

多波长偏振复用多焦点超表面

向梦, 匡登峰*, 古盼春, 李文爽

南开大学现代光学研究所天津微尺度光信息科学技术重点实验室, 天津 300350

摘要 设计了可聚焦红绿蓝三色光的偏振复用超表面器件。该器件通过几何相位原理调整二氧化钛纳米柱的旋转角以实现入射光场的调控, 仅使用三种不同尺寸的纳米柱便可获得较高的偏振转换效率。通过将三色光分别聚焦至同一焦平面的不同位置处, 基于偏振响应特性实现了焦点位置可控。所设计的超表面器件可作为紧凑型光学器件应用在便携式成像系统、偏振器件和加密信息传输等领域。

关键词 材料; 超表面; 可见光; 偏振复用; 亚波长结构

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1113001

Multi-Wavelength Multifocal Metasurface with Polarization Multiplexing

Xiang Meng, Kuang Dengfeng*, Gu Panchun, Li Wenshuang

Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Institute of Modern Optics,
Nankai University, Tianjin 300350, China

Abstract A polarization multiplexed metasurface is designed to focus red, green and blue light. This metasurface adjusts the rotation angle of titanium dioxide nano-pillars to achieve the modulation of incident light based on the geometric phase principle. The high polarization conversion efficiency can be achieved by only three different nano-pillar sizes. This metasurface can focus three-color light on the different positions of the same focal plane and thus to realize the control of focus position based on the polarization response characteristics. The metasurface device designed here can be used as a compact optical device in the fields of portable imaging systems, polarized devices, encrypted information transmission, and so on.

Key words materials; metasurfaces; visible light; polarization multiplexing; sub-wavelength structures

OCIS codes 160.3918; 350.3950; 050.6624

1 引言

现代光学技术的发展旨在集成多个光学元件并缩小光学系统的物理尺寸。透镜几乎是所有复杂光学系统中最关键的部件, 在光学中起着重要作用。传统的透镜主要依靠光线在介质材料中传播光程的增加来产生相位积累以实现聚焦功能, 而该传播光程远大于入射波长^[1-4], 因此不可避免地导致体积庞大且外形弯曲, 阻碍了现代光学微型化的发展。超表面是一种二维的人工电磁超材料, 可以从纳米尺度灵活调控光波的相位、振幅以及偏振态等信息^[5-9], 从而使得微型集成化光学器件成为可能。

大多数的成像系统都是依靠强度传感器来显示从自由空间中收集到的图像, 由于感光的光电二极管不能分辨颜色, 因此用于彩色成像的图像传感器通常由负责分光的滤光片和提高集光效率的微透镜组合构成, 但微透镜的尺寸远大于工作波长, 这必然导致器图像传感件体积庞大。对于基于光谱成像技术的多光谱相机来说, 多镜头多相机组合^[10]的系统要求多个透镜与传感器之间精确配准, 这导致成本变高且便携性变差, 而单镜头棱镜分光型^[11]的系统存在一个更严重的问题, 由于将入射光分成了几部分, 每个波段的光能量会降低到可能无法工作的水平。近年来, 研究者基于超表面设计并验证了广义

收稿日期: 2020-05-13; **修回日期:** 2020-06-12; **录用日期:** 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(11274186)、天津市自然科学基金(18JCZDJC38200)、南开大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(63201178)

* **E-mail:** dfkuang@nankai.edu.cn

斯涅尔定律^[12],并相继实现了平面透镜^[13]、光学全息^[14]和涡旋光束生成器^[15]等功能。含有错位排布8种V形天线的超表面在太赫兹波段实现了异常折射的振幅调控^[16],基于旋转的纳米柱针实现了圆偏振光各向异性相位调制的双模超表面器件^[17],利用级联或分离超表面实现了柱矢量光束偏振阶数的调控操作^[18],人们不断研究和开发具有不同寻常特征的超表面。

本文提出了针对红绿蓝三色光多焦点聚焦的偏振复用器件。通过设计单个二氧化钛纳米柱的几何尺寸和旋转角度,使其按照相位分布在二氧化硅衬底上,以实现入射圆偏振光的 $0\sim 2\pi$ 相位调控。本文不仅实现了单波长聚焦超表面和多波长多焦点超表面,还通过改变入射光的偏振态来实现偏振复用的功能。该器件具有轻薄、小型化和集成度高的特点,能够简化光学系统的结构,有望应于便携式的光谱成像系统及偏振成像领域,也可在偏振相关的信息编码领域发挥作用。

2 原理与设计

2.1 几何相位超表面基本原理

考虑放置在 xy 平面上的任意各向异性纳米柱单元,其长短轴分别沿 x,y 方向,在左旋圆偏振光或者右旋圆偏振光的激发下,该纳米柱产生沿 x 方向和沿 y 方向的具有不同幅度和不同相位的响应。两个正交方向的这种差异响应使得经过纳米柱调制后的透射电磁波同时含有左旋圆偏振和右旋圆偏振分量。任意一个各向异性的纳米柱以琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 \\ 0 & t_s \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: t_1 和 t_s 分别是较长光轴和较短光轴的复透射系数。当纳米柱在 xy 平面内绕 z 轴旋转 α 角度时,具有任意取向的各向异性纳米柱的透过率 \mathbf{T} 可表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(-\alpha)\mathbf{J}\mathbf{R}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 & 0 \\ 0 & t_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: α 为纳米柱的旋转角; $\mathbf{R}(\alpha)$ 是旋转矩阵,即局域坐标系和全局坐标系之间的转换矩阵。当入射光为圆偏光(琼斯向量为 $|\sigma\rangle = [1 \quad j\sigma]^T/\sqrt{2}$)时,可以使用 \mathbf{T} 计算出纳米柱的透射场为

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{T}|\sigma\rangle = \frac{t_1+t_s}{2}|\sigma\rangle + \frac{t_1-t_s}{2}\exp(-2j\sigma\alpha)|\sigma\rangle, \quad (3)$$

式中: σ 为偏振态参数。左旋圆偏振光对应 $\sigma=1$,右旋圆偏振光对应 $\sigma=-1$ 。在(3)式右边的偏振分解结果中,第一项是与入射偏振态电场方向相同的分量,即(圆)偏振守恒分量;第二项是与入射偏振态电场方向相反的正交分量,即交叉偏振分量。可知,在任意一种旋向的圆偏振光入射时,透射光可分为两个具有不同复振幅的正交分量,而通过旋转纳米柱产生的附加几何相移仅存在于交叉偏振分量中,附加相移 φ 与旋转角的关系为 $\varphi = \pm 2\alpha$,该相位值与波长无关。通过以上分析,透射场可以表征偏振守恒分量和交叉偏振分量的幅度与纳米柱几何参数之间的关系,这有助于设计高效的几何相位超表面。

当纳米柱旋转角在 $0\sim\pi$ 区间变化时,便可获得 $0\sim 2\pi$ 的几何相位(规定顺时针旋转为正),由于这种相位只与结构的方向取定有关,由于不同的偏振态(左旋或右旋)入射波会产生大小相同而方向不同的几何相位,因此可实现多波长相位的同时调制。为了在可见光波段实现能量可高效利用的超表面,构成超表面基本单元的材料需满足一定要求。介质的复折射率($n' = n + jk$,其中, n 为实部, k 为虚部)应满足两个条件,即高折射率和低损耗,通过结构参数的优化可获得高的偏振转化效率。在二氧化硅(SiO_2)衬底上设计了图1所示的二氧化钛(TiO_2)纳米柱,其为超表面的基本单元。选取了红色(波长 $\lambda = 700 \text{ nm}$)、绿色($\lambda = 513 \text{ nm}$)和蓝色($\lambda = 405 \text{ nm}$)三原色,不同波长响应下的纳米柱尺寸和基本单元大小如表1所示,其中 w,l 和 h 分别为纳米柱的宽度、长度和高度, p 为基本单元的大小。设置三种纳米柱的高度为 $h = 600 \text{ nm}$,采用时域有限差分法软件FDTD Solutions模拟了三种纳米柱的偏振转换效率,这里将偏振转换效率定义为

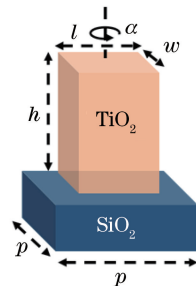


图1 超表面的基本单元示意图

Fig. 1 Schematic of unit cell of metasurface

带有附加几何相位的交叉偏振透射光与全部入射光的能量之比,仿真结果如图 2 所示,所设计的三种尺寸纳米柱在设计波长下的偏振转换效率均高于 80%,基本与国内外同类型的研究成果持平^[19-21]。

表 1 不同波长响应下的纳米柱尺寸和衬底大小

Table 1 Geometric sizes of nano-pillars and substrates under different wavelength responses

λ /nm	p /nm	l /nm	w /nm
700	430	385	100
513	325	250	95
405	200	150	40

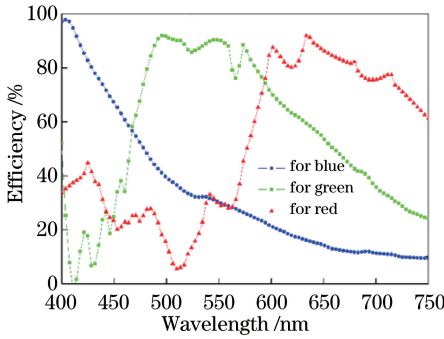


图 2 三种尺寸纳米柱的偏振转换效率

Fig. 2 Polarization conversion efficiencies of nano-pillars with three sizes

2.2 三维空间聚焦超表面相位分布

为了在三维空间中将入射光聚焦到一点上,引入偏转角 θ 、方位角 φ_f 和焦距 f 以共同表征焦点 F 的位置,如图 3 所示,点 $P(x, y)$ 为超表面上的任意一点,点 O 为超表面中心,点 $F(f, \theta, \varphi_f)$ 为设计的焦点位置, $r = |\vec{OP}| = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为超表面上任意一点到中心的距离。那么,点 P 处的相移为

$$\Phi_m(r, \lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda} (|\vec{PF}| - |\vec{OF}|), \quad (4)$$

式中: $|\vec{OF}|$ 为设计的焦距 f ; $|\vec{PF}|$ 为超表面上任意一点 P 到焦点 F 的距离。在 $\triangle AOP$ 中,点 A 为焦点 F 在超表面上的垂直投影点,根据余弦定理可以把 $|\vec{AP}|$ 表示为

$$|\vec{AP}| = \sqrt{r^2 + f^2 \sin^2 \varphi_f - 2rf \sin \varphi_f \cos(\theta_r - \theta)}, \quad (5)$$

式中: θ_r 为径向角。

在 $\triangle APF$ 中,根据勾股定理得到

$$|\vec{PF}| = \sqrt{|\vec{AF}|^2 + |\vec{AP}|^2} = \sqrt{r^2 + f^2 - 2rf \sin \varphi_f \cos(\theta_r - \theta)}, \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式中,就能得到三维空间聚焦的超表面相位分布函数为

$$\Phi_m(x, y, \lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot$$

$$\left[\sqrt{r^2 + f^2 - 2rf \sin \varphi_f \left(\cos \theta \frac{x}{r} + \sin \theta \frac{y}{r} \right)} - f \right], \quad (7)$$

式中:偏转角度 θ 和方位角 φ_f 可表征空间中任意一个焦点,偏转角度 θ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间取值,方位角 φ_f 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间取值(本文考虑正向透射模式)。根据三维空间聚焦的相位分布,设计了三色光复用超表面来验证其对光场的调控能力,结果与分析在第 3 节展示。

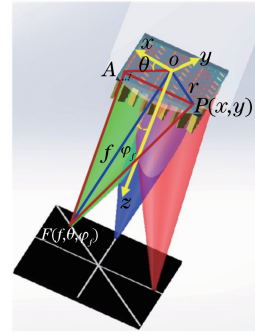


图 3 空间聚焦超表面示意图

Fig. 3 Schematic of metasurface for spatial focusing

3 分析与讨论

3.1 单色聚焦超表面

当 $\theta = \varphi_f = 0$ 时,(7)式可以写为

$$\Phi(x, y) = -k(\sqrt{f^2 + r^2} - f), \quad (8)$$

此时超表面的相位分布可以将入射光沿着光轴聚焦到焦点处,即实现了超透镜功能。选取红色($\lambda = 700$ nm)、绿色($\lambda = 513$ nm)、蓝色($\lambda = 405$ nm)三原色,分别设计三个与之响应的超透镜。所有超透镜的半径均为 $2.5 \mu\text{m}$,焦距均为 $5.00 \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.45。在右旋圆偏光(RCP)光照射下,超透镜聚焦的仿真结果如图 4 所示,图 4(a)~(c)所示为模拟的焦点区域(xz 平面)的归一化电场强度($|E|^2$)分布,红绿蓝波长下的焦距分别为 $4.85, 5.17, 5.21 \mu\text{m}$,这与设计的 $5.00 \mu\text{m}$ 焦距值接近。图 4(d)~(f)所示为 $z = 5.00 \mu\text{m}$ 时 xy 焦平面的归一化电场强度分布,并且测得三个聚焦光斑的半峰全宽(FWHM)分别为 $621.3, 477.2, 379.9$ nm,均小于入射波长,如图 4(g)~(i)所示。定义聚焦效率为穿过以三倍 FWHM 为半径的圆斑的光能与总入射光的光能比^[22],通过二维强度积分得到红、绿和蓝光的聚焦效率分别为 $95.7\%, 95.6\%, 95.4\%$ 。

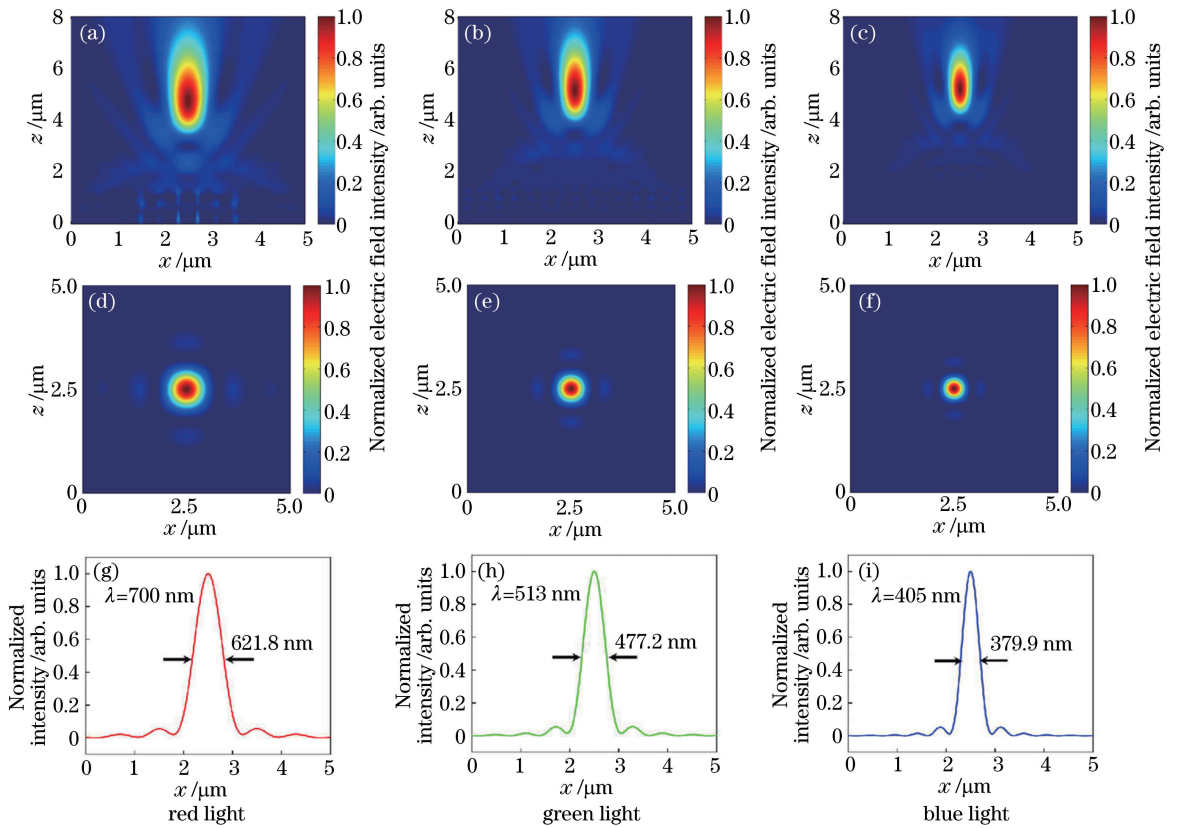


图 4 单波长聚焦超表面的仿真结果。(a)~(c)焦点区域(xz 平面)的归一化电场强度分布;(d)~(f) $z = 5.00 \mu\text{m}$ 时 xy 焦平面的归一化电场强度分布;(g)~(i)沿 x 轴方向的焦斑归一化电场强度

Fig. 4 Simulated results of single-wavelength focusing metasurface. (a)–(c) Normalized electric field intensity distributions in focus region (xz plane); (d)–(f) normalized electric field intensity distributions at xy focus plane when $z = 5.00 \mu\text{m}$; (g)–(i) normalized focal-spot electric field intensity distributions along x direction

3.2 多波长多焦点超表面

在单色聚焦超表面的基础上,设计了多波长多焦点超表面。其特性体现在可以将入射光调制为红、绿和蓝三个信道,同时完成三个信道的空间分离,即将三色光分别聚焦到同一焦平面上不同空间位置处。通过对纳米柱位置的精确排布和超表面相

位分布的选取,可以实现不相同的偏转角度 θ_{red} , θ_{green} , θ_{blue} ,这个过程可以看成是三个单色聚焦超透镜的整合。

通过建立 3×3 的超元胞并将其作为基本单元以实现多波长多焦点超表面的构建,如图 5(a)所示,其中 B 表示蓝色功能纳米柱, R 表示红色功能

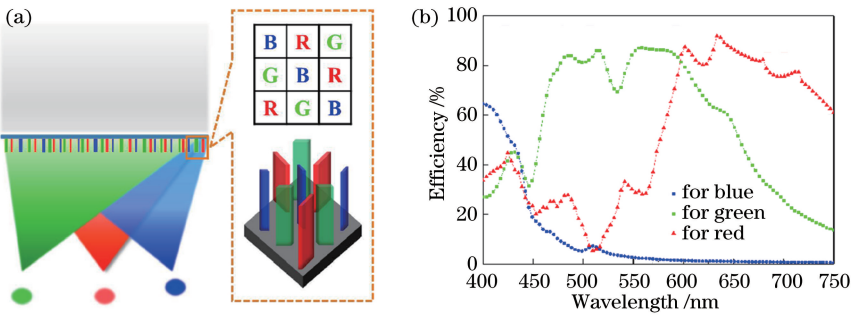


图 5 超表面整合方式和纳米柱的偏振转换效率。(a) 超表面整合示意图及超元胞结构示意图;(b) 衬底大小相同的三种尺寸纳米柱的偏振转换效率

Fig. 5 Schematic of metasurface integration and polarization conversion efficiency of nano-pillars. (a) Schematic of metasurface integration and structural diagram of unit cell; (b) polarization conversion efficiency of nano-pillars with three sizes but same size of substrate

纳米柱, G 表示绿色功能纳米柱。一个 3×3 超元胞包含三种尺寸纳米柱, 即构建单色聚焦超表面的三种基本单元, 每种尺寸对应 3 个纳米柱, 共 9 个纳米柱, 其交替排列形成了超元胞。为了简化超表面构建的过程, 在一个超元胞中, 每种尺寸的纳米柱对应的衬底大小均相等, 即 $p_{\text{red}} = p_{\text{green}} = p_{\text{blue}} = 430 \text{ nm}$, 此时三种纳米柱的偏振转换效率如图 5(b) 所示。绿光和蓝光响应下的纳米柱的偏振转换效率出现了一定程度的下降, 这是由衬底周期与纳米柱的有效面积不匹配造成的, 但最低偏振转化效率仍在 60% 以上。

设计了一个尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 的多波长多焦点超表面, 同样采用 RCP 光照射。设计的偏转角度 θ 和调制方位角 φ_f 分别为: 红光($\lambda = 700 \text{ nm}$)下

$\theta_{\text{red}} = 90^\circ, \varphi_{f\text{-red}} = 18^\circ$; 绿光($\lambda = 513 \text{ nm}$)下 $\theta_{\text{green}} = 225^\circ, \varphi_{f\text{-green}} = 25^\circ$; 蓝光($\lambda = 405 \text{ nm}$)下 $\theta_{\text{blue}} = 0^\circ, \varphi_{f\text{-blue}} = 18^\circ$ 。各个焦点与超表面间的垂直设计距离均为 $10 \mu\text{m}$ 。经过仿真计算, 得到三个焦点在 xy 平面、 xz 平面和 yz 平面上的归一化电场强度分布情况, 如图 6 所示。结合空间的几何关系计算出焦点位置处的结果: $\theta_{\text{red}} = 90^\circ, \varphi_{f\text{-red}} = 17.34^\circ; \theta_{\text{green}} = 225^\circ, \varphi_{f\text{-green}} = 24.13^\circ; \theta_{\text{blue}} = 0^\circ, \varphi_{f\text{-blue}} = 17.22^\circ$ 。红绿蓝焦点与超表面之间的垂直距离分别为 $10.15, 10.38, 10.36 \mu\text{m}$ 。这些结果与设计值都比较吻合, 超表面基本结构单元的离散化以及不同纳米柱之间的串扰是产生偏差的主要原因。同时, 计算了红绿蓝三个焦点的聚焦效率分别为 $27.66\%, 48.04\%$ 和 15.25% 。

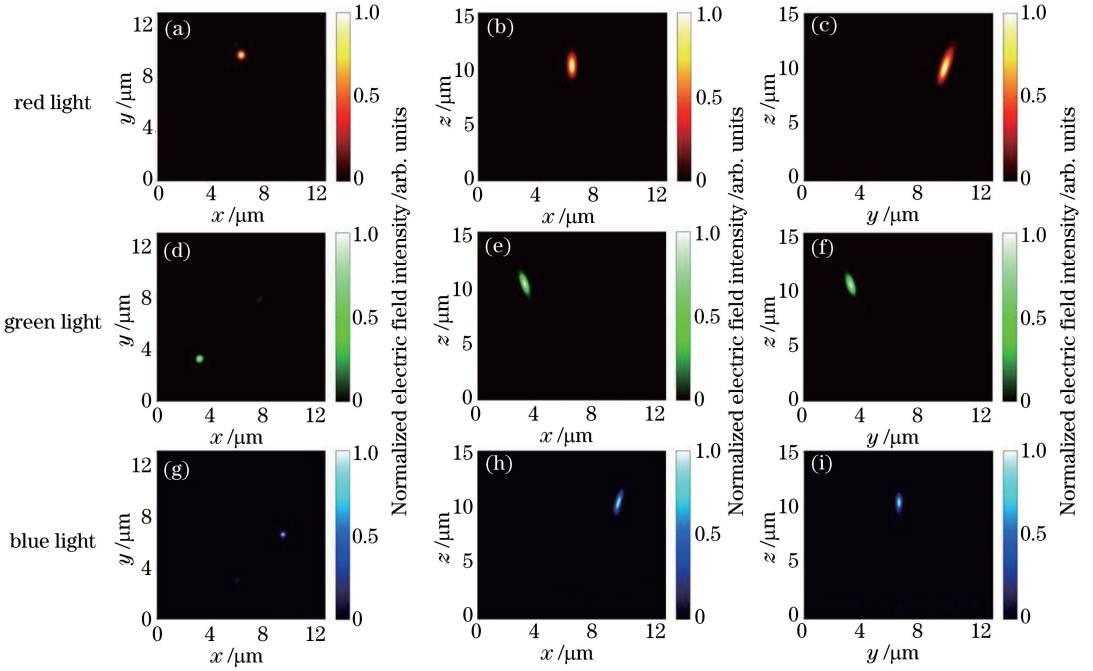


图 6 多波长多焦点超表面仿真结果。(a) $z = 10.15 \mu\text{m}$; (b) $y = 9.67 \mu\text{m}$; (c) $x = 6.47 \mu\text{m}$; (d) $z = 10.38 \mu\text{m}$; (e) $y = 3.29 \mu\text{m}$; (f) $x = 3.29 \mu\text{m}$; (g) $z = 10.36 \mu\text{m}$; (h) $y = 6.53 \mu\text{m}$; (i) $x = 9.71 \mu\text{m}$

Fig. 6 Simulated results of multi-wavelength and multifocal metasurface. (a) $z = 10.15 \mu\text{m}$; (b) $y = 9.67 \mu\text{m}$;

(c) $x = 6.47 \mu\text{m}$; (d) $z = 10.38 \mu\text{m}$; (e) $y = 3.29 \mu\text{m}$; (f) $x = 3.29 \mu\text{m}$; (g) $z = 10.36 \mu\text{m}$; (h) $y = 6.53 \mu\text{m}$; (i) $x = 9.71 \mu\text{m}$

由于线偏振(LP)光可以看作是正交的左旋圆偏(LCP)光和右旋圆偏光的叠加。对于 LCP 光入射, 利用沿逆时针方向旋转的纳米柱来实现相应的 $0 \sim 2\pi$ 相位调控。在这里, 将绿光响应下的反向旋转纳米柱也引入到超元胞中, 即在超元胞中将绿光响应下的两种旋向纳米柱逐行进行交替排布, 以构建多波长偏振复用多焦点超表面。设计了一个尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 的多波长偏振复用多焦点超表面, 其响应波长、设计的偏转角度 θ 及调制方位角

φ_f 分别为: 红光($\lambda = 700 \text{ nm}$)仅对 RCP 光响应, $\theta_{\text{red-RCP}} = 90^\circ, \varphi_{f\text{-red-RCP}} = 18^\circ$; 绿光($\lambda = 513 \text{ nm}$)同时对 RCP 光和 LCP 光响应, $\theta_{\text{green-RCP}} = 225^\circ, \varphi_{f\text{-green-RCP}} = 25^\circ, \theta_{\text{green-LCP}} = 45^\circ, \varphi_{f\text{-green-LCP}} = 25^\circ$; 蓝光($\lambda = 405 \text{ nm}$)仅对 RCP 光响应, $\theta_{\text{blue-RCP}} = 0^\circ, \varphi_{f\text{-blue-RCP}} = 18^\circ$ 。各个焦点与超表面的垂直设计距离均为 $10 \mu\text{m}$ 。经过全光仿真, 发现该超表面在 xy 平面具有偏振复用能力, 得到的归一化电场强度分布如图 7 所示。当仅有 RCP 光入射时, 各个焦点在

xy 平面上的归一化电场强度分布如图 7(a)~(c) 所示, 三个焦点的位置分别为: $\theta_{\text{red-RCP}} = 90^\circ$, $\varphi_{f\text{-red-RCP}} = 17.13^\circ$; $\theta_{\text{green-RCP}} = 225^\circ$, $\varphi_{f\text{-green-RCP}} = 23.87^\circ$; $\theta_{\text{blue-RCP}} = 0^\circ$, $\varphi_{f\text{-blue-RCP}} = 17.10^\circ$, 与设计值基本一致。红光、绿光和蓝光的聚焦效率分别为 26.24%, 28.04% 和 14.83%。当仅有 LCP 光入射时, 只有部分绿光以 25.42% 的聚焦效率被调制到 $\theta_{\text{green-LCP}} = 45^\circ$, $\varphi_{f\text{-green-LCP}} = 26.21^\circ$ 的位置, 而绿光和蓝光都有不同程

度的发散而成为背景光, 如图 7(d)~(f) 所示。当入射光改变为 LP 光时, 绿光同时被调制到 $\theta_{\text{green-RCP}} = 225^\circ$ 和 $\theta_{\text{green-LCP}} = 45^\circ$ 的位置, 聚焦效率分别为 21.47% 和 19.01%。与 RCP 光照射相比, 红光和蓝光的调制位置变化不大, 聚焦效率分别为 25.56% 和 13.68%, 如图 7(g)~(i) 所示。在这里, 最低效率源自蓝光的调制, 这是由于响应蓝光的纳米柱的几何尺寸最小, 因此其在超表面上的有效面积最小。

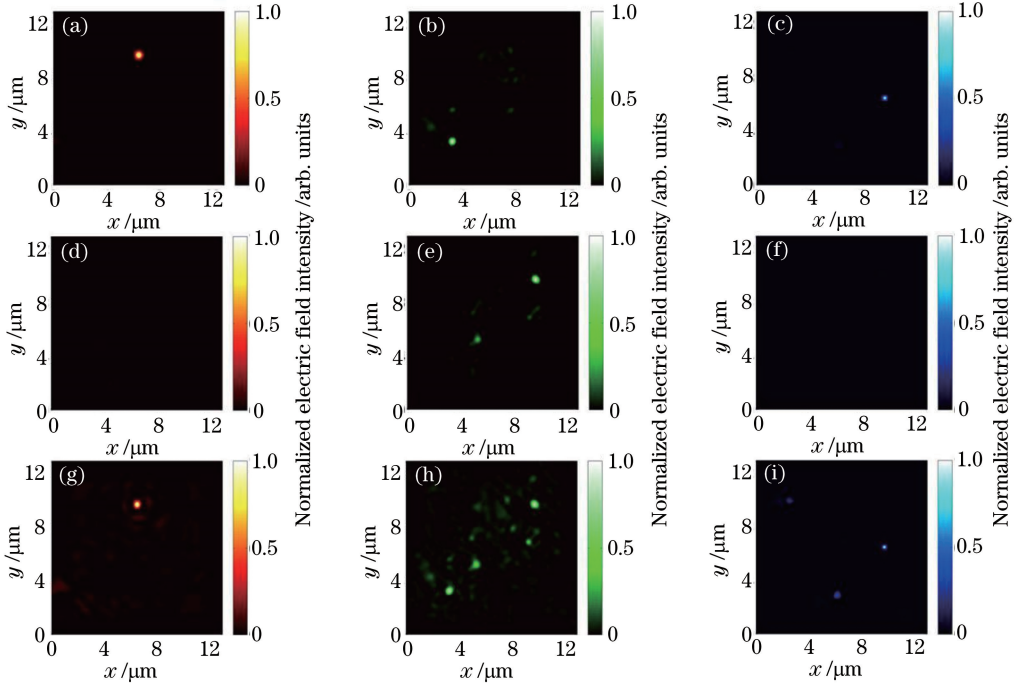


图 7 多波长偏振复用多焦点超表面器件 xy 平面 ($z = 10 \mu\text{m}$) 上的焦点电场强度分布。

(a)~(c) RCP 光入射时; (d)~(f) LCP 光入射时; (g)~(i) LP 光入射时

Fig. 7 Electric field intensity distributions at focal point within xy plane ($z = 10 \mu\text{m}$) of multi-wavelength polarization-multiplexed multifocal metasurface. (a)~(c) When RCP light is incident; (d)~(f) when LCP light is incident; (g)~(i) when LP light is incident

4 结 论

在实现单波长聚焦超表面和多波长多焦点超表面的基础上, 成功设计了多波长偏振复用多焦点超表面。所设计的超表面由三种不同尺寸的纳米柱及衬底构成。通过几何相位实现了光场调控。仿真计算的结果表明, 单波长聚焦超表面对入射的右旋圆偏光有较高的聚焦效率; 多波长多焦点超表面是单波长器件的整合, 具有良好的聚焦性能, 仅一个超表面器件就能够将红绿蓝三色光同时聚焦到同一焦平面的不同位置处, 且通过改变入射光的偏振态可实现焦点位置的调控。所涉及的超表面器件是聚焦透镜、滤光片和偏振分束器的集成组件, 可以应用于图像传感器, 具有较小的体积, 能提高入射光的利用

率。由于红色、绿色和蓝色通道在空间上是分离的, 并且所设计的器件不含有单独的滤光片, 因此光电二极管所收集的光能量得到提高。在传统的图像传感器中, 当白光通过红色滤光片时, 蓝光和绿光是被浪费掉。而所设计的多波长偏振复用多焦点超表面有着较大的白光收集区域, 能够提高聚焦效率。超表面器件具有设计灵活和轻量化特点, 可以被应用到更多的光学系统中, 并促进现代光学向小型化、轻量化的方向发展。

参 考 文 献

[1] Ye J S, Zhang Y, Hane K. Improved first Rayleigh-Sommerfeld method applied to metallic cylindrical focusing micro mirrors[J]. Optics Express, 2009, 17 (9): 7348-7360.

- [2] Fujita T, Nishihara H, Koyama J. Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(12): 578-580.
- [3] Faklis D, Michael Morris G. Spectral properties of multiorder diffractive lenses [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2462-2468.
- [4] Bendickson J M, Glytsis E N, Gaylord T K. Metallic surface-relief on-axis and off-axis focusing diffractive cylindrical mirrors[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(1): 113-130.
- [5] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [6] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 889-898.
- [7] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [8] 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.
- [9] Kruk S, Hopkins B, Kravchenko I I, et al. Invited article: broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(3): 030801.
- [10] Liu T J. Techniques and application research on airborne multispectral digital camera system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2002.
刘团结. 航空多光谱数字相机系统关键技术及应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2002.
- [11] Hou J L. Aeronautical multi-spectral CCD camera [J]. *Radio Communications Technology*, 1992, 18(1): 57-63.
侯建玲. 一种航空型多光谱 CCD 相机[J]. *无线电通信技术*, 1992, 18(1): 57-63.
- [12] 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.
- [13] Chen W T, Zhu A Y, Khorasaninejad M, et al. Immersion meta-lenses at visible wavelengths for nanoscale imaging[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3188-3194.
- [14] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [15] Pu M B, Li X, Ma X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum [J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [16] Wang Y, Zhang S, Shen Y, et al. Manipulation on amplitude of anomalous refraction in staggered terahertz V-shaped metasurface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0713001.
汪云, 章少华, 沈云, 等. 太赫兹 V-形错位超表面异常折射振幅调控研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0713001.
- [17] Luo Y, Wang W T, Zhao P J, et al. Dual-mode metasurface of polarization-specific focusing and keeping wavefront [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0301007.
罗宇, 王文涛, 赵鹏九, 等. 偏振特异的聚焦和波前保持的双模超表面[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0301007.
- [18] Jiang R, He Y L, Zhang X K, et al. Polarization order adjustment of cylindrical vector beams by using two-dimensional dielectric metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0705001.
蒋锐, 贺炎亮, 张小科, 等. 基于二维电介质超表面的柱矢量光束偏振阶数调控[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0705001.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Wang B, Dong F L, Li Q T, et al. Visible-frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5235-5240.
- [22] 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(1): 7069.