

文章编号: 1001-3806(2018)05-0681-06

基于超表面的宽波段光束聚焦研究

胡晨曦, 王吉明*, 吴彤, 赫崇君, 顾晓蓉, 刘友文
(南京航空航天大学理学院应用物理系, 南京 211106)

摘要: 超表面是一种基于亚波长结构的光学平板膜层,可在亚波长传输范围内调控入射光束的相位、振幅和偏振。为了代替传统的曲面光学元件,采用传输相位调控理论和广义折反射定律,设计了一种新型的超表面,并进行了程序模拟,取得了此亚波长结构对光束聚焦调控的数据。结果表明,当增加超表面的椭圆基元的长短轴长度时,材料的等效折射率增加,并且适用的波长范围增加到 $0.7\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$;通过优化超表面结构参量,可实现在宽波段范围内的相位调控,进而获得聚焦光场的优化,在一定程度上可以代替传统光学元件实现光学聚焦。该研究结果在超分辨率成像及光刻等方面有一定参考价值,在一些特殊的需要亚波长结构调控光束的情况下可以使光路简单化,并且比传统的光学元件有着厚度方面的优势。

关键词: 光学器件; 超表面; 时域有限差分法; 广义折射和反射定律

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.05.018

Study on focusing of wideband beam based on metasurface

HU Chenxi, WANG Jiming, WU Tong, HE Chongjun, GU Xiaorong, LIU Youwen

(Department of Applied Physics, College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Meta-surface is optical flat film based on sub-wavelength structure, which can regulate phase, amplitude and polarization of incident beam in sub-wavelength range. In order to replace the traditional surface optical elements, one new type of meta-surface was designed by using the transmission phase regulation theory and the generalized reflection law. Program simulation was carried out and the data of beam focused and regulated by the sub-wavelength structure were obtained. The results show that, when the length of long and short axis of elliptical element of meta-surface is longer, equivalent refractive index of material increases at the same time and the applicable wavelength range increases to $0.7\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$. By optimizing the meta-surface structure parameters, phase regulation within wide wave band can be realized, and the optimization of the focused light field can be obtained. To a certain extent, it can replace traditional optical elements to realize optical focusing. The results have some reference value in super-resolution imaging and photolithography. It can simplify the optical path in some special demands that sub-wavelength structure can regulate the beams. Compared with the traditional optical elements, meta-surface has the advantages of thickness.

Key words: optical devices; metasurface; finite-difference time-domain method; the generalized law of refraction and reflection

引言

传统光学元件利用材料折射率差异或表面变化来实现特定的相位分布,因此其器件体积重量通常较大。近年来提出的亚波长结构电磁调控技术,具有设计灵

活、多参量操控和亚波长尺度的精确电磁调制能力等特点^[1],在亚波长电磁学、表面等离子体光学、超构材料等多个新兴的领域受到广泛关注。超构材料^[2]一般是指典型的基于亚波长结构构建的人工结构材料。当对亚波长结构材料进行深入研究时,可将3维超构材料压缩到2维,如基于等离子体天线、纳米晶体、介质柱等微元的超表面^[3]。作为一种平面化的结构平面,超表面器件有望在集成光学或微光学系统等特定领域,取代传统的曲面光学组件,实现对光束进行聚焦、偏振调控等^[4-7],从而降低系统的复杂程度和提高系统的可靠性。超表面的介质谐振腔须满足以下要

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(NS2016072)

作者简介:胡晨曦(1993-),男,硕士研究生,现主要从事矢量光学和超表面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:jimingw@nuaa.edu.cn

收稿日期:2017-11-16;收到修改稿日期:2017-12-06

求:具有亚波长厚度;相位响应覆盖整个 2π 范围;各阵列中散射振幅须一样大^[8]。在一些新型的超表面在表面基元不变的情况下,同时对整个基底平面进行一些弯折,也可以以此来提高聚焦的效率^[9]。并且由于微纳加工技术的发展,使得超表面的理论、加工及其实际应用得到了快速的发展,不断有新型超薄超表面的设计和应用也被提出来^[10]。

本文中主要工作是构建一个具有亚波长基元结构的超表面,通过调节表面基元结构参量,调控通过的电磁波相位,来达到在较宽的波段上实现光束聚焦的目的。

1 超表面相位调控理论

超表面实质就是利用带有亚波长分离和空间变化的几何参量的阵列来形成一个随着空间变化的光学响应,以此塑造光的波阵面。根据惠更斯原理,界面上每一个点创建一个球面波,波的干扰形成了新的波阵面^[11]。为研究超表面中反射和折射的现象,引入广义反射折射定律^[12]。

如图 1 所示,从 A 点出发的光线,经过界面处不同位置 C 和 D 到达 B 点,可以获得相同相移,即光线经 ACB 和 ADB 两种路径的相移量相同,表示为^[13]:

$$k_0 n_i \sin\theta_i dx + (\Phi + d\Phi) = k_0 n_i \sin\theta_i dx + \Phi \quad (1)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 是真空中波长, θ_i 是折射角; $\Phi, d\Phi$ 分别是两种路径通过界面产生的不连续相位; dx 是两点的距离差; n_i 和 n_t 分别是两个界面的折射率;相位突变量的梯度表示为 $d\Phi/dx$, 得到广义折射定律:

$$n_t \sin\theta_t - n_i \sin\theta_i = \frac{\lambda_0 d\Phi}{2\pi dx} \quad (2)$$

同样可以得到广义反射定律^[14]:

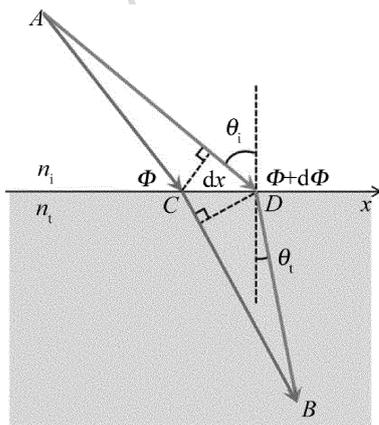


Fig. 1 Schematic of the generalized refraction and reflection law

$$\sin\theta_r - \sin\theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx} \quad (3)$$

在 n_i 和 n_t 界面上的相位突变量 Φ , 在 x 方向以一定梯度分布,即在界面存在相位突变梯度,即 $d\Phi/dx$ ^[15]。根据沿界面的波矢的概念,此处折射和反射光束中的波矢等于相位梯度。

通过调控电磁波通过介质的传输过程中产生的光程差,可以用来产生所需电磁波的波前。设此介质折射率为 n , 当波长为 λ_0 的电磁波在该均匀介质中传输一定的距离 d , 则此光束积累的传输过程中产生的相位是:

$$\Phi = nk_0 d \quad (4)$$

对于传统的相位型光学元件,为获得所需波前,通常是利用厚度 d 随空间变化的特点,采取曲面型来获得相位的调节,但足够的相位差一般需要 d 变化较大。根据广义折射与反射定律,可以在厚度不变的情况下,通过改变超表面的结构,来调节等效折射率 n 。以下使用 SiO_2 基底上的椭圆硅柱阵列结构,通过改变单元结构中的比例,如调整线宽使得排列介质的占空比改变,从而实现传输相位的调节。

2 基于超表面的聚焦调控

为实现大规模集成处理光路,研究人员已提出多种有效的介质结构来替代透镜^[16],但制造困难。为解决金属型超表面的表面损耗问题,ARBABI 教授^[17]在 2015 中提出了一种微米厚的高对比超表面,通过在基底上添加圆柱型的柱可以提高光束聚焦的传输效率,但适用波长从 1450nm ~ 1550nm。在这之后他们也对于长短比进行了改变,将圆柱型 Si 柱改为椭圆型 Si 柱,但是其适用范围局限在近红外 915nm 处。因此作者在其工作基础上,进一步改进基元结构,通过调整基元长短比和之间间距,用以实现较宽波带下的相位调控,以增大可适用的波长范围。

图 2 是超表面的示意图以及当入射线偏振光垂直照射以后的结果。将高折射率介质散射体定位在周期性亚波长 2 维晶格上的超表面,详细结构如图 3 所示。基底是高度为 $0.65\mu\text{m}$ 的 SiO_2 , 表面的基元为高度 $0.715\mu\text{m}$ 的椭圆型 Si 柱。每个椭圆型 Si 柱之间横向间距是 $0.5\mu\text{m}$;纵向和斜向分布 Si 柱间距是 $0.4\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$;排列分布时中心的基元相对密集,而越往边缘分布的相应稀疏;而且 4 个象限的长轴倾角是在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 对称分布,共是 291 个椭圆型 Si 柱单元。而其高指数导致散射体之间的相互作用可以忽略不计,所以光在每个位置的发散主要由每个基元决定^[18],而不是

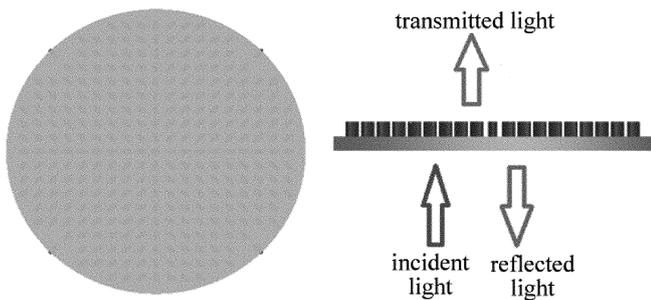


Fig. 2 Metasurface's cross-sectional schematic

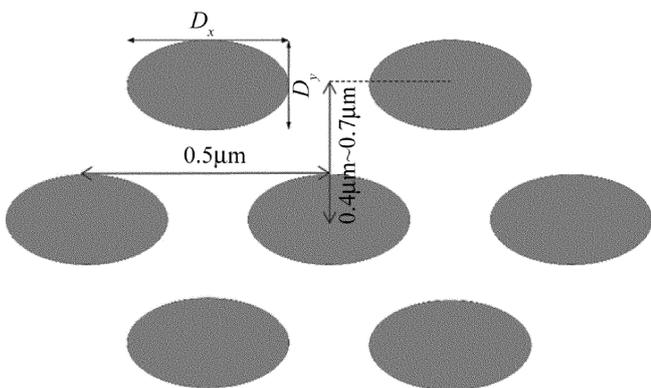


Fig. 3 Schematic of ellipse Si column

相互之间的耦合产生的共同作用^[19]。作者通过模拟确定了 4 个象限的长轴倾角并且与中心对称分布,这样只需要改变基元椭圆的线宽控制传输相位,已知可实现对聚焦位置的改变^[20]。

根据超表面相位调控理论,设计的结构通过改变线宽以调整等效折射率,从而改变传输相位。近几年,国内外研究人员主要使用时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) Solutions 软件^[21]对全介质型的超表面进行仿真研究,来分析各波段电磁波与具有亚波长典型尺寸复杂结构的相互作用,报道的仿真结果与实验结果相吻合。作者在此用 FDTD Solutions 软件对结构中 D_x 和 D_y 改变对光束会聚的影响、在不同波长下聚焦结果的不同做了仿真分析。

2.1 单一波长下, D_x 和 D_y 改变对光斑大小和透射率的研究

对波长 $\lambda = 915\text{nm}$ 、偏振方向为 x 方向的平面光通过超表面进行模拟,在结构后聚焦位置 $f = 40\mu\text{m}$ 处对通过的光线进行分析,结果如图 4 所示。色柱是焦平面光强和入射光强的比值。从图中可以看出,当 $D_x = 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 0.2\mu\text{m}$ 时,中心光斑直径约为 $4.2\mu\text{m}$,透射率为 46.3%;当 $D_x = 0.15\mu\text{m}$, $D_y = 0.3\mu\text{m}$ 时,中心光斑直径约为 $4.4\mu\text{m}$,透射率为 41.9%;当 $D_x = 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 0.3\mu\text{m}$ 时,边缘位置光束没有收束到中心区域,在 $D_x = 2\mu\text{m}$, $D_y = 0.3\mu\text{m}$ 也可以看出光斑直径

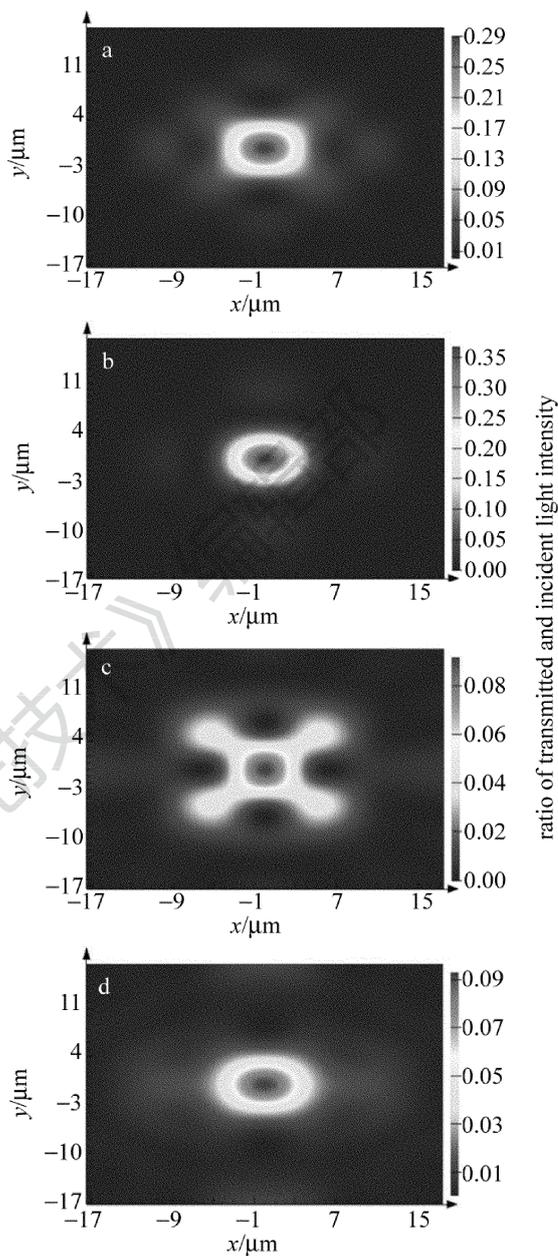


Fig. 4 Light intensity distribution at different D_x and D_y ($\lambda = 915\text{nm}$, $f = 40\mu\text{m}$)

a— $D_x = 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 0.2\mu\text{m}$ b— $D_x = 0.15\mu\text{m}$, $D_y = 0.3\mu\text{m}$
c— $D_x = 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 0.3\mu\text{m}$ d— $D_x = 0.2\mu\text{m}$, $D_y = 0.3\mu\text{m}$

变大。在 D_x 一定时,增大 D_y 的长度,线宽对应增大,导致传输相位变大,在边缘位置这种相位的改变没有靠近中心区域明显,导致没有收束;同理在 D_y 一定时,改变 D_x 可以得出相应结论。所以在经过一系列调试,当 D_x 和 D_y 直径偏小时,光线在亚红外附近聚焦效果比较好,相对光斑直径较小。

2.2 在 D_x 和 D_y 一定的情况下,波长对于光斑大小和透射率的影响

2.2.1 $D_x = 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 0.2\mu\text{m}$ 的椭圆非晶 Si 柱的

超表面 可以从图 5 看出,除了主聚焦点,旁边还分散着 4 个光强偏弱的聚焦点。这说明了由于波长小于椭圆非晶 Si 柱的间距,导致光束在通过部分区域时,周期性对称分布的波阵面相互未发生干涉,使得每一个区域单独聚焦形成了分别的聚焦点。

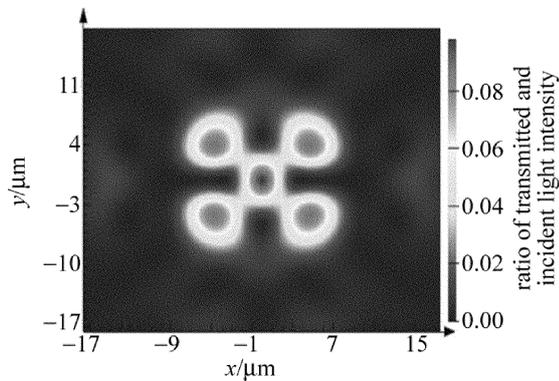


Fig. 5 Light intensity distribution in focal volume($\lambda = 700\text{nm}$, $f=40\mu\text{m}$)

当 $\lambda = 720\text{nm}$ 时,可以从图 6 看出,旁边的微弱的聚焦点收束到了中心区域,使得聚焦效果变好,光斑大小变小,但是周围区域仍有光束未收束到中心区域。

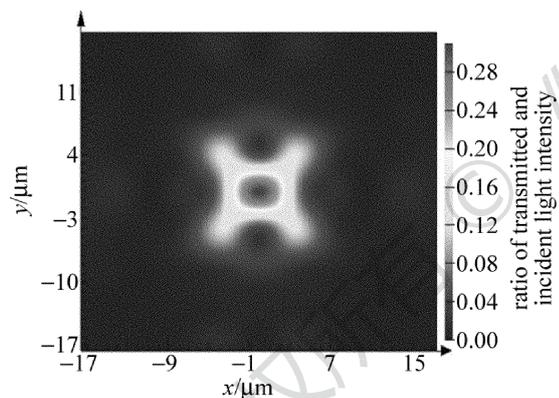


Fig. 6 Light intensity distribution ($\lambda = 720\text{nm}$, $f=40\mu\text{m}$)

随着波长进一步增大,单一光束在通过每个区域椭圆非晶 Si 柱之后,互相的干涉变强,使得光束汇聚作用变强,如图 7 所示。

如图 8 所示,当波长进一步变大时,光斑又开始变大,汇聚效果不明显,尤其在超过波长 915nm 之后,因为部分区域光束波长已经近似等于椭圆非晶 Si 柱的规格,使得光束并没有通过散射体进行中心方向偏折,导致汇聚效果失效。

图 9 中横坐标代表着入射光的波长,左边的纵坐标代表着透射率,而右边的代表了相应的聚焦直径。可以看出,随着波长的逐步增加,透射率也随之升高,波长平均增加 50nm,透射率平均提高 14%,聚焦的效果也最好。在 $\lambda = 770\text{nm}$ 附近汇聚效果最好,然后光

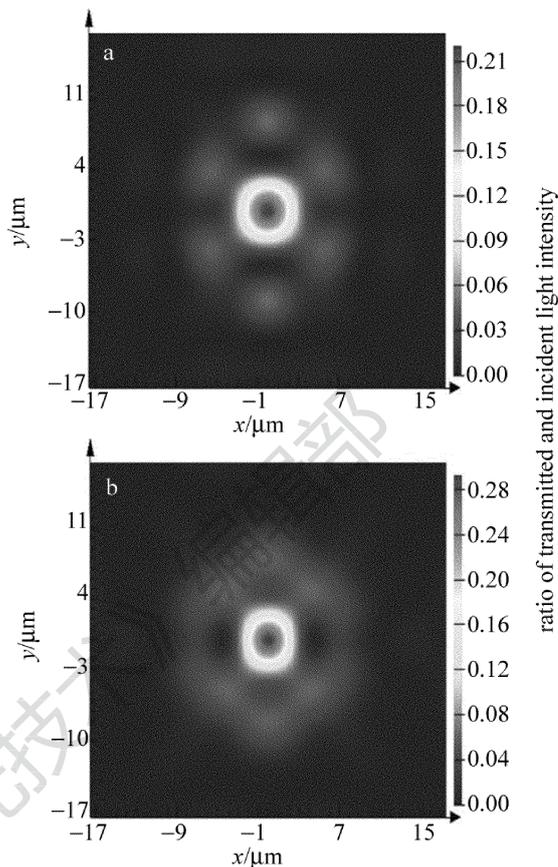


Fig. 7 Light intensity distribution
a— $\lambda = 740\text{nm}$ b— $\lambda = 770\text{nm}$

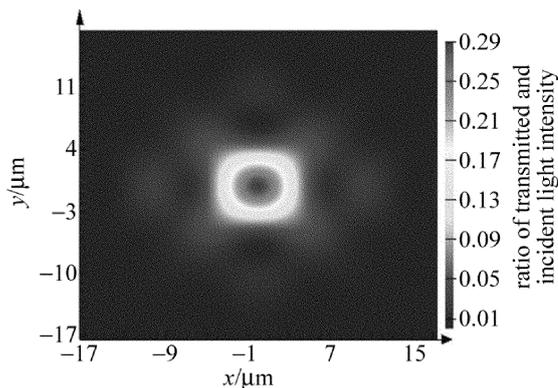


Fig. 8 Light intensity distribution($\lambda = 915\text{nm}$)

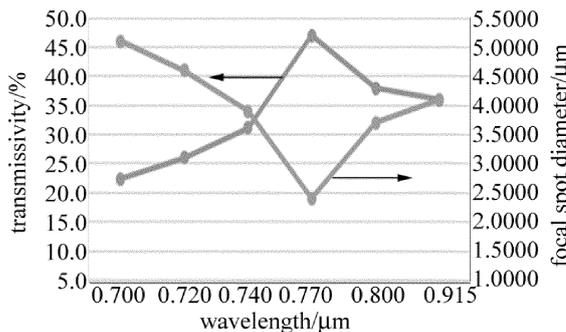


Fig. 9 Relationship of transmissivity, focal spot diameter and wavelength ($D_x = 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 0.2\mu\text{m}$)

斑开始变大,透射率下降。

2.2.2 $D_x = 0.15\mu\text{m}, D_y = 0.3\mu\text{m}$ 的椭圆非晶 Si 柱的超表面 从图 10 中可以看出,当 $\lambda = 0.7\mu\text{m}$ 时,聚焦点附近还依然有比较强的光通过,说明光线还没有完全汇聚,依然存在微弱的次聚焦点;当 $\lambda = 0.8\mu\text{m} \sim$

$1.0\mu\text{m}$ 时,结构对于光束的汇聚效果达到最强,随着波长进一步扩大,因为部分区域光束波长已经近似等于椭圆非晶 Si 柱的规格,某些光束并没有通过散射体进行中心方向偏折,相互干涉变弱,使光束呈现扩散趋势。

从图 11 中可以看出,随着波长从 $0.7\mu\text{m}$ 的逐步

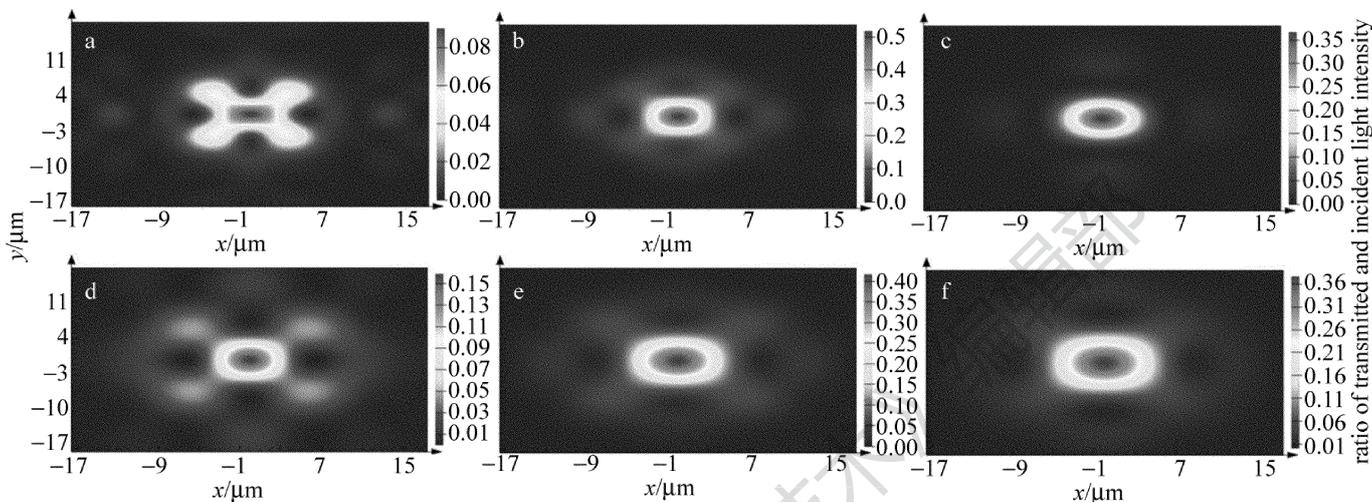


Fig. 10 Light intensity distributions at different wavelengths ($D_x = 0.15\mu\text{m}, D_y = 0.3\mu\text{m}$)

a— $\lambda = 0.7\mu\text{m}$ b— $\lambda = 0.8\mu\text{m}$ c— $\lambda = 0.915\mu\text{m}$ d— $\lambda = 1.0\mu\text{m}$ e— $\lambda = 1.1\mu\text{m}$ f— $\lambda = 1.2\mu\text{m}$

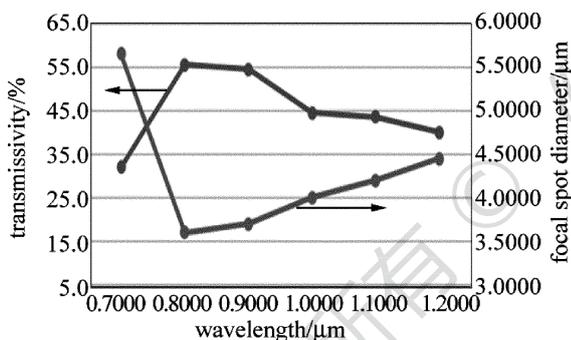


Fig. 11 Relationship of transmissivity, focal spot diameter and wavelength ($D_x = 0.15\mu\text{m}, D_y = 0.3\mu\text{m}$)

增加,透射率也随之升高。 λ 在 $0.8\mu\text{m} \sim 0.9\mu\text{m}$ 附近汇聚效果最好,透射率也在 50% 以上,然后光斑大小开始逐渐变大,透射率随之下降,不过下降并不明显。

对比第 1 组的 D_x 和 D_y ,当把 $D_x = 0.1\mu\text{m}$ 和 $D_y = 0.2\mu\text{m}$ 增大为 $D_x = 0.15\mu\text{m}$ 和 $D_y = 0.3\mu\text{m}$,发现适用的波长范围变大,并且适用的波长增大到了红外。结合第 1 节中的理论分析,当增加了超表面上椭圆基元的长轴、短轴,因为 Si 柱的折射率大于 SiO_2 基底的折射率,所以改变了占空比之后,等效折射率随之变大,相应的适用波长也要随之增加。当通过的光束的波长相对较大时, D_x 和 D_y 相应也要增大与之对应,并且可以推测相应的椭圆结构之间相应的间距将会变短,从而影响聚焦的焦场分布和焦距大小。

综上所述,每一个微型 Si 柱都会对光的发散产生影响。因为外围的每个基元随着与中心距离增大,相应的排列分布的更加稀疏,所以等效折射率在外围周边相应较小。而在中心区域,基元排列的较为密集,因此等效折射率较大。超颖表面等效为一个凸透镜,在保持 d 不变的情况下,通过改变折射率 n 来控制传输相位,以实现光束聚焦。由于器件厚度 d 可远小于波长,当线宽不变时,主要是占空比所对应的等效折射率和波长共同贡献传输相位的改变,当入射光波长在一定范围变化时,由于调整了基元在基底的排列分布,使得等效折射率在传输相位中占主要影响作用。因此,可以在较宽波段范围内,通过调整线宽,来控制传输相位,以此实现光束聚焦。

3 结论

基于超颖表面相位调控理论,研究了超表面的光束聚焦调控的可行性。设计了一种基于光束聚焦的超颖表面,通过调整线宽(改变椭圆型 Si 柱的 D_x 和 D_y),可以控制相应超表面表面的等效折射率,从而改变穿过电磁波的传输相位,并且分析了不同波长下的聚焦特性。研究表明,通过优化超表面结构参量,可实现在宽波段范围内的相位调控,进而获得聚焦光场的优化。这种超表面在宽波段范围内实现较理想的光束聚焦,在超分辨率成像及光刻等方面有一定参考

价值。

参 考 文 献

- [1] EVLYUKHIN A B, REINHARDT C, SEIDEL A, *et al.* Optical response features of Si-nanoparticle arrays[J]. *Physical Review*, 2010, B82(4): 045404.
- [2] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [3] JAHANI S, JACOB Z. All-dielectric metamaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 23-36.
- [4] YU N, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [5] MUELLER J P B, 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.
- [6] DIAO J, YUAN W, YU Y, *et al.* Controllable design of super-oscillatory planar lenses for sub-diffraction-limit optical needles[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 1924-1933.
- [7] JIANG X X, WANG J M, HUANG X, *et al.* Complex amplitude pupil filter based on metasurface with subwavelength slot antenna[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6):807-811 (in Chinese).
- [8] LAROCHE S, SMITH D R. Reconciliation of generalized refraction with diffraction theory[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2391-2393.
- [9] KAMALI S M, ARBABI A, ARBABI E, *et al.* Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2016,7(5): 11618.
- [10] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, *et al.* Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and sub-wavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [11] YU N, CAPASSO F. Optical metasurfaces and prospect of their applications including fiber optics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2344-2358.
- [12] PU M, LI X, MA X, *et al.* Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [13] SUN Y Y, HAN L, SHI X Y, *et al.* General laws of reflection and refraction for metasurface with phase discontinuity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104201 (in Chinese).
- [14] 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.
- [15] KILDISHEV A V, BOLTASSEVA A, SHALAEV V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [16] SPINELLI P, VERSCHUUREN M A, POLMAN A. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(2):692.
- [17] ARBABI A, HORIE Y, BALL A J, *et al.* Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(5): 7069.
- [18] DECKER M, STAUDE I, FALKNER M, *et al.* High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [19] LIN D, FAN P, HASMAN E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [20] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al.* Multiwavelength polarization-insensitive lenses based on dielectric metasurfaces with meta-molecules[J]. *Optica*, 2016, 3(6): 628-633.
- [21] OSKOOI A F, ROUNDY D, IBANESCU M, *et al.* Meep : A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method [J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(3):687-702.