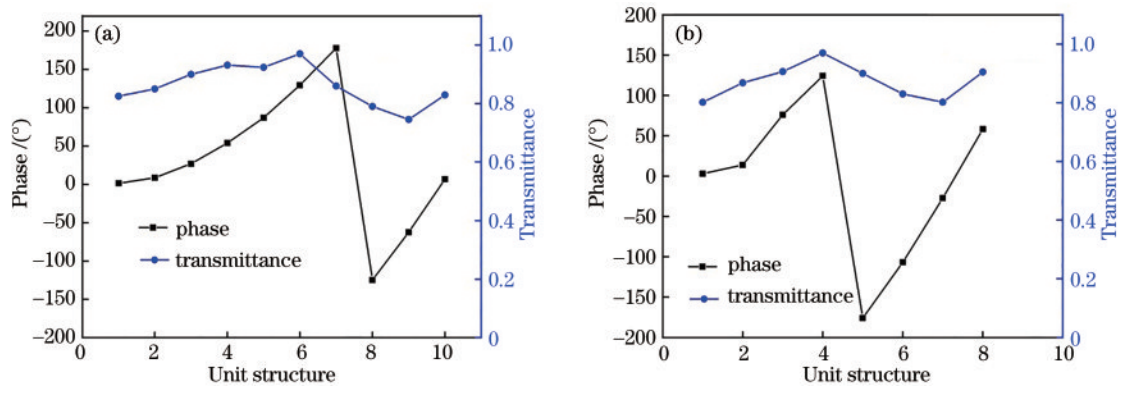


图 6 不同周期的单排结构下各个结构的相位和透射率。(a)周期为 250 nm;(b)周期为 300 nm

Fig. 6 Phase and transmittance of each structure under single-row structure with different periods. (a) Period is 250 nm; (b) period is 300 nm

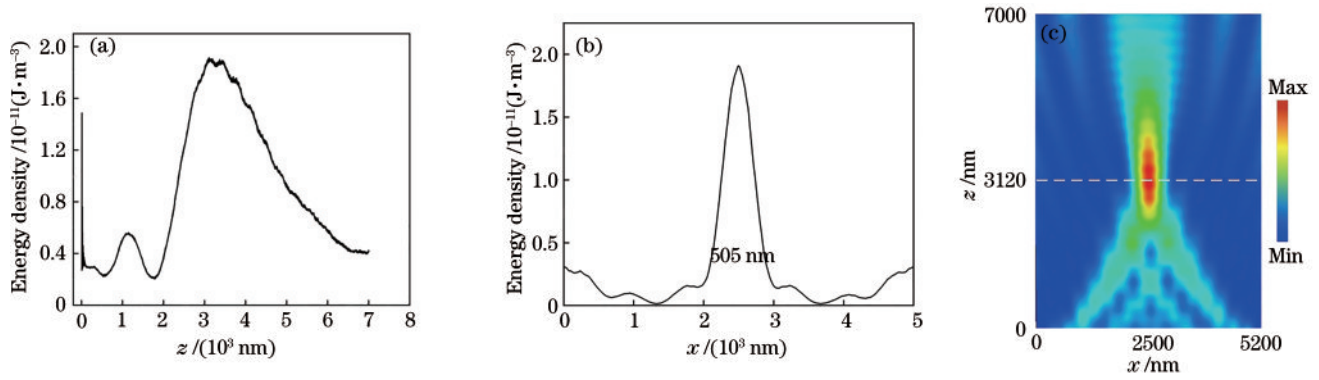


图 7 周期为 250 nm 的单排结构聚焦效果。(a)一维纵向场强;(b)FWHM;(c)能量分布

Fig. 7 Focusing effect of single-row structure with period of 250 nm. (a) One-dimensional longitudinal field strength; (b) FWHM; (c) energy distribution

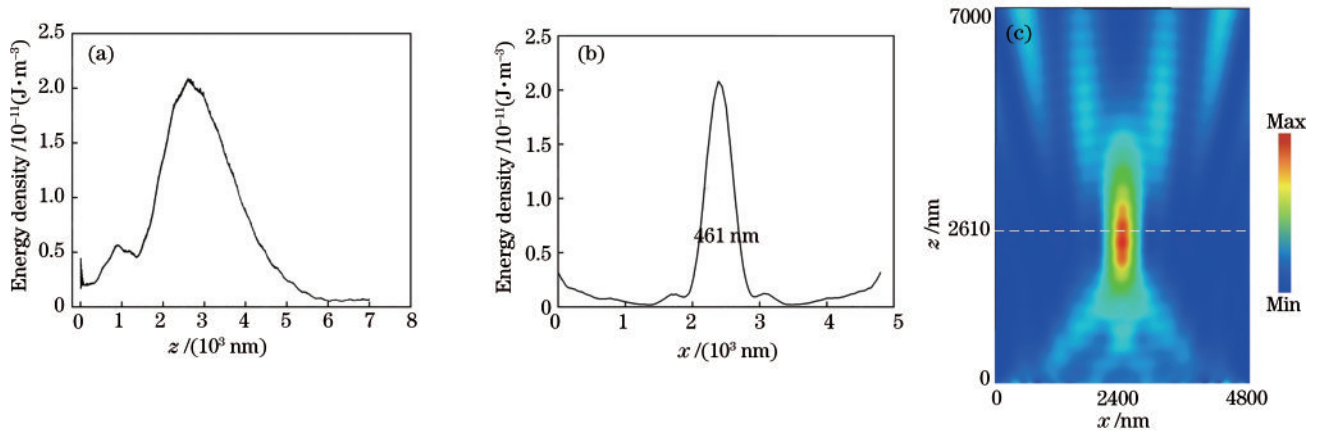


图 8 周期为 300 nm 的单排结构聚焦效果。(a)一维纵向场强;(b)FWHM;(c)能量分布

Fig. 8 Focusing effect of single-row structure with period of 300 nm. (a) One-dimensional longitudinal field strength; (b) FWHM; (c) energy distribution

表 1 不同晶格周期单排结构仿真结果

Table 1 Single-row structure simulation results with different lattice periods

Period /nm	200	250	300
F /nm	3610	3120	2610
FWHM /nm	485	505	461
NA	0.58	0.63	0.68
η	0.47	0.43	0.42

3.2 圆偏振入射下的透镜

使用晶格周期为 200 nm 的单元结构,设计了在 640 nm 的右旋圆偏振入射下的单排结构。如图 9 为选择单元结构的相位与转换率。仿真结果如图 10 所示,根据图 10(a)一维纵向场强分布图得出 $P=200$ nm 单排结构仿真的焦距为 3580 nm,根据式(2)计算的 NA 为 0.59。图 10(b)、10(c)分别为 $P=$

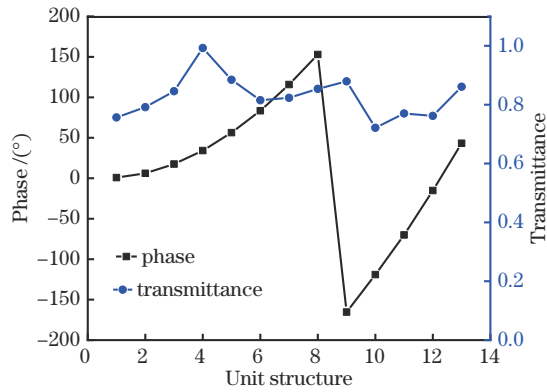


图 9 周期为 200 nm 的单排结构下各个结构的相位和透射率
Fig. 9 Phase and transmittance of each structure in single-row structure with period of 200 nm

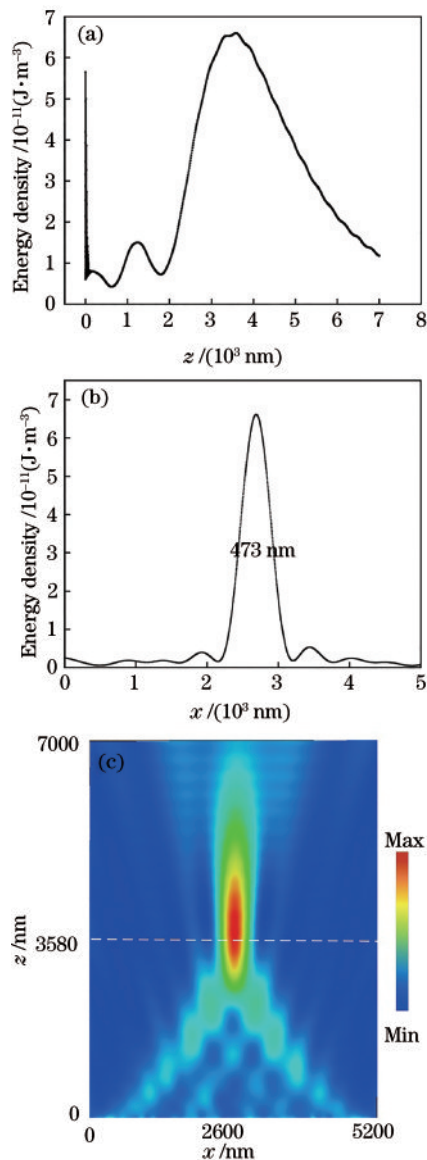


图 10 周期为 200 nm 的单排结构聚焦效果。(a)一维纵向场强;(b)FWHM;(c)能量分布
Fig. 10 Focusing effect of single-row structure with period of 200 nm. (a) One-dimensional longitudinal field strength; (b) FWHM; (c) energy distribution

200 nm 单排结构聚焦的 FWHM 和能量分布。聚焦效率 $\eta=0.39$ 。

4 结 论

设计了一种新的梯形结构来调控可见光:该结构丰富的参数可以灵活地实现对电磁波的调控,也丰富了超表面单元结构的形状。仿真证实梯形结构既可以对线偏振光调控也可以对圆偏振光调控。发现不同周期的单排结构的 FWHM 值都小于入射的波长,从而得知该结构可以实现亚波长的聚焦,但是最好的效率仅接近 0.5,下一步的研究重点是如何利用梯形结构提高聚焦效率。

参 考 文 献

- [1] Dong G X, Shi H Y, Xia S, et al. Ultra-broadband perfect cross polarization conversion metasurface[J]. Optics Communications, 2016, 365: 108-112.
- [2] Chantakit T, Schlickriede C, Sain B, et al. All-dielectric silicon metalens for two-dimensional particle manipulation in optical tweezers[J]. Photonics Research, 2020, 8(9): 1435-1400.
- [3] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [4] Ning R X, Jiao Z, Bao J. Narrow and dual-band tunable absorption of a composite structure with a graphene metasurface[J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(10): 107801.
- [5] Jalil S A, Akram M, Yoon G, et al. High refractive index Ti_3O_5 films for dielectric metasurfaces[J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(8): 088102.
- [6] 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.
- [7] Ni X, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. Light: Science & Applications, 2013, 2(4): e72.
- [8] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [9] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 227-232.
- [10] Wang H Y, Zhang Z Y, Zhao K, et al. Independent phase manipulation of co- and cross-polarizations with all-dielectric metasurface[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(5): 053601.
- [11] Jiang Z H, Yun S, Lin L, et al. Tailoring dispersion for broadband low-loss optical metamaterials using deep-subwavelength inclusions[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1571.
- [12] 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.
- [13] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-

- dielectric subwavelength metasurface focusing lens[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 26212-26221.
- [14] Li J, Zheng C L, Wang G C, et al. Circular dichroism-like response of terahertz wave caused by phase manipulation via all-silicon metasurface[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 567-573.
- [15] Ren H, Fang X, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(11): 948-955.
- [16] Chen D L, Wang J J, Qi Y L, et al. Polarization-insensitive dielectric metalenses with different numerical apertures and off-axis focusing characteristics[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(12): 3588-3595.
- [17] Wang S M, Sun X H, Chen D L, et al. GaP-based high-efficiency elliptical cylinder metasurface in visible light[J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(5): 057801.