

双波长偏振控制超表面透镜的设计

罗文峰, 李新慧, 吕淑媛, 贾洁

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要:随着现代光学的快速发展,光学元件在光学系统中成为了不可或缺的部分,因此超表面逐渐成为研究热点。超表面是由亚波长散射体阵列组成的纳米结构,由于其结构简单、厚度薄、易于集成、利用率高等优点被广泛应用。在可见光 690 nm 和近红外光 880 nm 处采用传播相位设计了偏振复用的透射型超表面透镜。该超表面透镜将 x 线偏振光的透镜设计与 y 线偏振光的透镜设计进行组合,实现了在同一超表面下 2 种波长不同偏振状态的 3 种超表面透镜,分别是 $f_1=f_2=7\ 000\ \text{nm}$ 的共轴共焦超表面透镜和 $f_1=f_2=7\ 000\ \text{nm}, x_d=\pm 4\ 000\ \text{nm}$ 的离轴超表面透镜以及 $f_1=7\ 000\ \text{nm}, f_2=10\ 000\ \text{nm}$ 的共轴不同焦超表面透镜。这 3 种超表面透镜不仅具有高的数值孔径(0.8),而且半峰全宽接近衍射极限,具有良好的聚焦能力,并且其在空间利用率上也得到了提高。这种紧凑、高数值孔径以及空间利用率高的双波长偏振复用的超表面设计为聚焦透镜的发展提供了有效的解决方法,并且在荧光显微镜、光学成像等中发挥着独特的潜力和优势。

关键词:超表面;散射;半峰全宽;双波长;偏振复用

中图分类号:TN256

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2022)01-0215-07

超表面是一种新型的厚度可忽略不计的人工电磁材料,由于电磁波的电场或磁场与超表面亚波长单元结构的共振效应,其在超表面与空气层接触的临界面上的相位或振幅发生突变,从而实现聚焦^[1-2]、异常反射^[3-4]、异常折射^[5-6]和消色差^[7-8]等功能。另外,还可以通过调节亚波长单元结构的尺寸来控制入射电磁场的相位、振幅以及偏振状态等参数^[9-10]。由于超表面拥有损耗低、厚度薄、结构简单、易于集成和结构利用率高等优点,逐渐受到研究人员的关注,使得其在超表面透镜^[11]、涡旋光束^[12]、数字编码超表面^[13]、全息成像^[14]等领域得到了广泛应用。

近几年,对于超表面的研究越来越多。2019年 Wang 等^[15]采用改变矩形硅高度的方法研究并设计了一个全介质双焦点超表面透镜,其超表面的设计结构主要采用级联的方法,级联虽然是一个很好地实现双波长透镜的设计,但级联存在空间利用率低的不足。2020年 Li 等^[16]采用相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$

提出了一种适用于近红外波段、焦距可调的双透镜,其结构分为 3 层,中间层是相变材料,通过温度的变化使得中间层的相变材料由晶态变为非晶态,从而实现上下层超表面透镜的聚焦。该设计结构复杂,制作工艺相对较难,并且相比于其他超表面设计多了温度的变量。

针对这些不足,采用一种空间利用率较高^[17]的设计来实现超表面透镜的双功能,即在同一超表面上使用不同波长和不同的偏振状态入射,其中一个波长是在 690 nm x 线偏振光的状态下入射,另一个波长是在 880 nm y 线偏振光的状态下入射,实现了超表面透镜同焦距和不同焦距的设计,并且其有较大的数值孔径(numerical aperture, NA),有良好的聚焦效果。经过数值仿真计算,结果与预期结果一致。该设计不仅空间利用率高、有高的数值孔径,而且为双波长超表面透镜的设计提供了有效的思路。

收稿日期:2021-04-15

基金项目:陕西省自然科学基金(2021JM-466)资助

作者简介:罗文峰(1974—),西安邮电大学副教授,主要从事微纳光子器件研究。

通信作者:吕淑媛(1976—),女,西安邮电大学副教授,主要从事微纳光子器件研究。e-mail:1159955131@qq.com

1 基本结构单元和设计原理

1.1 基本结构单元

本文设计的是透射式超表面透镜,工作波长是 690 和 880 nm,超表面透镜的基本单元结构由两部分组成,如图 1 所示。图 1a) 的顶部是具有高折射率、低损耗的椭圆形纳米柱二氧化钛。衬底是具有低折射率,低损耗的二氧化硅,折射率为 1.46。通过公式 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} h$ 可得到二氧化钛的高度 h ,其中 λ 是设计波长, n_{eff} 是有效折射率, h 是纳米柱的高度。本文设计超表面单元时采用同一高度纳米柱,为了使透镜能够实现 $0 \sim 2\pi$ 的调控,需要满足 $\varphi \geq 2\pi$ 在最小值时, h 的高度不能低于最小值,波长为 690 和 880 nm 时最低值分别是 460 和 587 nm,所以在这里二氧化钛高度 h_1 设置为 600 nm。 x, y 方向使用周期性边界条件, z 方向使用完美匹配层 (perfect matching layer, PML), PML 的厚度设置为 $h_3 = 2\pi/k_0$, k_0 是真空中波矢。图 1b) 是基本单元的俯视图, a 是纳米柱子的长轴, b 是短轴。周期是 $P_x = P_y = 490$ nm, 满足奈奎斯特抽样定律: $P < \lambda/2d_{\text{NA}}$, 其中 λ 是波长, d_{NA} 是数值孔径。在本设计中设置数值孔径 $d_{\text{NA}} = 0.8$ 。

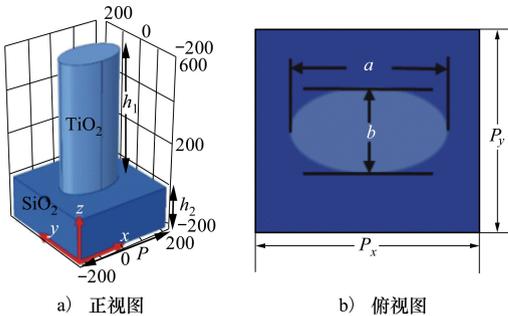


图 1 基本单元结构

本文设计主要利用传播相位来实现相位调制,而传播相位的变化由单元结构的尺寸变化实现,即依赖椭圆形纳米柱长短轴的变化来调制传播相位。

琼斯矩阵描述单元结构的变化

$$\mathbf{J} = \mathbf{R}(-\theta) \begin{pmatrix} e^{i\phi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \mathbf{R}(\theta) \quad (1)$$

式中: ϕ_x 和 ϕ_y 分别是线偏振光沿单元结构的长轴和短轴的相移; θ 是旋转角度,当固定 θ 不变时,通过

调整单元结构的长短轴来调控 ϕ_x 和 ϕ_y 的变化。因此,椭圆形纳米柱沿 x 方向和沿 y 方向的尺寸是可以单独控制的,即在 x 偏振光入射下,只有沿 x 方向的长轴对 x 偏振光有响应, y 方向的短轴对于 x 偏振光的影响非常微小。由于其特殊的偏振特性,在本文设计中使用固定一个轴的长度,参数化扫描另一轴长的设计,使不同的 2 个波长聚焦到相同或者不同的焦平面。使用的波长以及偏振状态是 690 nm 的 x 偏振光和 880 nm 的 y 偏振光。首先,经过仿真计算得到了分别在 2 种波长入射下参数化扫描长短轴的二维相位图,长短轴均是从 10 ~ 460 nm,步长是 50 nm 参数化扫描,结果如图 2 所示。

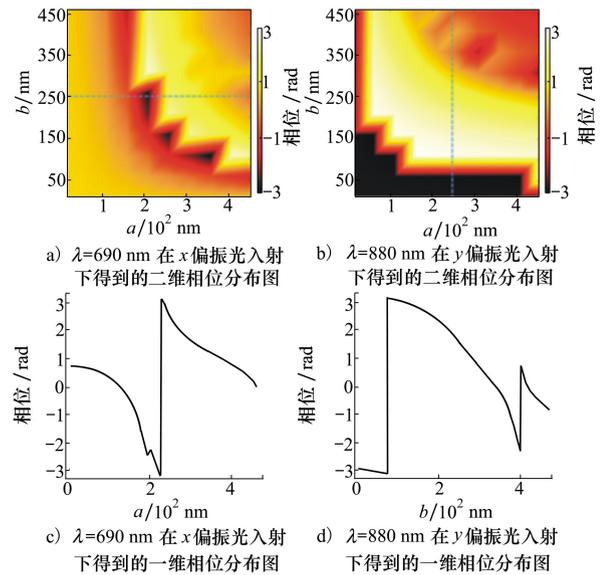


图 2 相位分布图

图 2a) 是 $\lambda = 690$ nm 在 x 偏振光状态下得到的结果,图中蓝色虚线是 $b = 250$ nm 时,相位覆盖 $0 \sim 2\pi$ 。通过实验仿真得到了图 2c) 的曲线图,是当 a 从 3 nm 增加到 480 nm 步长为 1 nm,且 b 的值固定为 250 nm 时,波长 690 nm 在 x 偏振光状态下入射的相位分布曲线,在图 2c) 中 a 的相位分布实现了近 2π 的相移与预设结果一致。那么当 $\lambda = 880$ nm 在 y 偏振光状态下入射时,固定 $a = 250$ nm,参数化扫描短轴 b ,如图 2d) 所示,其相位也覆盖 $0 \sim 2\pi$ 。本文使用不同波长和不同入射偏振控制来设计具有不同功能的超表面透镜。

1.2 相位分布和设计原理

本文设计的超透镜的功能是通过在 x 或者 y 线偏振光入射的情况下,固定 a (或 b) 不变,改变 b (或

a) 的尺寸将焦点聚焦到特定的位置,其需要满足聚焦相位分布公式

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x \pm x_d)^2 + (y \pm y_d)^2 + f_{1,2}^2} - f_{1,2} \right) \quad (2)$$

式中: λ 是入射波长; $f_{1,2}$ 是透镜焦距; x 和 y 分别是纳米柱对应位置的横坐标和纵坐标; x_d 和 y_d 是偏移量。通过相位分布公式的变形可以设计出不同功能的透镜。通过相位分布公式的变形设计了 3 种不同的聚焦透镜(共轴共焦双波长超表面透镜、离轴双波长超表面透镜和共轴不同焦双波长超表面透镜)。这 3 种透镜的设计原理是通过计算在对应的数据库中找到各个位置上对应纳米柱的尺寸,在这里设置透镜的焦距 $f = 7\,000\text{ nm}$, 且 $x_d = y_d = 0$, 使用公式(2) 计算出相位,其相位分布需符合双曲函数的分布规律。如图 3a) 所示,当入射波长是 690 nm 时使用相位公式计算的相位分布曲线,其变化规律符合双曲函数的变化规律。同理可以得到入射波长是 880 nm 的双曲相位分布。当焦距 $f = 7\,000\text{ nm}$, 偏移量 $x_d = \pm 4\,000\text{ nm}$, 可以得到入射波长是 690 nm 对应的是右焦点,如图 3b) 所示。同理可以得到入射波长是 880 nm 的左焦点的相位分布。其相位分布均符合双曲函数的变化规律。

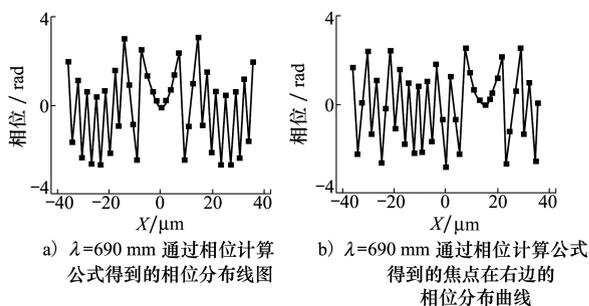


图 3 相位曲线分布

2 结果与讨论

2.1 偏振复用共轴共焦超表面透镜

如上所述,利用图 2c) 和 2d) 中的相移来设计聚焦透镜。设计的聚焦透镜的相位分布应遵循相位计算公式。首先设计的超表面透镜是 2 种不同的波长控制不同的偏振状态使焦点聚焦到同一焦平面,即焦距 $f = 7\,000\text{ nm}$, 偏移量是 $x_d = y_d = 0$, 根据公式(1) 可计算相位。该设计使用的超表面是将沿 x 方向在 690 nm 波长下各个位置上长轴 a 的尺寸与沿 y

方向在 880 nm 波长下各个位置上短轴 b 的尺寸组合而成的超表面。该超表面是当入射波长是 690 nm 在 x 偏振光状态下,焦距是 $f = 7\,000\text{ nm}$ 的同轴同焦超表面透镜,以及入射波长是 880 nm 在 y 偏振光状态下,焦距是 $f = 7\,000\text{ nm}$ 的同轴同焦超表面透镜。经过仿真计算,其结果如图 4a) 和 4b) 所示,其焦距 $f = 7\,000\text{ nm}$ 。本文所设计的是透射式超表面透镜,即入射光束从基底入射,通过基底进入纳米柱子,随后光束通过纳米柱子光束聚焦到焦点的距离是 $7\,000\text{ nm}$, 由于二氧化钛纳米柱子的高度是 600 nm , 那么其焦点所在的位置是 $z = 7\,600\text{ nm}$ 处, 则如图 4a) 和 4b) 所示的焦点聚焦位置与预设焦点聚焦位置一致。

为了验证当 x 偏振光入射时 y 分量对聚焦效果的影响,计算了 x 偏振光入射下对应的 y 分量的电场分布。如图 4c) 所示,当 $\lambda = 690\text{ nm}$ 在 x 偏振光状态下入射时 E_y 对 x 偏振的 E_x 的影响极其微小,可忽略不计。用同样的方法验证了 $\lambda = 880\text{ nm}$ 在 y 偏振光状态下入射 E_x 对 E_y 的影响,其影响也是极其微小,可忽略不计,如图 4d) 所示。图 4e) 和 4f) 分别是 $\lambda = 690\text{ nm}$ 在 x 偏振光状态下和 $\lambda = 880\text{ nm}$ 在 y 偏振光状态下的电场强度分布图。从图中可以得出其半峰全宽(full width at half maximum, FWHM) 分别是 372 和 388 nm , 根据衍射极限公式,半峰全宽接近衍射极限,聚焦效率^[18] 定义为焦平面上选定区域的总能量(即对应 FWHM 的 3 倍)与 x - y 平面上总能量的比值,聚焦效率分别是 37.2% 和 40% 。其中,数值孔径的计算公式为

$$d_{\text{NA}} = \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{D}{2f} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $D = n \times P = 20\,090\text{ nm}$ 是透镜的直径; $f = 7\,000\text{ nm}$ 是透镜的焦距, d_{NA} 与透镜的直径 D 成正比,与透镜的焦距 f 成反比,即透镜的直径 D 增大或焦距 f 减小, d_{NA} 增大,那么 FWHM 越小,其透镜的聚焦能量越集中。经过计算该透镜具有较高的数值孔径 $d_{\text{NA}} = 0.82$, 与预设的数值孔径非常接近,说明其具有良好的聚焦能力。根据图 4e) 和 4f) 中场强的分布,在 $z = 7\,600\text{ nm}$ 处的中心部分场强最强,但是其周围也有微弱的场强存在,导致有旁瓣的存在,这是由于其在相位的计算以及结构尺寸的优化方面存在一定的误差导致有旁瓣的存在,但是其对总体的影响较小,可忽略。这一透镜的设计具有较高的数值孔径和以及高的聚焦效率,并且所设计的超表面

透镜在荧光显微技术中应用广泛。利用超透镜能够使用不同的入射波长聚焦到相同的焦点,在荧光显

微技术中可使样本被不同的荧光团标记进行光收集。

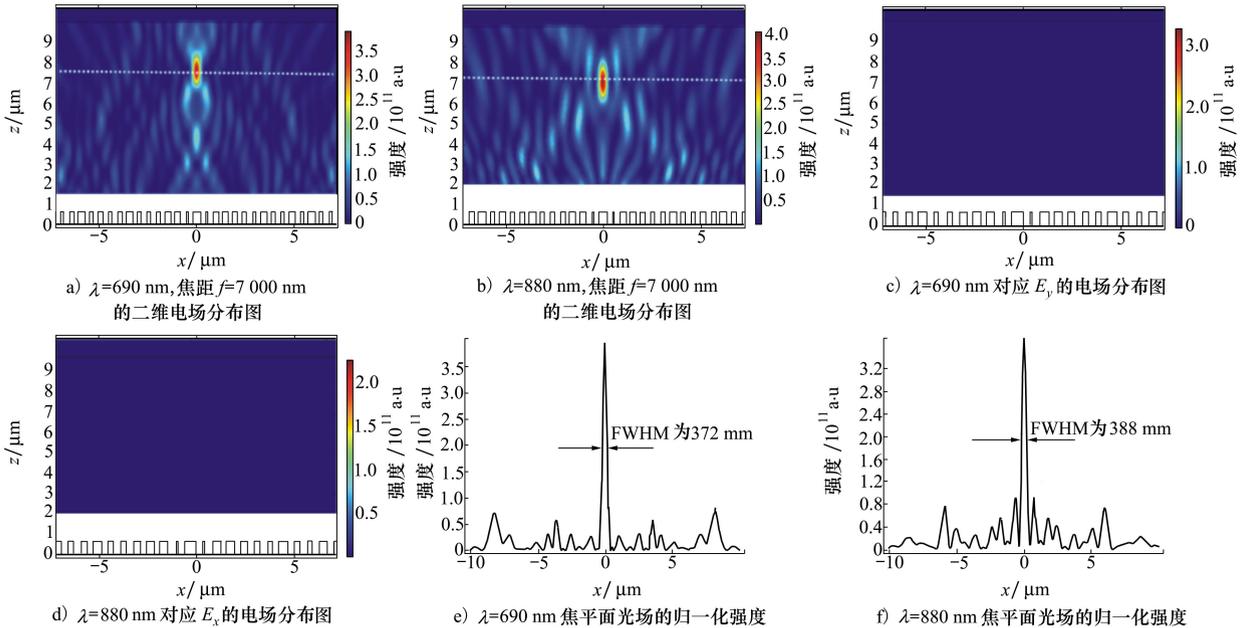


图4 不同的波长在不同的偏振下入射的电场图和 FWHM

2.2 偏振复用离轴超表面透镜

在偏振复用共轴共焦超表面透镜的基础上,做了第二种超表面透镜,其焦点在 x 方向有偏移量,即 $x_d = \pm 4\ 000$ nm,在 y 方向上没有偏移量即 $y_d = 0$,那么公式(2)可简化为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{(x \pm x_d)^2 + f_{1,2}^2} - f_{1,2}) \quad (4)$$

根据公式(4)可得到其对应的相位分布。根据相位将找到的2组数据组合起来,构成有偏移量的超表面透镜,其焦距是 $f=7\ 000$ nm,偏移量是 $x_d = \pm 4\ 000$ nm。经过仿真计算其结果与预设的焦距位置一致,在 $x-z$ 平面上分别在 $(-4\ 000, 7\ 600)$ 和 $(4\ 000, 7\ 600)$ 处聚焦,如图5a)和5b)所示。在图5a)和5b)中白色虚线所对应的是图5c)和5d)电场强度曲线分布图。从图5c)和5d)中可计算得出2个波长880 nm和690 nm对应的半峰全宽分别是495和480 nm,聚焦效率分别是20.4%和30.6%。相对于偏振复用共轴共焦超表面透镜的聚焦效率降低,这是由于2个焦点的聚焦模式是离轴的,左右两边的焦点分布不均匀,因此出现了焦点倾斜的现象,导致半峰全宽增大,聚焦效果降低。由半峰全宽公式可知,当波长不变, d_{NA} 增大时,半峰全宽减小,那么其聚焦效果就越好,所以可以用增大数值孔径的

方法来增加聚焦效果。

2.3 偏振复用共轴不同焦超表面透镜

第三种聚焦透镜的设计是焦点在 z 方向分开的共轴不同焦超表面透镜,波长 $\lambda = 690$ nm 的焦距是 $f_1 = 7\ 000$ nm,波长 $\lambda = 880$ nm 的焦距是 $f_2 = 10\ 000$ nm。经过仿真计算,结果如图6a)和6b)所示,符合预期设计。图6c)和6d)分别是图6a)和6b)中白色虚线对应电场强度分布,其中半峰全宽分别是406和460 nm,其聚焦效率分别是32.4%和46.7%。由于当 $\lambda = 880$ nm 时其焦距 $f = 10\ 000$ nm,根据数值孔径计算公式可知,当焦距 f 增加,数值孔径数值减少,则半峰全宽就相对增大,故入射波长是880 nm 的 FWHM 大于入射波长是690 nm 的 FWHM。该透镜的设计使不同的波长入射同一超表面并且聚焦到不同的焦平面,并具有高的数值孔径。对于复杂的待测样品进行多区域多光谱成分荧光信息获取时,荧光显微镜无法实现。而共轴不同焦双波长透镜的设计应用能够对含有多种荧光团的样品进行多种成分激发成像,故本文设计的共轴不同焦双波长透镜对荧光显微镜具有吸引力。另外,这些透镜还可用于在样品被标记为具有近发射光谱的2种不同荧光团的情况下进行光收集。

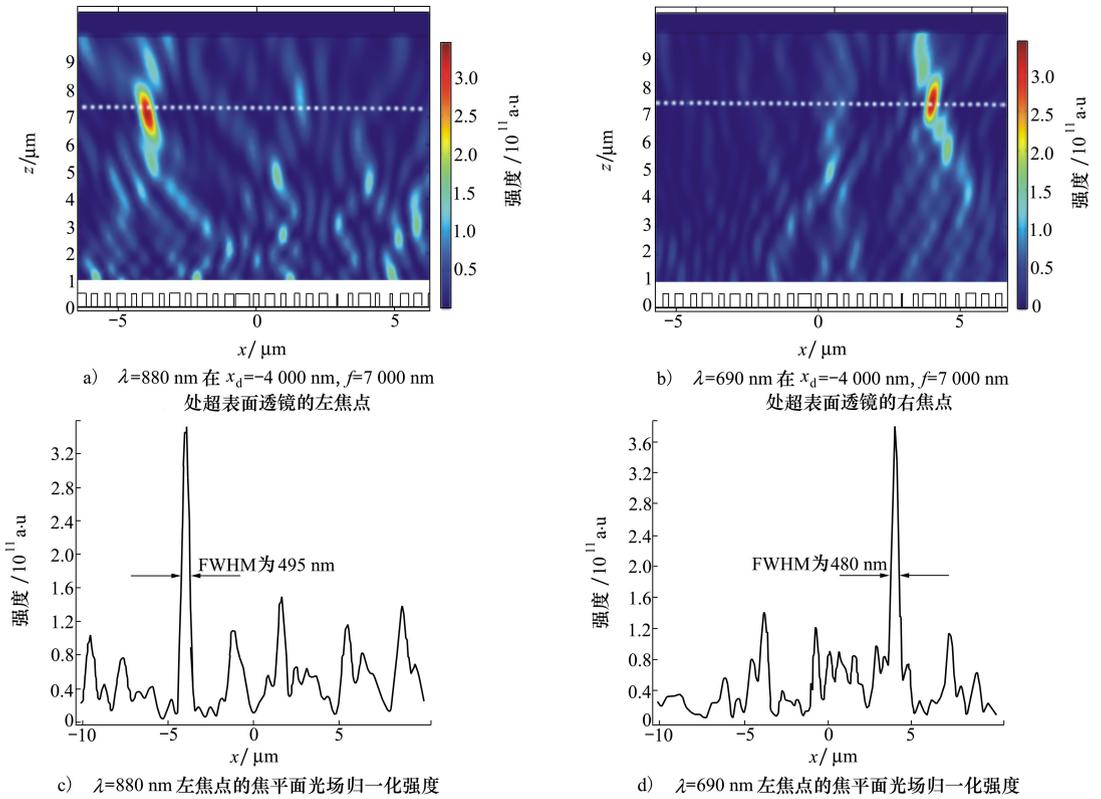


图 5 离轴超表面透镜

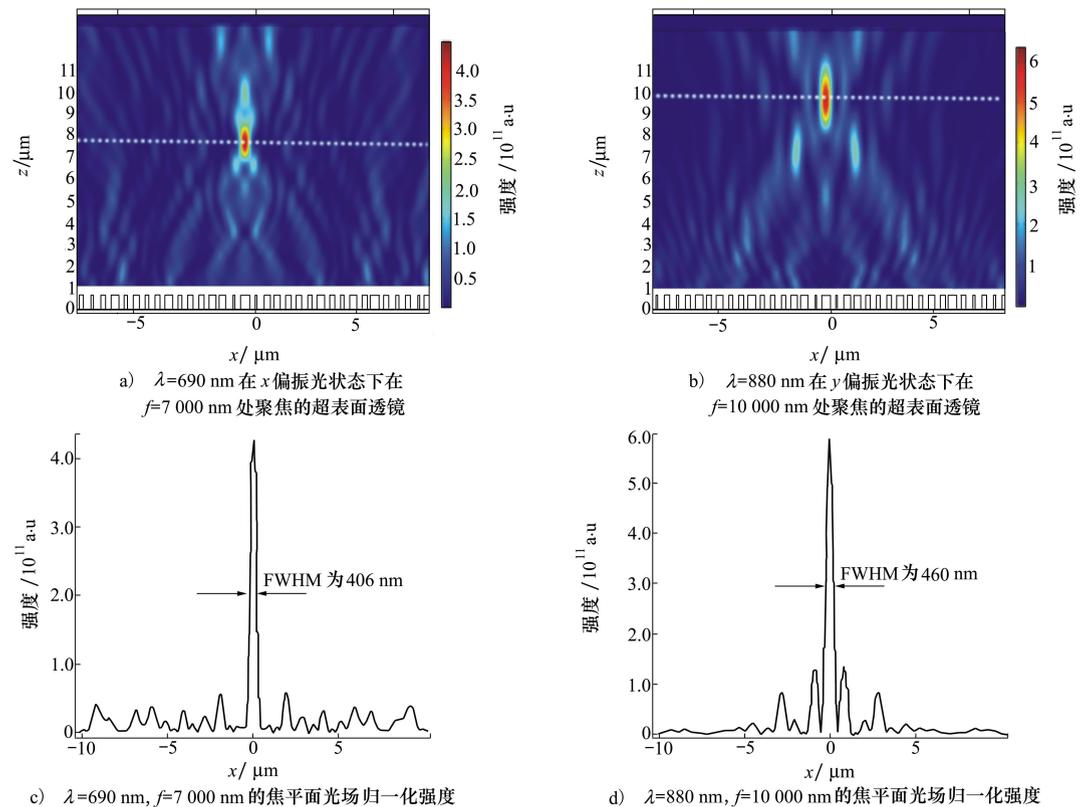


图 6 焦点在 z 方向分开的聚焦透镜

3 结 论

本文设计提出了一种新型紧凑的超表面透镜,实现了在同一超表面上2种波长690 nm在 x 偏振光状态下和880 nm在 y 偏振光状态下入射的超表面透镜。该透镜对椭圆形纳米柱子在特定的波长以及偏振状态下参数化扫描长轴或短轴的长度,通过对相位分布的设计,计算了3种超表面聚焦透镜。第一种是偏振复用共轴共焦超表面透镜,在入射波长是690和880 nm偏振状态分别是 x 偏振光和 y 偏振光时,其焦距是 $f=7\ 000$ nm,实现了超表面透镜在相同位置的聚焦;第二种是偏振复用离轴超表

面透镜,偏移量是 $x_d=\pm 4\ 000$ nm,分别聚焦到左右焦点;第三种是焦点在 z 方向分开的共轴不同焦的超表面透镜,焦距分别是 $f_1=7\ 000$ nm和 $f_2=10\ 000$ nm,2种波长分别在2种偏振状态下入射得到不同焦距的超表面透镜,这3种超表面的FWHM都接近衍射极限,具有良好的聚焦能力。该超表面的设计具有较高的数值孔径以及良好的聚焦能力,并且其在单元结构的设计上具有简单易于实现的特点,而且该设计发挥了超表面损耗低、厚度薄、易于集成、结构利用率高等优点,使超表面透镜在光学成像、光信息处理、荧光显微技术等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG Yifei, CHOU Jeffrey B, LI Junying, et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 230-237
- [2] HAN Yuansheng, LU Xiaoqing, LYU Haoran, et al. Bifocal metalens with diverse polarization combination[J]. Plasmonics, 2021, 16(2): 575-579
- [3] ZHANG Yuhui, YANG Bowei, LIU Zhiying, et al. Polarization controlled dual functional reflective planar metalens in near infrared regime[J]. Coatings, 2020, 10(4): 1-9
- [4] CHEN Xianzhong, HUANG Lingling, HOLGER M, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 1198-1203
- [5] 李瑶,莫伟成,杨振刚,等. 利用超表面天线阵列产生太赫兹涡旋光束[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 644-648
LI Yao, MO Weicheng, YANG Zhengang, et al. Generation of terahertz vortex beams base on metasurface antenna array[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 644-648 (in Chinese)
- [6] HA Yingli, GUO Yinghui, PU Mingbo, et al. A tunable metasurface deflector based on MIM waveguide filled with phase-change material[J]. Plasmonics, 2019, 14(6): 1735-1741
- [7] CHEN Long, LIU Jia, ZHANG Xiaohu, et al. Achromatic super-oscillatory metasurface through optimized multiwavelength functions for sub-diffraction focusing[J]. Optics Letter, 2020, 45(20): 5772-5775
- [8] DAI Chenjie, WAN Shuai, YANG Rui, et al. High-NA achromatic diffractive lensing for arbitrary dual-wavelengths enabled by hybridized metal-insulator-metal cavities[J]. Optics Express, 2020, 28(16): 23652-23659
- [9] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI SM, et al. High efficiency double-wavelength dielectric metasurface lenses with dichroic birefringent meta-atoms[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18468-18477
- [10] ZHANG Qing, LI Maozhong, LIAO Tingdi, et al. Design of beam deflector, splitters, wave plates and metalens using photonic elements with dielectric metasurface[J]. Optics Communications, 2018, 411: 93-100
- [11] GUO Kai, XU Haisheng, PENG Zhiyong, et al. High-efficiency full-vector polarization analyzer based on gan metasurface[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(10): 3654-3659
- [12] HYEONGJU C, DAEIK K, ASHWINI S, et al. Generation of E-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8289-8297
- [13] DONG Fengling, FENG Hang, XU Lihua, et al. Information encoding with optical dielectric metasurface via independent multi-channels[J]. ACS Photonics, 2018, 6(1): 230-237
- [14] ZHAO Ruizhe, SAIN B, WEI Qunshuo, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. Light, Science & Applications, 2018, 7(1): 95-103

- [15] WANG Shuaimeng, SUN Xiaohong, CHEN Deli, et al. The investigation of height-dependent meta-lens and focusing properties [J]. *Optics Communications*, 2020, 460: 1-6
- [16] LI Xingyi, LI Siqi, WANG Guoxi, et al. Tunable doublet lens based on dielectric metasurface using phase-change material[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(28): 1-9
- [17] 徐海生. 基于氮化镓超表面的高效偏振器件研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019
XU Haisheng. Research on efficient polarization device based on gallium nitride supersurface[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019 (in Chinese)
- [18] 赵鹏九, 刘首鹏, 罗宇, 等. 基于偏振响应的双焦点超表面透镜设计[J]. *光子学报*, 2020, 49(9): 69-76
ZHAO Jiupeng, LIU Shoupeng, LUO Yu, et al. Design of bifocal metasurface lens based on polarization response[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 69-76 (in Chinese)

Design of dual-wavelength polarization control metasurface lens

LUO Wenfeng, LI Xinhui, LYU Shuyuan, JIA Jie

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: With the rapid development of modern optics, optical elements have become an indispensable part of an optical system. A metasurface is a nanostructure composed of arrays of sub-wavelength scatterers and is widely used due to its simple structure, thin thickness, easy integration, and high utilization rate. This paper designs a polarization-multiplexed transmissive metasurface lens in the visible light band 690 nm and near-infrared light band 880 nm. The metasurface lens combines the x -polarized lens design with the y -polarized lens design to realize three metasurface lenses with dual wavelength and different polarization states under the same metasurface. The metasurface lenses are: a coaxial confocal metasurface lens with the focus length of $f_1=f_2=7\ 000$ nm, an off-axis metasurface lens with the focus length of $f_1=f_2=7\ 000$ nm and with a displacement of $x_d=\pm 4\ 000$ nm, and a coaxial metasurface lens with the focus length of $f_1=7\ 000$ nm and $f_2=10\ 000$ nm, respectively. They have not only a high numerical aperture of 0.8 but also a good focusing capability with a full width at half maximum close to diffraction limit, and their space utilization is also improved. This compact and highly numerical aperture and high spatial utilization of dual-wavelength polarization multiplexing metasurface design provides an effective solution for the development of focusing lens and has unique potentials and advantages in fluorescent microlens, optical imaging, etc.

Keywords: metasurface lens; full width at half maximum; dual wavelength; polarization multiplexing

引用格式: 罗文峰, 李新慧, 吕淑媛, 等. 双波长偏振控制超表面透镜的设计[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(1): 215-221

LUO Wenfeng, LI Xinhui, LYU Shuyuan, et al. Design of dual-wavelength polarization control metasurface lens [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(1): 215-221 (in Chinese)