

## 基于介质超表面的圆偏振复用全息

万希智 孙雪平 王望 刘卫国

### Circular polarization multiplexing holography based on dielectric metasurface

WAN Xizhi, SUN Xueping, WANG Wang, LIU Weiguo

引用本文:

万希智, 孙雪平, 王望, 等. 基于介质超表面的圆偏振复用全息[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 630–636. DOI: 10.5768/JAO202445.0302002

WAN Xizhi, SUN Xueping, WANG Wang, et al. Circular polarization multiplexing holography based on dielectric metasurface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 630–636. DOI: 10.5768/JAO202445.0302002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0302002>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多路角度复用体全息三维显示技术

Volume holographic display technology based on angular multiplexing

应用光学. 2017, 38(2): 215–220 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202002>

#### 基于超表面材料的光波相位精密操控新技术

Accurate controlling of optical phase based on metasurfaces

应用光学. 2017, 38(2): 153–158 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201001>

#### 基于超表面材料的扇出衍射光学元件

Metasurface fan-out diffractive optical elements

应用光学. 2019, 40(2): 306–310 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205001>

#### 超表面图像显示技术研究

Study on metasurfaces image display technology

应用光学. 2019, 40(6): 1045–1049 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0602001>

#### 偏振相移与相位共轭结合的散射光聚焦技术研究

Focusing of scattering light by combining polarization phase shifting and digital optical phase conjugation

应用光学. 2019, 40(1): 63–67 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101011>

#### 基于密集波分复用的20 Gbit/s大气激光通信

20 Gbit/s atmospheric laser communication based on dense wavelength division multiplexing

应用光学. 2017, 38(1): 136–139 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0630-07

# 基于介质超表面的圆偏振复用全息

万希智, 孙雪平, 王 望, 刘卫国

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对单一相位调控方式无法实现圆偏振复用问题, 使用矩形硅砖结构, 通过复合传输相位和几何相位, 设计了一种工作在  $1.55 \mu\text{m}$  下可以实现圆偏振复用全息的超表面。仿真结果表明, 分别在左旋圆偏振光和右旋圆偏振光照射下, 在远场可以观测到两幅清晰的全息图像, 透过效率分别为 60.8% 和 61.5%, 偏振转化效率分别为 79.1% 和 78.7%。设计的圆偏振复用超表面具有微弱串扰、两通道独立设计以及设计简单等优点, 并且超表面元件体积小、重量轻、易于集成, 在信息复用、信息存储或编码、防伪等方面具有较大的应用潜力。

**关键词:** 全介质; 超表面; 相位调控; 圆偏振复用; 全息成像

中图分类号: TN26; O436

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0302002](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0302002)

## Circular polarization multiplexing holography based on dielectric metasurface

WAN Xizhi, SUN Xueping, WANG Wang, LIU Weiguo

(School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** To solve the problem that circular polarization multiplexing cannot be realized by a single phase control mode, a rectangular silicon brick structure was used to design a metasurface that could realize circular polarization multiplexing holography at  $1.55 \mu\text{m}$  by combining transmission phase and geometric phase. The simulation results show that under the illumination of left circularly polarized light and right circularly polarized light, two clear holographic images can be observed in the far field, with transmission efficiency of 60.8% and 61.5%, and polarization conversion efficiency of 79.1% and 78.7%, respectively. The designed circularly polarized multiplexing metasurface has the advantages of weak crosstalk, independent design of two channels, and simple design. Moreover, the metasurface components are small in size, light in weight, easy to integrate, and have great application potential in information reuse, information storage or encoding, anti-counterfeiting, and other aspects.

**Key words:** all-dielectric; metasurface; phase regulation; circular polarization multiplexing; holographic imaging

## 引言

超材料 (metamaterial) 是一种三维人工结构, 具备一些天然材料没有的性质, 这些性质主要来自亚波长结构以及结构不同的排布方式<sup>[1-3]</sup>。由于超材料是三维的, 实际加工应用较为困难, 研究者们逐步把研究重心转移到了超表面。超表面 (metasurface) 是二维形式的超材料<sup>[4]</sup>, 同样由亚波长结

构排列而成, 相比于三维超材料, 二维的超表面加工更加简单, 损耗较低, 更易于集成。早期的超表面器件多使用金属材料<sup>[5-7]</sup>, 而金属材料的欧姆损耗限制了超表面器件的调控效率。随着介质材料如硅、二氧化硅、二氧化钛等在超表面中的应用, 从根本上解决了金属超表面调控效率低的问题, 并且透射式介质超表面在实际应用中会比反射式

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-08-22

基金项目: 陕西省教育厅专项基金 (22JK0415); 陕西省自然科学基础研究 (2022JQ-676)

作者简介: 万希智 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事超表面全息研究。E-mail: [wzx1544189434@163.com](mailto:wxz1544189434@163.com)

通信作者: 刘卫国 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学先进制造、电子材料与元器件等研究。E-mail: [wgliu@163.com](mailto:wgliu@163.com)

金属超表面更加便利。目前, 介质超表面已在不同领域取得应用, 如全息显示<sup>[8-9]</sup>、超透镜<sup>[10-12]</sup>等。其中, 超表面凭借其优良的电磁调控能力在全息编码过程中展现出显著的优势, 通过合理设计亚波长单元结构的几何形状和尺寸参数(形状、尺寸、转角等), 可以对光波的振幅、相位、偏振等参数实现精确调控。与传统全息片相比, 超表面全息片具有编码方式简单、编码容量大等优势, 可以实现高质量的图像重建<sup>[13-15]</sup>。

常用的全息超表面主要分为三类: 振幅型超表面<sup>[16]</sup>、相位型超表面和复振幅型超表面。其中相位型超表面是指, 通过亚波长结构产生异常相位突变, 对相位进行调控的器件。相位型超表面大致可分为三类<sup>[17]</sup>: 传输相位超表面<sup>[18]</sup>、几何相位超表面<sup>[19-20]</sup>和电路型相位超表面。这三种相位型超表面尽管都应用于波前调控, 但是上述任何一种单一相位型超表面都存在圆偏振复用困难的难题。传输相位和电路型相位超表面无手性响应, 而几何相位超表面虽具备手性响应, 但由于存在共轭关系, 导致无法实现对左右旋圆偏振光波前的任意独立调控<sup>[21]</sup>。

本文设计了一种透射式全介质超表面, 通过结合传输相位调控与几何相位调控, 该超表面可以独立调控在工作波长下一对圆偏振正交偏振态的相位。通过理论分析和仿真证明, 该超表面可以精确且连续地调制圆偏振光的相位, 实现圆偏振复用全息功能。

## 1 超表面相位调控原理

传输相位超表面通过电磁波在传输过程中产生的光程差实现相位调控。假定介质的等效折射率为 $n_{\text{eff}}$ , 波长为 $\lambda$ 的电磁波在介质中传输一定距离 $d$ , 则电磁波积累的传输相位 $\varphi$ 可表示为

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

基于介质等效折射率理论, 通过改变两种或多种介质在单元结构内的占比, 从而改变等效折射

$$\begin{bmatrix} E_{x\text{out}} \\ E_{y\text{out}} \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{J}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left\{ (e^{i\varphi_x} + e^{i\varphi_y}) \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + (e^{i\varphi_x} - e^{i\varphi_y}) e^{2i\sigma\theta} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

式中 $\sigma = \pm 1$ , 对应于左旋和右旋圆偏振态。出射电场除了含有复振幅为 $(e^{i\varphi_x} + e^{i\varphi_y})/2\sqrt{2}$ 的原有主偏振态电磁波外, 还产生了复振幅为 $(e^{i\varphi_x} - e^{i\varphi_y})e^{2i\sigma\theta}/2\sqrt{2}$ 的正交偏振态电磁波, 且正交偏振态电磁波携

率 $n_{\text{eff}}$ , 可以有效降低光学元件的厚度 $d$ , 实现光学元件的平面化。

几何相位(pancharatnam-berry, 简称 PB 相位)可通过旋转各向异性结构实现。为了便于理解, 电磁波在超表面传输过程中所产生的几何相位可通过琼斯矩阵来描述, 即:

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

式中:  $E_{x\text{out}}$  和  $E_{y\text{out}}$  分别为出射电磁波的  $x$  和  $y$  偏振分量;  $E_{x\text{in}}$  和  $E_{y\text{in}}$  为入射电磁波的  $x$  和  $y$  偏振分量。如图 1 所示, 假设各向异性结构对应  $u-v$  坐标系, 整个超表面对应  $x-y$  坐标系, 两坐标系的夹角为  $\theta$ , 则各向异性超构表面的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{J} = \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} e^{i\varphi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta) \quad (3)$$

式中:  $\varphi_x$  和  $\varphi_y$  为各向异性结构沿其长短轴的相移;  $\mathbf{R}(\theta)$  为旋转矩阵, 可表示为

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)带入式(3), 化简可得:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} e^{i\varphi_x} \cos^2 \theta + e^{i\varphi_y} \sin^2 \theta & (e^{i\varphi_x} - e^{i\varphi_y}) \sin \theta \cos \theta \\ (e^{i\varphi_x} - e^{i\varphi_y}) \sin \theta \cos \theta & e^{i\varphi_x} \sin^2 \theta + e^{i\varphi_y} \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

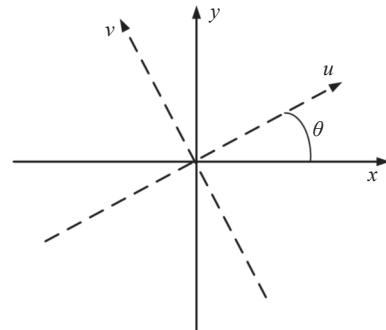


图 1 各向异性材料所在局部坐标系

Fig. 1 Local coordinate system of anisotropic materials

当 1 束圆偏振光入射至超表面后, 输出电场表达式为

$2\sqrt{2}$  的正交偏振态电磁波, 且正交偏振态电磁波携带了  $2\sigma\theta$  的附加几何相位。也就是说, 当各向异性结构旋转角为  $\theta$  时, 带来的相位调控量为  $\pm 2\theta$ , 这使

各向异性结构的旋转角度在  $0 \sim \pi$  时, 相位在  $0 \sim 2\pi$  内被精确调控。

通过改变各向异性结构的尺寸可以调控传输相位, 改变各向异性结构的旋向可以引入几何相位。因此, 当同时改变结构的旋向和尺寸时, 理论上可同时引入几何相位和传输相位, 进而实现复合相位调控。假设 1 对入射正交偏振态  $\lambda^+ = [\lambda_1^+ \quad \lambda_2^+]^\top$  和  $\lambda^- = [\lambda_1^- \quad \lambda_2^-]^\top$ , 出射偏振态分别为  $\kappa^+ = [\kappa_1^+ \quad \kappa_2^+]^\top$  和  $\kappa^- = [\kappa_1^- \quad \kappa_2^-]^\top$ , 且  $\kappa^\pm = (\lambda^\pm)^*$  (右上角标 T 表示矩阵转置, 星号表示复共轭),  $\varphi^\pm$  为任意 1 对相位轮廓。则器件琼斯矩阵需满足:

$$\begin{aligned} J\lambda^+ &= e^{i\varphi^+} \kappa^+ \\ J\lambda^- &= e^{i\varphi^-} \kappa^- \end{aligned} \quad (7)$$

化简得到:

$$J = \begin{bmatrix} e^{i\varphi^+}(\lambda_1^+)^* & e^{i\varphi^-}(\lambda_1^-)^* \\ e^{i\varphi^+}(\lambda_2^+)^* & e^{i\varphi^-}(\lambda_2^-)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^+ & \lambda_1^- \\ \lambda_2^+ & \lambda_2^- \end{bmatrix}^{-1} \quad (8)$$

令式(5)与式(8)相等, 求解方程组便可以得到单元结构的结构参数  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$  和  $\theta$ 。将 1 对正交的左右旋圆偏振光  $\lambda^+ = [1 \quad i]^\top / \sqrt{2}$  和  $\lambda^- = [1 \quad -i]^\top / \sqrt{2}$  代入式(8)中, 并求解方程组可得:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \frac{\varphi^+ + \varphi^-}{2} \\ \varphi_y &= \frac{\varphi^+ + \varphi^-}{2} - \pi \\ \theta &= \frac{\varphi^+ - \varphi^-}{4} \end{aligned} \quad (9)$$

## 2 超表面全息片设计

### 2.1 单元结构设计

本文设计的超表面为透射式超表面, 工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 一般的各向异性结构的横截面形状主要有椭圆形和矩形, 考虑到加工技术的要求, 选择横截面为矩形的纳米砖结构。为了使纳米砖具有较低的深宽比, 所以需选择折射率高、对光波的损耗低的材料作为相位调控单元。硅材料原料简单易得, 加工技术成熟, 在  $1.55 \mu\text{m}$  波长下透过率高、折射率大, 故选择硅作为纳米砖的材料。目前常用的基底材料有硅、石英、二氧化硅等。二氧化硅具有折射率较低、透过率较高的性质, 对光波的损失较少, 所以选择二氧化硅作为基底材料。

超表面单元结构如图 2 所示, 由硅纳米砖及二氧化硅基底构成。图 2 中纳米砖的高度为  $H$ , 长宽分别为  $L$ 、 $W$ , 旋转角度为  $\theta$ , 单元结构的周期为

$P$ (基底厚度几乎无影响)。将不同尺寸、旋转角的纳米砖按一定顺序排列起来, 可以对左右旋圆偏振态的波前独立调控, 实现偏振复用全息功能。

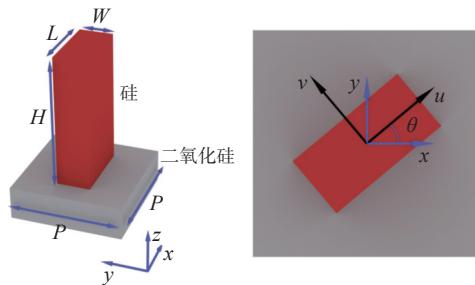


图 2 放置在二氧化硅基底上的矩形硅砖结构

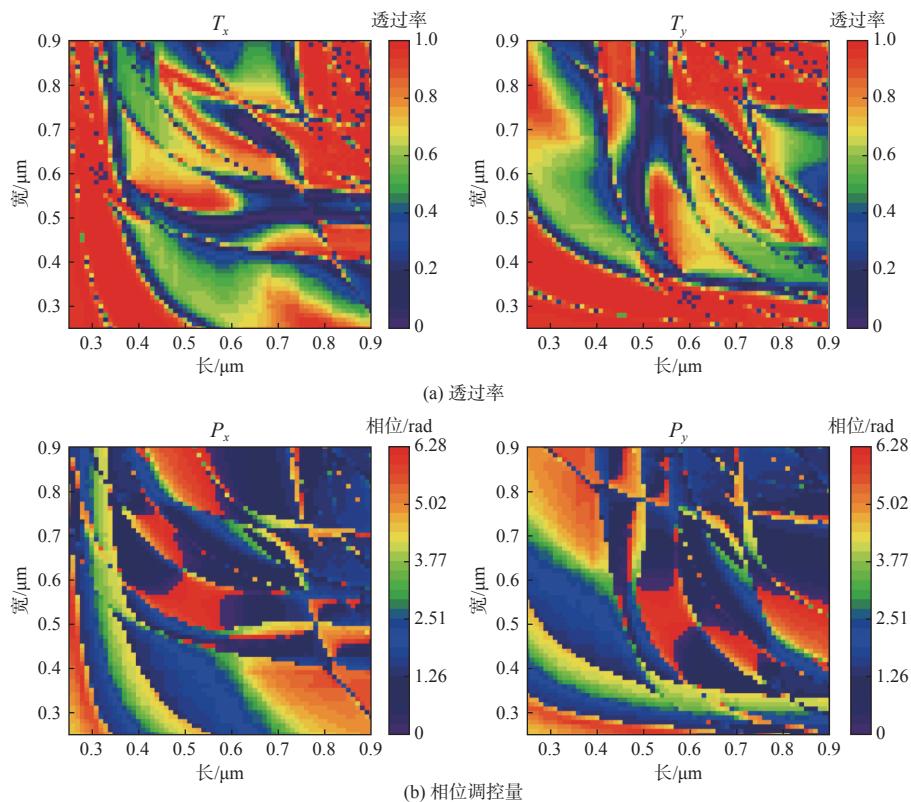
Fig. 2 Rectangular silica brick structure placed on silica substrate

在波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的平面波照射下, 使用时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 在商业软件 FDTD solutions 中进行仿真, 对单元结构的不同参数进行优化设计。为了确保高效率, 单元结构的周期  $P$  和各向异性结构高度  $H$  在工作波长下进行优化。在 FDTD solutions 中建立单元结构模型, 该模型在  $x$  和  $y$  方向上设置周期性边界条件, 在  $z$  方向上设置完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 边界条件, 主要是将边界处的电磁波直接截断, 消除散射等情况对电磁波计算的影响。使用  $x$  方向的线偏振光由基底垂直入射, 为了保证在长宽变化范围内结构相位值满足覆盖  $0 \sim 2\pi$  条件以及使结构具有较低的深宽比, 通过不断地调整参数, 最终确定了周期  $P=1 \mu\text{m}$  和高度  $H=1.2 \mu\text{m}$ , 纳米砖长度  $L$  和宽度  $W$  以  $0.01 \mu\text{m}$  的间隔在  $0.25 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}$  之间变化, 用来获得透射光的透过率和相位调控量。图 3(a) 和图 3(b) 显示了  $x$  方向上透过率  $T_x$  和相位调控量  $P_x$  以及  $y$  方向上透过率  $T_y$  和相位调控量  $P_y$ 。 $T_y$  和  $P_y$  通过对  $T_x$  和  $P_x$  的分布矩阵进行转置获得。从图 3(b) 中可以看出,  $P_x$  的范围覆盖了  $0 \sim 2\pi$ , 满足相位调制要求。

### 2.2 超表面阵列设计及仿真

首先需要获取两幅图片的相位信息。为了快速得到仿真结果, 选取两幅像素数为  $101 \times 101$  的图像。本文设计的是同轴全息, 全息距离为  $10 \text{ mm}$ , 使用基于菲涅尔衍射的 Gerchberg-Saxton(GS) 算法, 通过不断迭代, 分别得到了两幅图片每个像素点处的相位信息  $\varphi^+(x, y)$  和  $\varphi^-(x, y)$ 。算法流程如下:

- 1) 对输入光场给定初始随机相位, 设置振幅

图3  $x$  线性偏振光入射下不同长度  $L$  和宽度  $W$  纳米砖的透过率和相位调控量**Fig. 3 Transmittance and phase modulation of nanobricks with different lengths  $L$  and widths  $W$  under  $x$  linear polarized light incidence**

为1, 做正向傅里叶变换, 得到输出光场分布;

2) 保持步骤1)得到的输出光场分布的相位不变, 用期望得到的振幅替代输出光场的振幅, 做傅里叶逆变换, 得到输入光场分布;

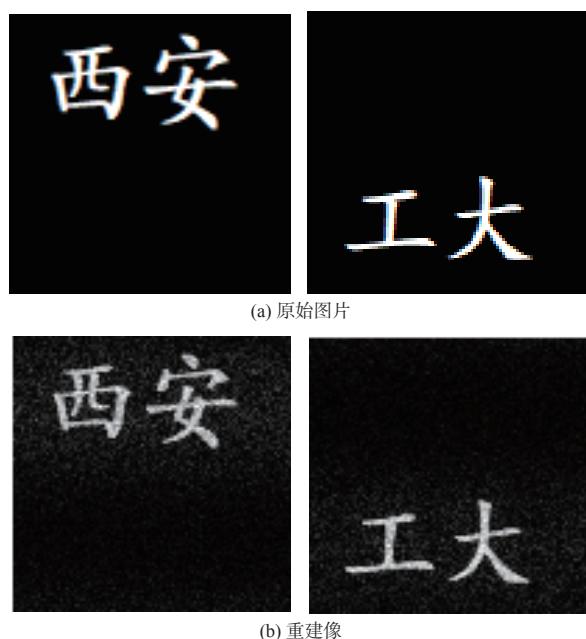
3) 将步骤2)得到的输入光场分布的振幅替换为1, 相位不变, 做正向傅里叶变换, 得到输出光场分布;

4) 重复步骤2)和步骤3), 达到预设迭代次数时跳出循环, 得到输入平面的相位分布。

利用上述GS算法, 对如图4(a)所示的两幅目标图像进行重建, 重建图像如图4(b)所示。从图4中可以看出, 再现的图像效果并不是非常好, 实际上在图像中存在作为噪声的一级衍射光斑, 但由于图像为黑色背景, 所以噪声融入到背景之中。重建像与目标图像之间的相似度达到了要求, 得到的全息面相位分布如图4(c)所示。

$\varphi^+(x, y)$  和  $\varphi^-(x, y)$  分别对应于左旋圆偏振光 ( $\sigma = 1$ ) 和右旋圆偏振光 ( $\sigma = -1$ )。选择  $x$  方向和  $y$  方向透过率都大于0.6的单元结构, 建立各向异性结构尺寸与相位的关系库, 根据式(9)计算得到的结构参数, 在库中按照  $\sqrt{(\varphi_x(x, y) - P_x(x, y))^2 + (\varphi_y(x, y) - P_y(x, y))^2}$

最小的原则选取每个点处的各向异性结构尺寸。最后, 将尺寸合适的各向异性结构在  $x$  和  $y$  方向上以等间隔  $P=1 \mu\text{m}$  排列在二氧化硅基底上, 并给予相应的旋转角度  $\theta(x, y)$ , 即可完成器件的设计。图5为超表面成像示意图。



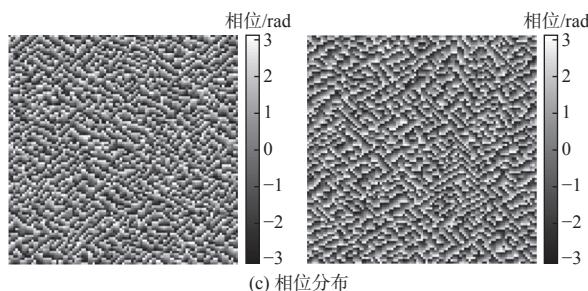


图 4 原始图片、重建像及相位分布

Fig. 4 Original images, reconstructed images, and phase distribution

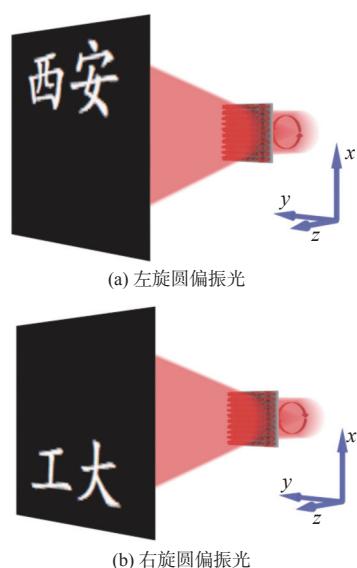


图 5 超表面成像示意图

Fig. 5 Schematic diagram of metasurface imaging

在 FDTD Solutions 中对排列完成后的超表面进行仿真。图 6 为超表面结构排列示意图。图 6 中 1 个像素对应 1 个单元结构，器件整体尺寸为  $101 \mu\text{m} \times 101 \mu\text{m}$ 。

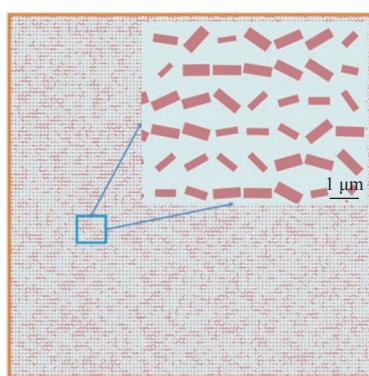


图 6 超表面结构排布图

Fig. 6 Layout diagram of metasurface structure

此时的边界条件与单元结构仿真时不同，在

$x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向都使用 PML 边界条件。分别将光源设置为左旋、右旋圆偏振光，由基底垂直照射在超表面上。在观察仿真结果时，最直接的办法就是在成像面处放置 1 个监视器，这样可以通过监视器直接得到仿真结果。但是，由于成像距离较远，导致计算量巨大，加上计算机硬件性能有限，仿真时间大大增加，甚至无法计算。第二种方法就是在近场放置监视器（放置位置距离各向异性结构顶部至少半个波长的距离），依据光的传播原理，结合近场监视器得到的电场数据计算出远场分布。这种方法可以在计算机资源有限的情况下得到远场正确的仿真结果。左旋圆偏振光通过超表面后的全息像如图 7(a) 所示，右旋圆偏振光通过超表面后的全息像如图 7(b) 所示，线偏振光通过超表面后的全息像如图 7(c) 所示。从前两幅全息图中可以清晰地观察到“西安”和“工大”几个字，与原始图片一致。左旋、右旋圆偏振光入射下的透过效率分别为 60.8%、61.5%，偏振转换效率分别为 79.1%、78.7%。由于并非所有单元结构的偏振转换效率都是 100%，因此，出射光中存在一部分和入射圆偏振光偏振状态相同的光，这部分光也会进行全息成像。两幅图中都存在这部分光所成的全息像，只不过强度太低无法被识别。

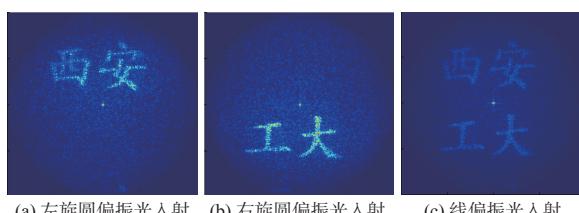


图 7 仿真结果

Fig. 7 Simulation results

在 MATLAB 中编写程序对全息图像进行灰度化处理，并减弱中心亮斑的强度，如图 8 所示。

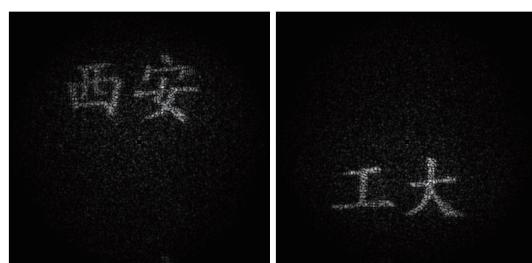


图 8 经 MATLAB 处理后的全息图

Fig. 8 Hologram processed by MATLAB

使用标准均值差 (STD mean difference, SMD)

函数<sup>[22]</sup>对全息图的清晰度进行评价。SMD 函数可以表示为

$$F_{\text{SMD}} = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} [|f(x+1, y) - f(x, y)| + |f(x, y+1) - f(x, y)|] \quad (10)$$

式中:  $f(x, y)$  为像素点在  $(x, y)$  处的灰度值。图像总像素数为  $M \times N$ , 计算得到的值越大, 说明图像越清晰。由于全息图与原始图片尺寸不同, 无法进

行直接比较, 所以在 SMD 函数的基础上作如下处理:

$$F = \frac{F_{\text{SMD}}}{(M-1)(N-1)} \quad (11)$$

使用图像处理软件对原始图片做模糊处理, 从左至右模糊程度依次递增, 最后一幅图片为全息图, 对所有图片分别使用 SMD 函数进行计算, 如图 9 所示。图 9 下边的数字为使用 SMD 函数的计算结果。

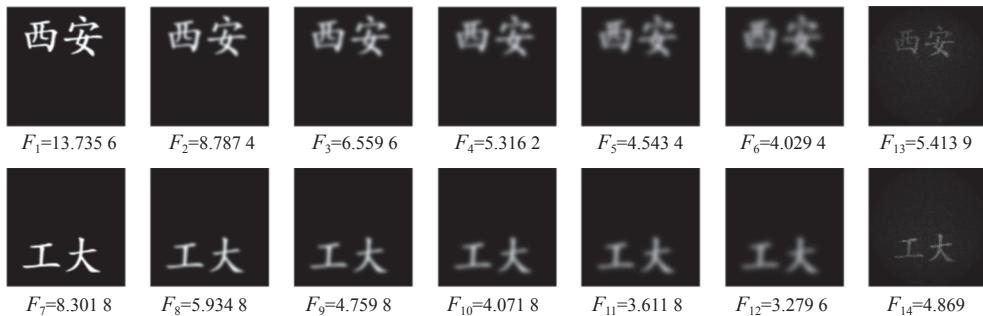


图 9 不同模糊程度图像计算结果

Fig. 9 Calculation results of images with different levels of blur

由图 9 计算结果可以看出,  $F_{13}$  介于  $F_3$  和  $F_4$  之间,  $F_{14}$  介于  $F_8$  和  $F_9$  之间, 说明全息图的清晰度应当介于相对应的图片之间。由于全息图中字符亮度较低, 对清晰度有一定的影响。

### 3 结论

本文使用硅材料作为相位调控单元, 通过将传输相位调制和几何相位调制结合到单元结构的设计上, 在工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$  下可以在远场生成两幅清晰的全息图像, 实现圆偏振复用全息功能。本文所设计的圆偏振复用超表面具有微弱串扰、两通道独立设计以及设计简单等优点, 并且超表面元件体积小、重量轻、易于集成, 在信息复用、信息存储或编码、防伪等方面具有巨大的应用潜力。

### 参考文献:

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [3] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [4] 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.
- [5] SUN S L, HE Q, XIAO S Y, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [6] AIETA F, GENEVET P, KATS M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [7] YU N F, AIETA F, GENEVET P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [8] LI Z L, CHEN C, GUAN Z Q, et al. Three - channel metasurfaces for simultaneous meta - holography and meta - nanoprinting: a single - cell design approach [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(6): 2000032.
- [9] ZHANG Z, ZHANG Z P, TONG Z J, et al. Three-channel metasurface based on simultaneous and independent

- control of near and far field under a single line light source[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30936-30948.
- [ 10 ] SUN X, MA R, PU X, et al. High-efficiency polarization multiplexing metalenses[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(9): 1500.
- [ 11 ] WANG Y, CHEN Q, YANG W, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 5560.
- [ 12 ] CHEN W T, ZHU A Y, SANJEEV V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2018, 13: 220-226.
- [ 13 ] HUANG L, CHEN X, MÜHLENBERND H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1-8.
- [ 14 ] SUN S, ZHOU Z, ZHANG C, et al. All-dielectric full-color printing with TiO<sub>2</sub> metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4445-4452.
- [ 15 ] HU Y, LUO X, CHEN Y, et al. 3D-Integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-9.
- [ 16 ] 戴琦, 付婉, 邓联贵, 等. 超表面图像显示技术研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 1045-1049.
- DAI Qi, FU Rao, DENG Liangui, et al. Study on metasurfaces image display technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1045-1049.
- [ 17 ] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. 光工程, 2017, 44(3): 255-275.
- LI Xiong, MA Xiaoliang, LUO Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275.
- [ 18 ] YOON G, LEE D, NAM K T, et al. Pragmatic metasurface hologram at visible wavelength: the balance between diffraction efficiency and fabrication compatibility[J]. *ACS Photonics*, 2017, 5(5): 1643-1647.
- [ 19 ] ZHENG G, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [ 20 ] 樊志华, 吴雨霏, 马晓燠, 等. 基于相变超构表面的全息相位开关[J]. 光子学报, 2022, 51(1): 268-277.
- FAN Zhihua, WU Yufei, MA Xiaoyu, et al. Holographic phase switch based on phase-change metasurface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(1): 268-277.
- [ 21 ] WEN D, YUE F, LI G, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-7.
- [ 22 ] 熊锐, 顾乃庭, 徐洪艳. 一种适应多方向灰度梯度变化的自动对焦评价函数[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 373-380.
- XIONG Rui, GU Naiting, XU Hongyan. An auto-focusing evaluation function adapted to multi-directional gray gradient change[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 373-380.