

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

融合空频复用和近远场复用的多功能超表面图像显示

周宇翀, 丁玮璐, 李子乐, 刘宏超, 付尧, 戴琦, 郑国兴

引用本文:

周宇翀, 丁玮璐, 李子乐, 等. 融合空频复用和近远场复用的多功能超表面图像显示[J]. 光电工程, 2023, 50(8): 230153.

Zhou Y C, Ding W J, Li Z L, et al. Multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230153.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230153>

收稿日期: 2023-06-29; 修改日期: 2023-08-28; 录用日期: 2023-08-28

相关论文

Metasurface-based nanoprinting: principle, design and advances

Rao Fu, Kuixian Chen, Zile Li, Shaohua Yu, Guoxing Zheng

Opto-Electronic Science 2022, 1(10): 220011 doi: [10.29026/oes.2022.220011](https://doi.org/10.29026/oes.2022.220011)

Crosstalk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization

Yaxin Zhang, Mingbo Pu, Jinjin Jin, Xinjian Lu, Yinghui Guo, Jixiang Cai, Fei Zhang, Yingli Ha, Qiong He, Mingfeng Xu, Xiong Li, Xiaoliang Ma, Xiangang Luo

Opto-Electronic Advances 2022, 5(11): 220058 doi: [10.29026/oea.2022.220058](https://doi.org/10.29026/oea.2022.220058)

Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface

Xin Li, Qinmiao Chen, Xue Zhang, Ruizhe Zhao, Shumin Xiao, Yongtian Wang, Lingling Huang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(8): 220060 doi: [10.29026/oea.2023.220060](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220060)

片上光学近场的远场辐射调控

陈宜臻, 潘威康, 金相宇, 何琼, 周磊, 孙树林

光电工程 2023, 50(8): 230173 doi: [10.12086/oe.2023.230173](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230173)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230153

融合空频复用和近远场复用的多功能超表面图像显示

周宇翀¹, 丁玮珺¹, 李子乐^{1,2}, 刘宏超³,
付 尧¹, 戴 琦^{1,2*}, 郑国兴^{1,2*}

¹ 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;

² 鹏城实验室, 广东 深圳 518055;

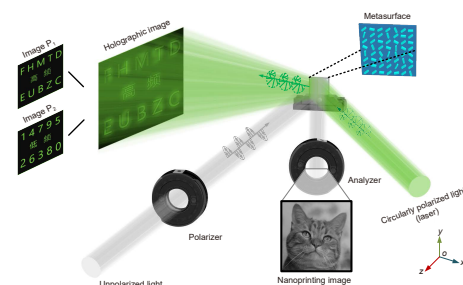
³ 澳门大学应用物理及材料工程研究院, 澳门 999078

摘要: 超表面可以在亚波长尺度上对光波的偏振、振幅、频率、相位等基本参量进行精确调控。基于此背景, 本文提出并实验验证了一种融合空间频率复用和近远场复用的多功能超表面图像显示技术。其中, 近远场复用是利用纳米结构的转角简并性将超表面几何相位调控与光波强度调控相融合, 基于模拟退火算法实现近场灰度图像与远场全息图像的独立编码; 空间频率复用是将两幅图像的不同空间频率成分叠加作为远场全息图像, 可以在不同观察位置分别接收到不同的空间频率信息, 对应高频图像和低频图像。实验结果表明, 通过优化超表面可以同时在不同工作距离实现三幅独立图像(灰度图像、高频图像及低频图像)的显示, 这提升了超表面的信息存储容量。本工作将为超表面多功能复用及其在光学加密、光学防伪等领域的应用提供新思路。

关键词: 超表面; 转角简并性; 近远场复用; 空间频率复用; 图像显示

中图分类号: TB34; O43

文献标志码: A



周宇翀, 丁玮珺, 李子乐, 等. 融合空频复用和近远场复用的多功能超表面图像显示 [J]. 光电工程, 2023, 50(8): 230153

Zhou Y C, Ding W J, Li Z L, et al. Multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230153

Multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing

Zhou Yuchong¹, Ding Weijun¹, Li Zile^{1,2}, Liu Hongchao³,
Fu Rao¹, Dai Qi^{1,2*}, Zheng Guoxing^{1,2*}

¹ Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

² Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

³ Institute of Applied Physics and Materials Engineering, University of Macau, Macao SAR 999078, China

Abstract: Metasurface can precisely modulate the fundamental properties such as polarization, amplitude, frequency, and phase of optical waves at the subwavelength scale. Based on this background, we propose and

收稿日期: 2023-06-29; 修回日期: 2023-08-28; 录用日期: 2023-08-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFE0205800); 国家自然科学基金项目 (12204359, 62205252); 湖北省自然科学基金 (2022CFB641); 中国博士后科学基金 (2022M722448, 2022TQ0243)

*通信作者: 戴琦, daiqiu@whu.edu.cn; 郑国兴, gxzheng@whu.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

experimentally verify a multifunctional metasurface image display technology enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing. In near- and far-field multiplexing, the orientation degeneracy of nanostructures is introduced to combine geometric phase modulation and light intensity modulation, which leads to independent coding of near-field grayscale image and far-field holographic image displays by using simulated annealing algorithm. In spatial frequency multiplexing, different spatial frequency components of two images are added together to generate a hybrid image for hologram design. Since people receive different spatial frequency parts when the observation position changes, both high-frequency and low-frequency images can be easily distinguished. In our experiment, three independent images (a grayscale image, a high-frequency image and a low-frequency image) can be displayed simultaneously at different distances, which explains that our multifunctional metasurface has enhanced information storage capacity. This work provides a new path for multifunctional metasurface design, and possesses broad applications in optical encryption, optical anti-counterfeiting, and many other related fields.

Keywords: metasurface; orientation degeneracy; near- and far-field multiplexing; spatial frequency multiplexing; image display

1 引言

超表面 (Metasurfaces) 是一种亚波长平面结构材料, 其具有能够对光波的偏振、振幅、频率及相位等基本参量进行灵活调控的特性^[1-9], 可用于研发高性能、高效率及高度集成的光学系统^[10-18], 打造高分辨率、高信息密度以及超紧凑的新型光电子功能器件。例如, 通过将金属纳米结构的局域等离子共振和纳米微腔的法布里-珀罗谐振相结合, 可以实现工作效率超过 80%、全息图像高保真的超表面计算全息片^[9]。将马吕斯定理引入超表面设计策略, 可以实现理论分辨率高达 84667 DPI (dots per inch) 的连续灰度调控, 发展高集成、高分辨率的超表面纳米印刷术 (metasurface image nanoprinting)^[16,17]。相较于传统光学材料, 超表面不仅能与现有的二元光学工艺完美兼容, 还具有更为优越的光波调控能力。近年来, 科学家们已相继研发出超表面透镜^[19-24]、微纳光栅^[25-27]、光场相机^[28]、矢量光束发生器^[29-30]、光谱探测器^[31-32] 等新型超构器件, 极大增强了超表面在光电传感、信号探测、激光通信等领域的研究和应用。

超表面对光波基本参量的精确操控主要通过改变其几何形状、尺寸参数、旋转状态、多原子组合方式、入射角度及材料折射率等实现, 这种多设计自由度的特点意味着可以利用超表面同步调控多个光波参量, 进而实现多路信息复用^[33-37], 提升超表面的信息通道数量及信息容量^[38-42]。例如, 暨南大学包燕军等人采用相干超胞元的设计方法, 将多个纳米结构设计为单个超胞元, 通过同时对这些纳米结构的几何参数进行

优化, 实现了不同入射角、工作波长和偏振态下的二元灰度纳米印刷图像复用^[33]。武汉大学邓联贵等人尝试将马吕斯定律和转角简并性引入超表面设计中, 提出了光波振幅和相位独立调控的新模式, 分别记录、显示了连续灰度图像和全息图像, 为近、远场的功能复用研究开辟了一条全新的道路^[36]。德国海德堡大学刘娜等人通过氢化和脱氢的过程改变法布里-珀罗微腔的腔体折射率, 实现了光波振幅调控和相位调控的动态切换, 在超表面的近、远场成功建立两个信息通道^[37]。澳大利亚墨尔本大学温丹丹等人通过优化纳米结构的尺寸和空间位置, 同时调控光波光谱和迂回相位, 也在超表面的近、远场分别实现了纳米印刷图像和全息图像的独立显示^[39]。中国科学院光电技术研究所蒲明博等人通过表面等离子体极化子 (surface plasmon polariton, SPP) 在窄谱带内激发的光子自旋轨道相互作用, 对振幅和相位同时调控, 实现一幅彩色图像和三幅全息图像的分别编码^[41]。武汉大学杨睿等人通过融合迂回相位和几何相位, 利用片上超表面将导波以圆偏光的形式耦合到自由空间中, 打破了此前片上超表面沿传播方向上相位简并的局限性, 实现了可独立编码的四通道远场全息显示复用^[42]。

在早先工作中, 已经证明可以使用空间频率复用原理设计超表面实现双路信息记录^[40]。本文通过建立空间频率复用和多光参量调控之间的联系, 提出了一种全新的多功能超表面图像显示技术, 可以将三幅独立图像 (灰度图像、高频图像和低频图像) 的信息同时记录到单个超表面上, 且仅使用了单尺寸纳米结构的设计方案。图 1 展示了这种多功能超表面的工作过程:

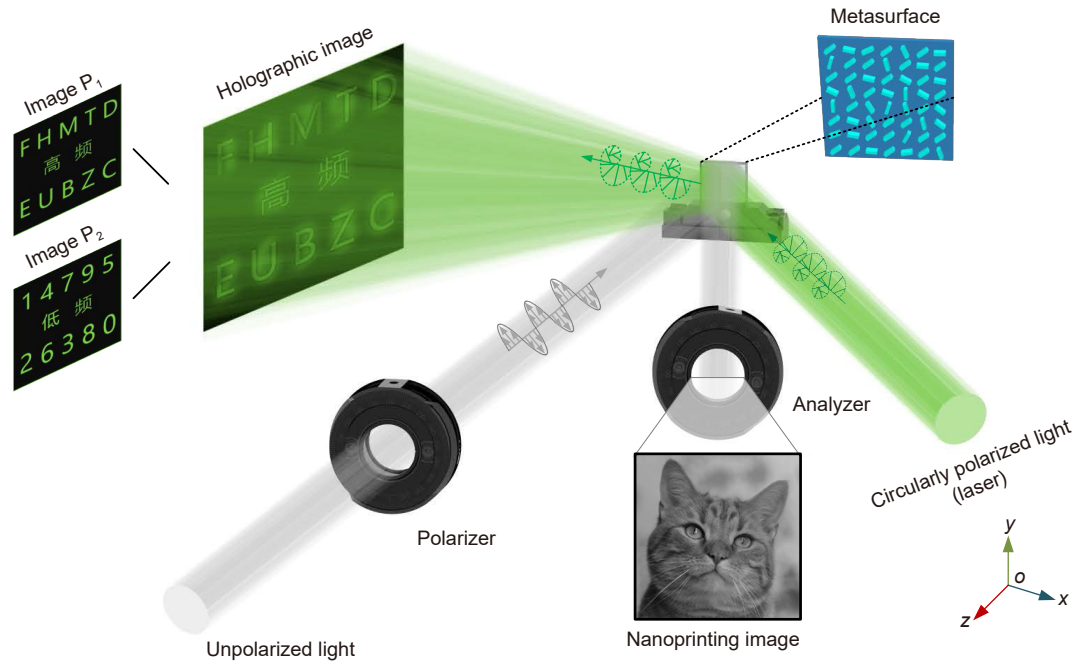


图 1 融合空频复用和近远场复用的多功能超表面图像显示示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing

通过利用光学起偏器和检偏器, 可以控制入射、反射光的偏振态, 在超表面近场显示一幅连续灰度纳米印刷图像; 使用圆偏振态激光入射, 可以在超表面远场空间观察到全息图像, 并且在不同工作距离处分别获取高频、低频信息。该项融合空频复用和近远场复用的多功能超表面具有超紧凑、信息容量高、信息隐蔽性高等优势, 在光学防伪、信息加密、光学信息编码、光存储等领域具有较好的应用前景。

2 基本原理

2.1 近远场复用原理

为简化超表面的加工过程, 选用半导体 SOI (silicon-on-insulator) 材料构建超表面。SOI 材料由硅衬底、氧化层和顶层硅三层结构构成, 基于其构建的 SOI 超表面纳米结构单元如图 2(a) 所示, 从上至下依次为顶层纳米砖 (nanobrick)、中间氧化层和硅衬底。其中, 纳米砖和衬底均为晶体硅材料, 氧化层为二氧化硅材料。纳米砖长轴与 x 轴夹角定义为纳米砖的转角 θ , 纳米砖周期尺寸、长、宽和高度分别为 C 、 L 、 W 和 H_1 , 氧化层高度为 H_2 。由于晶体硅对于可见光具有吸收作用, 因此 SOI 超表面只能工作于反射模

式^[17,38], 其纳米结构单元的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{R}^T \mathbf{G} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{G}$ 为光学元件的特征矩阵, $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵。 r_l 和 r_s 分别代表纳米结构单元满足条件 $\theta = 0^\circ$ 时在长、短轴方向的反射系数。若一束圆偏振光入射到该结构, 其出射光的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{R}^T \mathbf{G} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} = \frac{r_l + r_s}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} + \frac{r_l - r_s}{2} \cdot e^{\pm i 2\theta} \begin{bmatrix} 1 \\ \mp i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

显然, 只要超表面的纳米结构单元为各向异性 ($r_l \neq r_s$), 输出光场中总会含有与入射光旋向相反的圆偏振光, 且携带的相位调控量与纳米砖转角存在定量关系: $\varphi = \pm 2\theta$ 。其中, “+” 对应左旋圆偏振 (left-handed circularly polarized, LCP) 入射光, “-” 对应右旋圆偏振 (right-handed circularly polarized, RCP) 入射光, 如图 2(b) 所示。这种相位调控方式又被称为几何相位调控, 可以用 Pancharatnam-Berry phase 概念解释^[43-45]。不同于通过改变纳米砖几何尺寸来改变相位延迟量的方式^[46-47], 几何相位仅通过改变纳米砖转角来实现相位调控。然而, 在超表面的设计过程中,

仍然需要对纳米砖的几何尺寸进行优化设计, 以保持较高的偏振转化效率 ($|r_l - r_s|^2/4$), 从而提高超表面的工作效率。

纳米砖转角除了可以被用来进行几何相位调控外, 还能通过偏振控制用于实现光波强度调控^[16-17]。在普通光学起偏器和检偏器组成的偏振控制光路下, 可在出射光波强度与纳米砖转角 θ 之间建立映射关系:

$$I_{\text{out}} = I_0 \cdot \left[\begin{array}{cc} \cos^2 \alpha_2 & \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 & \sin^2 \alpha_2 \end{array} \right] \cdot \mathbf{R}^T \mathbf{G} \mathbf{R} \cdot \left[\begin{array}{c} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{array} \right]^T$$

$$= I_0 \cdot \left[\frac{r_1 - r_s}{2} \cdot \cos(2\theta - \alpha_2 - \alpha_1) + \frac{r_1 + r_s}{2} \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \right]^2, \quad (3)$$

其中: α_1 和 α_2 分别为起偏器和检偏器的透光轴与 x 轴方向的夹角, I_0 为入射光经过起偏器后的光强。入射光在依次经过起偏器、纳米结构单元和检偏器之后, 出射光强度可被调制为 I_{out} 。

为了同时实现对相位的四台阶调控和对强度的连续调控, 简化设计过程, 考虑使起偏器和检偏器的透光轴方向相互垂直。本方案中, 设计 α_1 和 α_2 分别为 $-\pi/4$ 和 $\pi/4$, 则 I_{out} 可表示为

$$I_{\text{out}} = I_0 \cdot \left[\frac{r_1 - r_s}{2} \right]^2 \cdot \cos^2(2\theta). \quad (4)$$

I_{out} 随 θ 的变化规律如图 2(c) 所示。可以看出, 纳米结构在设计偏振控制下能够被用于实现连续光强调控, 且 θ 从 0 增加到 π 时 I_{out} 经历了两个变化周期, 这意味着 I_{out} 与 θ 之间存在着“一对四”的映射关系, 即同样的 I_{out} 可采用四种 θ 值设计纳米结构。例如, 当 θ 分别取值为 θ_0 、 $\pi/2 - \theta_0$ 、 $\pi/2 + \theta_0$ 和 $\pi - \theta_0$ 时, 其出射光强度均为 $I_{\text{out}} = I_0 \cdot |A - B|^2/4 \cdot \cos^2(2\theta_0)$, 而对应

的几何相位调控量 φ 分别为 $2\theta_0$ 、 $\pi - 2\theta_0$ 、 $\pi + 2\theta_0$ 和 $2\pi - 2\theta_0$ ($0 < \theta_0 < \pi/4$)。因此, 通过建立纳米砖的转角优选机制, 可以在保证连续光强调控的基础上增加四台阶的相位调控, 同时实现近远场复用。

2.2 空间频率复用原理

空间频率复用是指将两个或多个图像的不同空间频率段融合成为一个图像, 并在不同距离处观察到不同的空间频率成分^[48]。图 3(a) 展示了人眼观测正弦波图像的数学模型, 一幅图像的真实空间频率为 $(n_x/d_x, n_y/d_y)$, 对应人眼观测到的空间频率为 $(n_x/\theta_x, n_y/\theta_y)$ 。其中, n_x 和 n_y 分别代表图像水平和竖直方向上的正弦波周期个数, d_x 和 d_y 分别代表图像的宽度和高度, θ_x 和 θ_y 分别代表图像在水平、竖直方向的对向视角。因此, 只需确定 θ_x 和 θ_y 即可获得人眼观测到的空间频率。由图 3(a) 中几何关系不难得出:

$$\theta_x = \arccos \left(\frac{r_0^2 - d_x^2/4}{\sqrt{(r_0^2 + d_x^2/4)^2 - (r_0 \cos \gamma_1 d_x)^2}} \right), \quad (5)$$

$$\theta_y = \arccos \left(\frac{r_0^2 - d_y^2/4}{\sqrt{(r_0^2 + d_y^2/4)^2 - (r_0 \cos \gamma_2 d_y)^2}} \right), \quad (6)$$

其中: r_0 、 γ_1 和 γ_2 分别为眼睛相对图像中心点的距离、水平方向夹角及竖直方向夹角。显然, 当人眼与图像中心距离 r_0 增大时, 观测视角 θ_x 和 θ_y 将减小, 人眼观测到的空间频率会增大。

要深入分析人眼在不同距离接收到的图像空间频率成分, 还应该引入对比敏感函数 (contrast sensitivity function, CSF) 来解释^[49]。CSF 函数可以用来衡量人类视觉系统对不同视觉刺激的敏感性, 它反映了人眼

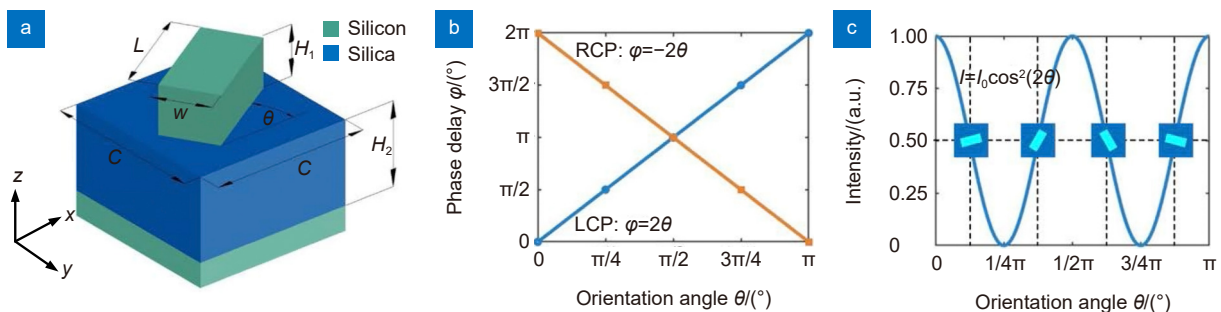


图 2 超表面单元结构及调控原理。(a) 纳米结构单元示意图; (b) 几何相位延迟量与纳米砖转角的关系;

(c) 出射光强度与纳米砖转角的关系

Fig. 2 Unit-cell structure and optical manipulation principle of the multifunctional metasurface. (a) Illustration of the nanostructure unit-cell;

(b) The relationship between geometric phase delay and the orientation angle of the nanobrick;

(c) The relationship between the output intensity and the orientation angle of the nanobrick

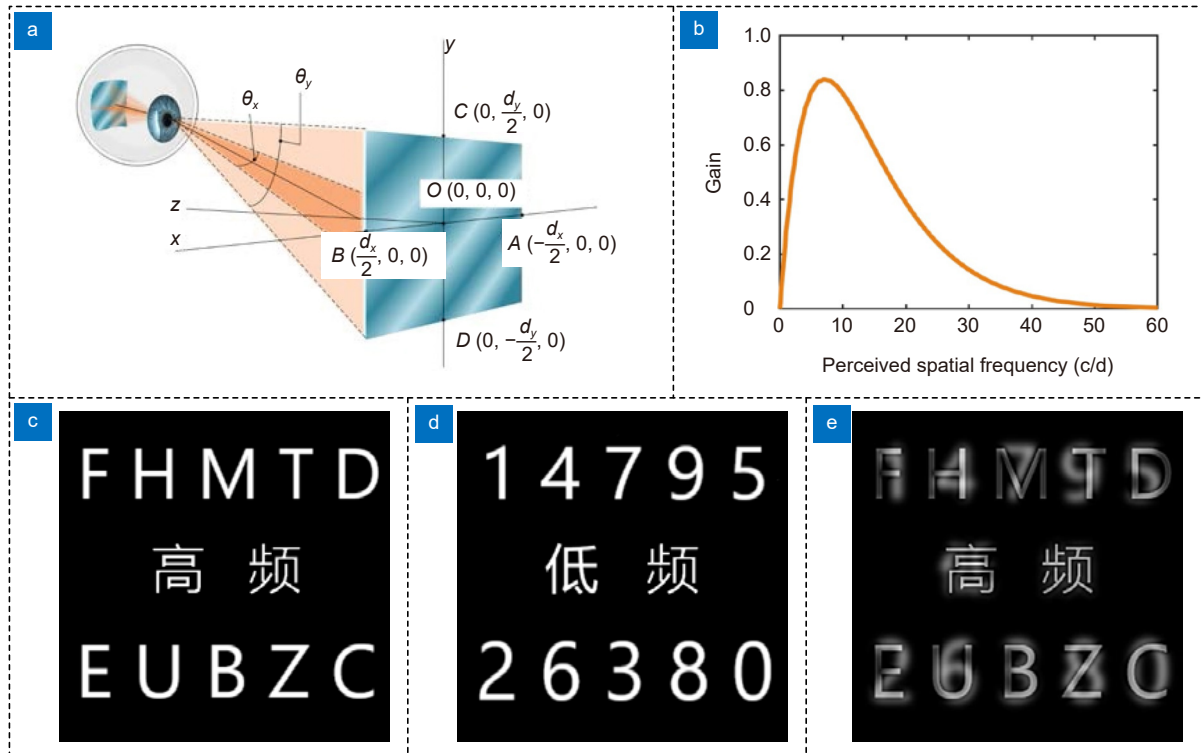


图3 人眼观测模型与空间频率复用示例。(a) 人眼对正弦波图像的观测示意; (b) 对比敏感函数; (c) 图像 P_1 ; (d) 图像 P_2 ; (e) 取图像 P_1 的高频部分与图像 P_2 的低频部分并进行合成得到混合图像 P_1

Fig. 3 Observation characteristics of the human eye and an example of spatial frequency multiplexing. (a) Illustration of the human eye's observation of a sine wave image; (b) Contrast sensitive functions; (c) Image P_1 ; (d) Image P_2 ; (e) Merged image P_1 generated by combining the high-frequency part of P_1 and the low-frequency part of P_2

对不同空间频率目标亮度的辨别力区别, 其指数形式表达式为

$$CSF = \left[c + \left(\frac{f_r}{f_0} \right)^{k_1} \right] \exp \left[- \left(\frac{f_r}{f_0} \right)^{k_2} \right], \quad (7)$$

其中: c 、 k_1 和 k_2 均为经验参数, f_0 是曲线峰值频率, f_r 是空间频率。CSF 函数呈先增后减的变化趋势, 大致分布如图 3(b) 所示。可以看出, 人眼对 8 周/度 (c/d) 空间频率的敏感度处于峰值, 且高敏感区域集中在 3~20 c/d 空间频率范围内。因此, 在设计将不同图像 P_1 (图 3(c))、 P_2 (图 3(d)) 的高低频信息融合产生融合图像 P_1 (图 3(e)) 时, 需要考虑图像的空间频率分布。例如, 在距离融合图像 P_1 较近时, 人眼接收到的空间频率整体变小, 融合图像的高频部分落入人眼敏感频率区域内, 此时能够看到图像 P_1 的信息; 在距离图像 P_1 较远时, 人眼接收到的空间频率整体变大, 此时融合图像的低频部分落入人眼敏感频率区域内, 能够看到图像 P_2 的信息。基于这一特性, 可以考虑以图像的高、低频率部分分别作为明文与密文, 发展其在光学信息加密方面的应用。

3 多功能超表面设计

基于提到的近远场复用及空间频率复用原理, 可设计出同时记录三幅图像信息的多功能超表面, 设计流程如图 4(a) 所示。其中, 一幅大小为 500 pixels×500 pixels 的近场图像 (near-field image) 作为强度调控下的目标图像, 图像 P_1 的高频成分 (high-frequency image) 和图像 P_2 的低频成分 (low-frequency image) 用于设计相位调控型全息图像。设计超表面时, 首先需要根据近场目标图像的强度分布, 结合公式 (4), 计算出超表面纳米砖阵列的初始转角分布, 此时纳米砖初始转角取值满足 $0 < \theta_0 < \pi/4$ 。本工作选取了 8 c/i (cycle/image) 和 20 c/i 分别作为低通滤波器和高通滤波器的空间截止频率, 将图像 P_1 的高频成分与图像 P_2 的低频成分叠加, 计算出融合图像 (hybrid image) P_1 作为远场全息的目标图像。最后, 为了在同一超表面上同时编码近场灰度纳米印刷图像和远场全息图像, 需要采用模拟退火算法对超表面纳米砖阵列的转角分布进行优化^[36,50], 从 $(0, \pi/4)$ 、 $(\pi/4, \pi/2)$ 、 $(\pi/2, 3\pi/4)$ 和 $(3\pi/4, \pi)$ 四个区间中优选出能同时实

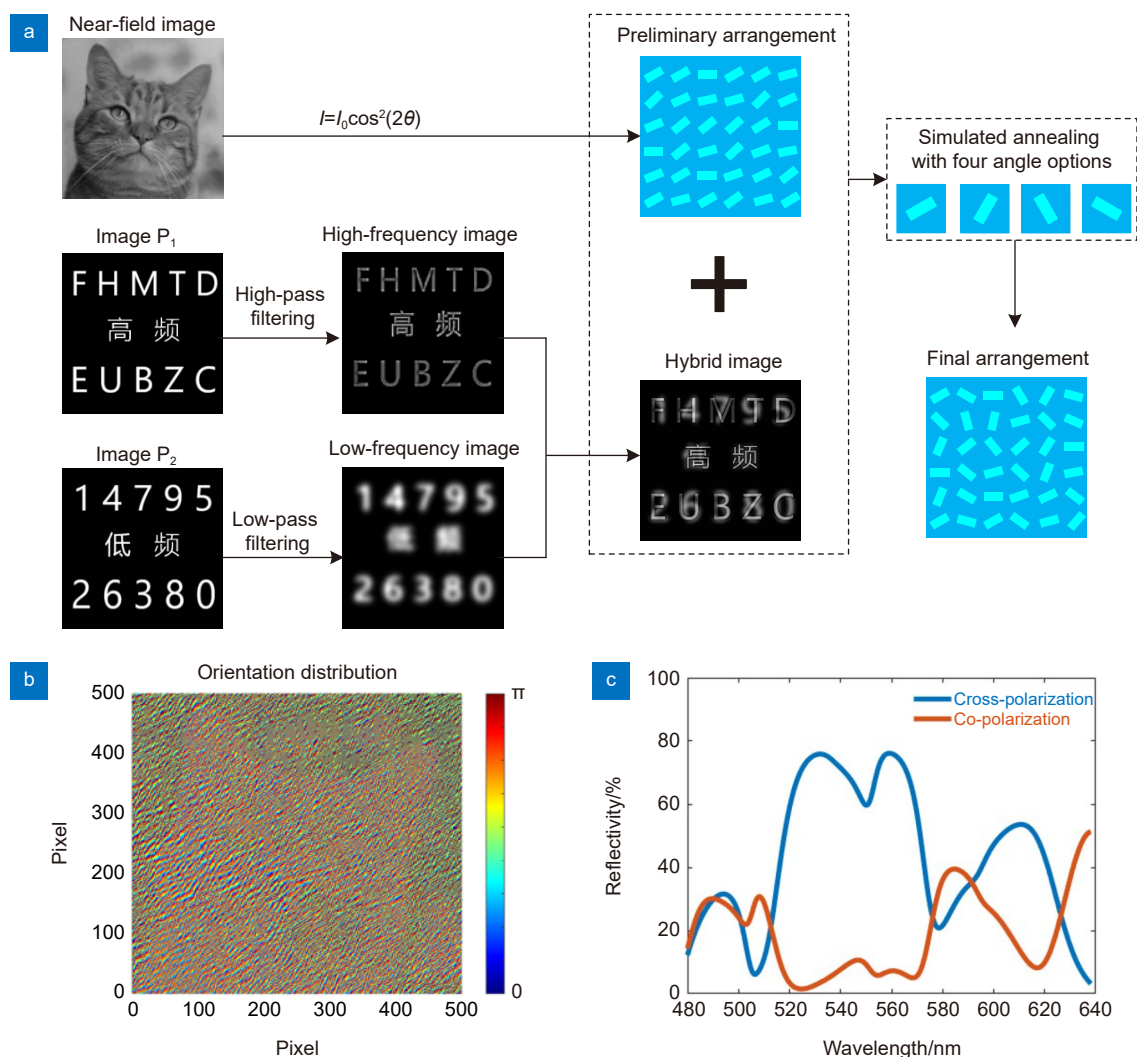


图 4 多功能超表面设计流程与优化结果。(a) 多功能超表面设计流程; (b) 多功能超表面纳米砖阵列转角分布优化结果; (c) 多功能超表面纳米结构单元的反射率分布; (d-g) 不同波长下相位延迟总量与纳米砖转角的关系

Fig. 4 Design flow chart and optimization results of the multifunctional metasurface. (a) Design flow chart of the multifunctional metasurface; (b) The final optimized orientation distribution of the multifunctional metasurface; (c) Simulated reflectivity of the cross-polarized and co-polarized parts under a normal circularly polarized light incidence; (d-g) The relationship between the total phase delay and the orientation angle of the nanobrick at different wavelengths

现连续光强调控和 4 台阶相位调控的转角取值, 最终优化后的超表面纳米砖阵列的转角分布如图 4(b) 所示。

根据 2.1 节, SOI 超表面工作于可见光时只能采用反射工作模式。基于此, 借助 CST Microwave Studio 仿真软件对单元结构参数进行仿真优化, 设计一种具有宽带响应特性的超表面单元结构。本文所采用 SOI 材料的氧化层厚度 H_2 为 2000 nm, 顶层硅厚度 H_1 为 220 nm。为避免高阶衍射光影响实验效果, 将超表面纳米结构单元的周期尺寸 C 定义为 300 nm。

在此基础上, 对纳米砖的长 L 和宽 W 进行扫描, 优化出具有较高偏振转换效率的单元结构。最终, 优化好的纳米砖长度 L 为 140 nm, 宽度 W 为 95 nm, 偏振转化效率如图 4(c) 所示, 在 520 ~ 570 nm 和 590 ~ 610 nm 范围内均具有较好的工作响应。所设计的单元结构具备良好的鲁棒性, 当纳米砖转角变化时, 出射光的相位延迟总量与纳米砖转角依然基本符合 2 倍的变换关系。因此, 可采用优化的纳米结构单元几何参数及纳米砖阵列转角分布数据, 通过 MATLAB 工具产生纳米砖阵列的图案进行超表面的设计。

4 实验验证与结果分析

4.1 超表面加工

超表面样片的加工工艺流程如图 5 所示。第一步, 将 SOI 材料依次浸入丙酮、乙醇和去离子水中, 利用超声波进行清洗, 清洗完毕后使用热板将其干燥, 并均匀涂抹一层 PMMA 材料作为电子束抗蚀剂。第二步, 采用标准电子束光刻 (electron-beam lithography, EBL) 在 PMMA 层上产生纳米砖阵列的掩膜图案。第三步, 分别将样片浸泡在 MIBK、IPA 为 3:1 的稀释溶液和 IPA 溶液中, 进行显影、定影操作, 去除 PMMA 材料中与纳米砖阵列掩膜图案重合的部分。第四步, 在样品上沉积 30 nm 厚的铬薄膜, 此时 PMMA 层和 SOI 材料表面均产生有一层铬膜。第五步, 将样品浸泡在 75 °C 的热丙酮溶液中并使用超声波对该样片进行清洗, 去除样品上覆盖的 PMMA 材料, 同时保留纳米砖阵列掩膜图案所在部分的铬薄膜。第六步, 使用反应离子蚀刻 (reactive ion etching, RIE) 技术对顶层晶体硅材料进行蚀刻, 所需的纳米砖阵列结构由于铬薄膜的保护作用被成功保留。最后,

使用铬蚀刻液去除剩余部分的铬膜, 完成超表面样片加工。利用上述工艺, 本文加工了一片像素数为 500×500 、大小为 $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ 的超表面样片, 其局部电镜图如图 5(b) 所示。

4.2 近、远场实验装置

多功能超表面分别在近、远场显示纳米印刷图像和全息图像, 其实验观测装置和光路如图 6 所示。近场的灰度纳米印刷图像利用光学显微镜 (Motic BA310MET-T) 进行观测, 并采用宽带 LED 为照明光源, 如图 6(a) 所示。纳米印刷图像理论上可在样品表面被观测到, 然而, 由于加工的样品尺寸仅 $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$, 难以被肉眼直接观察, 故采用了光学显微镜进行放大成像, 延长了其观测距离。该实验中, 入射光经过起偏器后变为偏振方向可调的线偏振光, 经反射镜反射并照射到超表面样片上, 受纳米砖阵列调控后直接反射, 经过检偏器后产生目标光强分布场, 最终被 CMOS 相机探测。远场的全息成像实验光路如图 6(b) 所示, 主要由激光器、起偏器、四分之一波片 (quarter-wave plate, QWP)、超表面样片和光屏构成, 其中光屏大小约为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 与样

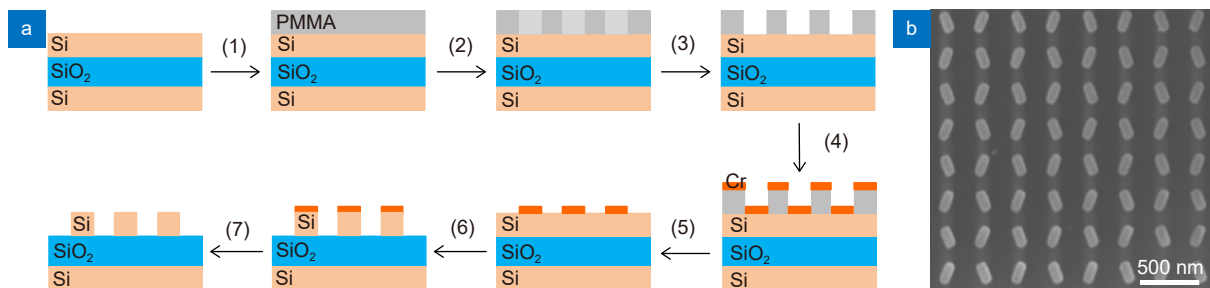


图 5 SOI 超表面样片加工工艺流程及样片局部电镜图。(a) SOI 超表面样片加工工艺流程; (b) 样片局部电镜图

Fig. 5 SOI metasurface sample fabrication process and localized SEM image of the sample. (a) SOI metasurface sample fabrication process; (b) Partial scanning electron microscope image of the sample

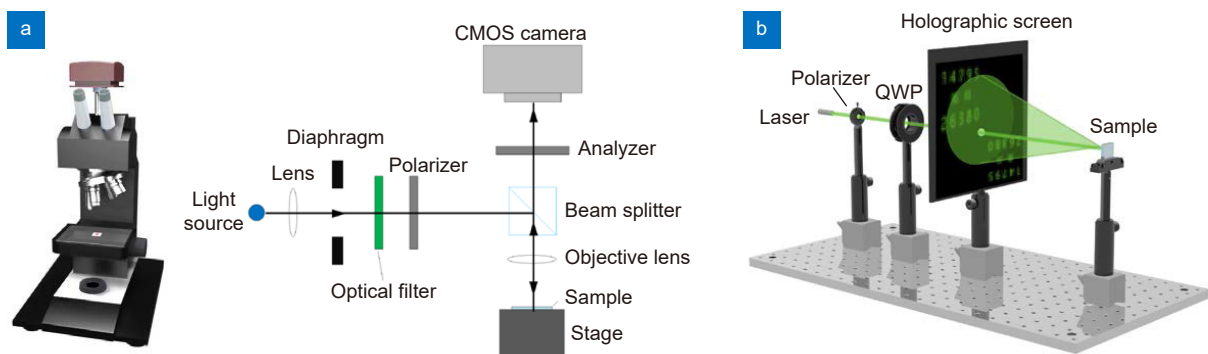


图 6 多功能超表面的近、远场实验装置。(a) 近场观测灰度纳米印刷图像的显微镜装置; (b) 远场全息实验光路

Fig. 6 Experimental setups of the multifunctional metasurface. (a) General sketch and detailed illustration of the microscope to observe the grayscale nanoprining image in the near-field; (b) The experimental setup to observe the holographic image in the far-field

片间距约 20 cm。该实验中, 通过调整起偏器和四分之一波片的透光轴方向, 将激光偏振态调制为左旋圆偏振光, 该激光束照射到超表面样片后, 将受到相位调控并在反射空间内衍射, 最终在光屏上形成全息图像。

4.3 实验结果及分析

近场的纳米印刷图像观测实验中, 起偏器、检偏器的透光轴角度分别设置为 $-\pi/4$ 和 $\pi/4$, 实验结果如图 7 所示, 图中白色标尺实际长度为 50 μm 。在未插入滤光片时观察到的实验图像如图 7(a) 所示, 可以清晰地分辨出“猫”的轮廓和眼睛、鼻子、嘴巴等细节。为进一步观察其不同波长下的响应, 在显微系统中分别置入了中心波长为 570 nm、580 nm、610 nm 和 633 nm 的滤波片, 实验结果如图 7(b-e) 所示。4 个波长下均能分辨出“猫”的轮廓, 但分辨率和成像质量有所下降, 这主要是由于置入滤波片后入射光能量急剧下降导致了成像质量变差, 其次, 加工误差也将影响超表面样片在不同波长下的实际工作效率。尽管加工会导致某个特定波长下工作效率的降低, 但由于本文提出的设计方案中光波强度调控仅与纳米砖转角 θ 有关, 故超表面样片在宽带光源下依然能够保持良好的工作效果。

基于空间频率复用的远场全息图像计算及实验结果如图 8 所示。图 8(a, f, k) 为全息图像的优化目标, 图 8(b-e) 为使用商用数码相机 (Nikon D5100) 拍摄的 570 nm、590 nm、600 nm 和 610 nm 波长下的远场全

息图像, 图 8(g-o) 为四个工作波长下分别利用高、低通滤波处理全息图像后得到的结果。由于拍摄角度限制, 实验图像轻微变形, 但仍能够与目标图像相匹配。提取后的高、低频图像中的英文字母及数字可以被辨认出来, 文字“高频”效果明显, 文字“低频”通过增加观察距离也可以被直接观测到。通过在实际实验中调整光屏与超表面样片之间的距离, 也可以直接肉眼观察到高、低频图像, 其与采用高、低通算法进行滤波的结果相比效果基本一致。

5 结 论

本文设计并实验验证了一种融合空频复用和近远场复用的多功能超表面。通过引入转角简并性, 将连续强度调控与几何相位调控相结合, 在超表面的近、远场分别实现了灰度纳米印刷和相位调控型全息的功能复用。利用人眼对图像空间频率信息的敏感响应, 成功将不同图像的高、低频信息融合成一幅全息图像并通过高、低通滤波器模拟不同观察距离的人眼响应特性实现了高、低频图像信息的解码。空频复用和近远场复用的有机融合极大拓展了超表面的设计自由度, 使得一片超表面在单胞元纳米结构的设计策略下能够同时记录三幅图像 (灰度图像、高频图像和低频图像), 为超表面的多功能集成和多路信息复用提供了一种新的思路。这种超表面同时具备高信息容量和多功能集成的优势, 在光学信息加密、高密度信息储存和高端产品防伪等领域具有较大的应用前景。

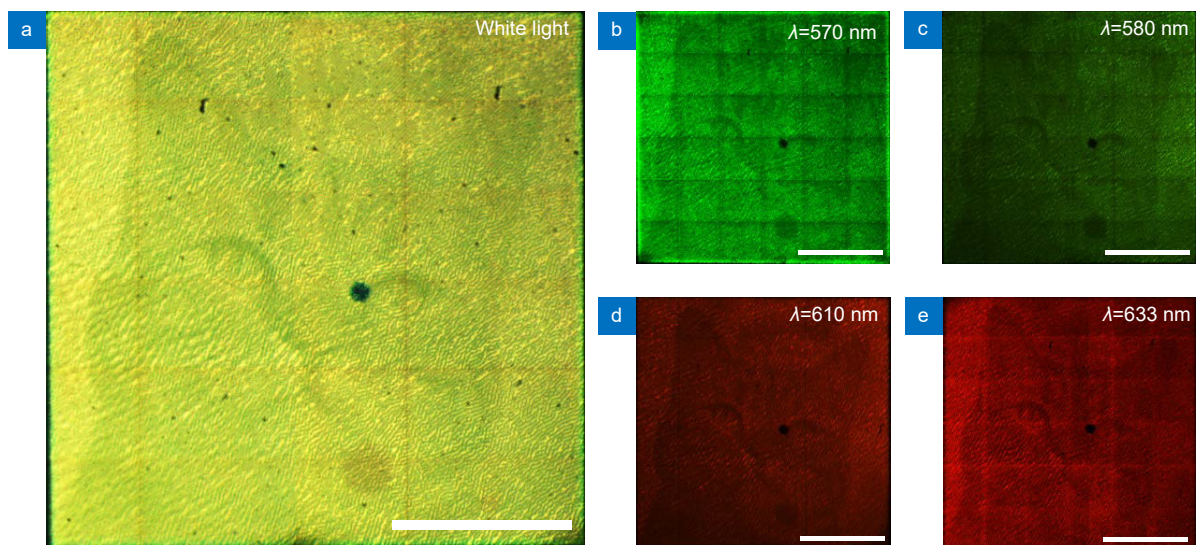


图 7 近场纳米印刷图像的实验结果。(a) 白光照射下的实验图像; (b-e) 不同波长下的实验图像

Fig. 7 Experimentally captured nanoprinting images in the near-field. (a) Experimental nanoprinting image under white light illumination; (b-e) Experimental nanoprinting images at different wavelengths

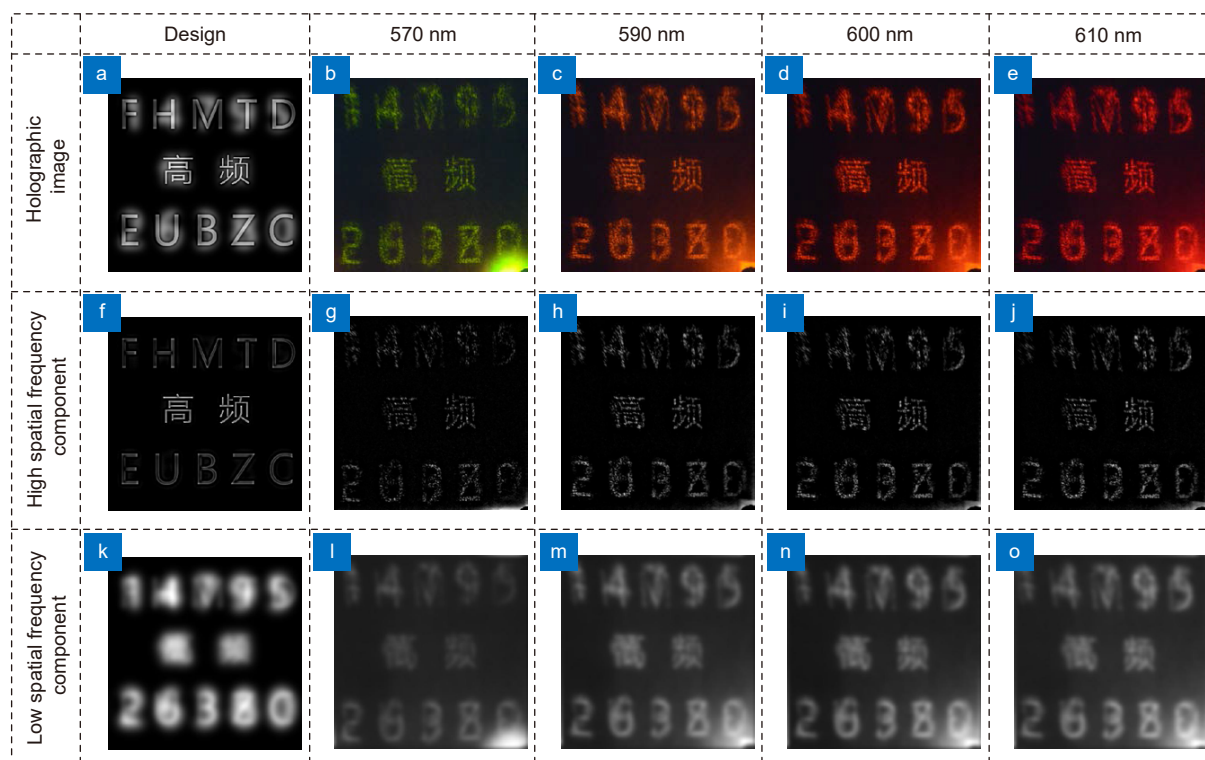


图 8 远场全息图像设计与实验结果。(a) 全息目标图像; (b-e) 不同波长下的全息图像实验结果; (f) 全息目标图像中提取的高频信息部分; (g-j) 不同波长下的全息图像实验结果中提取的高频信息部分; (k) 全息目标图像中提取的低频信息部分; (l-o) 不同波长下的全息图像实验结果中提取的低频信息部分

Fig. 8 Design and experimental results of holographic images in the far-field. (a) Designed holographic image; (b-e) Experimentally captured holographic images at different wavelengths; (f) High spatial frequency components of the designed image; (g-j) High spatial frequency components of experimentally captured holographic images at different wavelengths; (k) Low spatial frequency component of the designed image; (l-o) Low spatial frequency components of experimentally captured holographic images at different wavelengths

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] 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.
- [2] Zhang Y Z, Lin P C, Huo P C, et al. Dielectric metasurface for synchronously spiral phase contrast and bright-field imaging[J]. *Nano Lett*, 2023, **23**(7): 2991–2997.
- [3] Gao H, Wang Y X, Fan X H, et al. Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(28): eaba8595.
- [4] Shi T, Deng Z L, Geng G Z, et al. Planar chiral metasurfaces with maximal and tunable chiroptical response driven by bound states in the continuum[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 4111.
- [5] Wang D Y, Liu F F, Liu T, et al. Efficient generation of complex vectorial optical fields with metasurfaces[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 67.
- [6] Yu B B, Wen J, Chen L, et al. Polarization-independent highly efficient generation of Airy optical beams with dielectric metasurfaces[J]. *Photonics Res*, 2020, **8**(7): 1148–1154.
- [7] Xu Z T, Huang L L, Li X W, et al. Quantitatively correlated amplitude holography based on photon sieves[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(2): 1901169.
- [8] Huang K, Deng J, Leong H S, et al. Ultraviolet metasurfaces of $\approx 80\%$ efficiency with antiferromagnetic resonances for optical vectorial anti-counterfeiting[J]. *Laser Photonics Rev*, 2019, **13**(5): 1800289.
- [9] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(4): 308–312.
- [10] Fu R, Chen K X, Li Z L, et al. Metasurface-based nanoprinting: principle, design and advances[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(10): 220011.
- [11] Wang L, Kruk S, Tang H Z, et al. Grayscale transparent metasurface holograms[J]. *Optica*, 2016, **3**(12): 1504–1505.
- [12] Li Z L, Kim I, Zhang L, et al. Dielectric meta-holograms enabled with dual magnetic resonances in visible light[J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(9): 9382–9389.
- [13] Tan S J, Zhang L, Zhu D, et al. Plasmonic color palettes for photorealistic printing with aluminum nanostructures[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(7): 4023–4029.
- [14] Sun S, Zhou Z X, Zhang C, et al. All-dielectric full-color printing with TiO_2 metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(5): 4445–4452.
- [15] Gao B F, Ren M X, Wu W, et al. Lithium niobate metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2019, **13**(5): 1800312.

- [16] Yue F Y, Zhang C M, Zang X F, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam[J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 17129.
- [17] Dai Q, Deng L G, Deng J, et al. Ultracompact, high-resolution and continuous grayscale image display based on resonant dielectric metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2019, 27(20): 27927–27935.
- [18] Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220183.
许可, 王星儿, 范旭浩, 等. 超表面全息术: 从概念到实现[J]. *光电工程*, 2022, 49(10): 220183.
- [19] 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(3): 220–226.
- [20] 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]. *Nat Commun*, 2015, 6: 7069.
- [21] Pahlevaninezhad H, Khorasaninejad M, Huang Y W, et al. Nano-optic endoscope for high-resolution optical coherence tomography in vivo[J]. *Nat Photonics*, 2018, 12(9): 540–547.
- [22] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 85.
- [23] 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.
- [24] Zhu Y C, Chen X L, Yuan W Z, et al. A waveguide metasurface based quasi-far-field transverse-electric superlens[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(10): 210013.
- [25] Zheng G X, Liu G G, Kenney M G, et al. Ultracompact high-efficiency polarising beam splitter based on silicon nanobrick arrays[J]. *Opt Express*, 2016, 24(6): 6749–6757.
- [26] Li Z L, Zheng G X, He P A, et al. All-silicon nanorod-based Dammann gratings[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(18): 4285–4288.
- [27] Wan C W, Yang R, Shi Y Y, et al. Visible-frequency meta-gratings for light steering, beam splitting and absorption tunable functionality[J]. *Opt Express*, 2019, 27(26): 37318–37326.
- [28] Shen Z C, Zhao F, Jin C Q, et al. Monocular metasurface camera for passive single-shot 4D imaging[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 1035.
- [29] 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]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(11): 937–943.
- [30] Yue F Y, Wen D D, Xin J T, et al. Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1558–1563.
- [31] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105–1109.
- [32] Yesilkoy F, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. *Nat Photonics*, 2019, 13(6): 390–396.
- [33] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Coherent pixel design of metasurfaces for multidimensional optical control of multiple printing-image switching and encoding[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 28(51): 1805306.
- [34] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 118(11): 113901.
- [35] Guo J Y, Wang T, Quan B G, et al. Polarization multiplexing for double images display[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, 2(7): 180029.
- [36] Deng L G, Deng J, Guan Z Q, et al. Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing[J]. *Light Sci Appl*, 2020, 9: 101.
- [37] Li J X, Chen Y Q, Hu Y Q, et al. Magnesium-based metasurfaces for dual-function switching between dynamic holography and dynamic color display[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7): 7892–7898.
- [38] Deng J, Deng L G, Guan Z Q, et al. Multiplexed anticounterfeiting meta-image displays with single-sized nanostructures[J]. *Nano Lett*, 2020, 20(3): 1830–1838.
- [39] Wen D D, Cadusch J J, Meng J J, et al. Multifunctional dielectric metasurfaces consisting of color holograms encoded into color printed images[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(3): 1906415.
- [40] Deng J, Yang Y, Tao J, et al. Spatial frequency multiplexed meta-holography and meta-nanoprinting[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(8): 9237–9246.
- [41] Zhang F, Pu M B, Gao P, et al. Simultaneous full-color printing and holography enabled by centimeter-scale plasmonic metasurfaces[J]. *Adv Sci*, 2020, 7(10): 1903156.
- [42] Yang R, Yu Q Q, Pan Y W, et al. Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220177.
杨睿, 于千茜, 潘一苇, 等. 基于片上超表面的多路方向复用全息术[J]. *光电工程*, 2022, 49(10): 220177.
- [43] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proc Roy Soc A Math Phys Eng Sci*, 1984, 392(1802): 45–57.
- [44] Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications[J]. *Proc Indian Acad Sci Sec A*, 1956, 44(5): 247–262.
- [45] Xie X, Pu M B, Jin J J, et al. Generalized pancharatnam-berry phase in rotationally symmetric meta-atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, 126(18): 183902.
- [46] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths[J]. *Nano Lett*, 2016, 16(11): 7229–7234.
- [47] Chong K E, Staude I, James A, et al. Polarization-independent silicon metadevices for efficient optical wavefront control[J]. *Nano Lett*, 2015, 15(8): 5369–5374.
- [48] Papadopoulos A, Nguyen T, Durmus E, et al. IllusionPIN: shoulder-surfing resistant authentication using hybrid images[J]. *IEEE Trans Inf Forensics Secur*, 2017, 12(12): 2875–2889.
- [49] Mannos J, Sakrison D. The effects of a visual fidelity criterion of the encoding of images[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 1974, 20(4): 525–536.
- [50] Dai Q, Guan Z Q, Chang S, et al. A single-celled tri-functional metasurface enabled with triple manipulations of light[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(50): 2003990.

作者简介



周宇翀 (2001-), 男, 本科, 武汉大学光电信息科学与工程专业, 主要从事超(构)表面及其新颖微纳光学器件研究。

E-mail: yuchong@whu.edu.cn



【通信作者】戴琦 (1994-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事超(构)表面及其新颖微纳光学器件研究, 曾获王大珩光学奖-高校学生奖、湖北省博士后创新研究岗资助和中国博士后站前特别资助。

E-mail: daiqiu@whu.edu.cn



【通信作者】郑国兴 (1977-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超(构)表面及其新颖微纳光学器件研究, 入选斯坦福全球前 2% 顶尖科学家和湖北省百名专利发明领军人才, 多次获得“爱思唯尔中国高被引学者”称号。

E-mail: gxzheng@whu.edu.cn

团队介绍

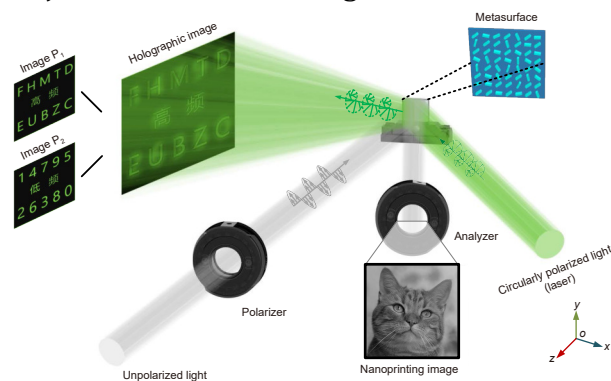
武汉大学电子信息学院微纳光学科研团队长期致力于超材料/超表面、二元光学、拓扑光子学、光场精密调控等前沿科学和技术研究, 现有固定教职教授 3 名, 特聘研究员 2 人, 在读研究生 30 余人。团队近五年承担了光学超表面相关国家自然科学基金项目 11 项, 科技部重点研发计划国合和青年科学家项目各 1 项, 其他省部级项目 10 余项。团队发表期刊论文 160 余篇, 其中影响因子超 10 的顶刊 40 余篇, 最高单引 2300 余次; 团队 1 名学者连续入选爱思唯尔中国高被引学者, 2 名学者进入斯坦福全球前 2% 顶尖科学家榜单。团队获超表面相关的授权发明专利 130 余项, 技术转让 6 项。团队近五年培养了博士后 3 人(已出站), 毕业博士生 7 人, 其中 3 人获中国光学学会王大珩光学奖, 2 人获全国光学优秀博士学位论文提名优秀奖。团队掌握了光学超表面、二元光学等微纳光学技术的设计、仿真、加工、表征和测试等全套流程, 积攒了丰富的经验, 可承接微纳及传统光学设计、超表面器件及其系统级应用等科研任务。



扫描二维码, 获取PDF全文

Multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing

Zhou Yuchong¹, Ding Weijun¹, Li Zile^{1,2}, Liu Hongchao³, Fu Rao¹, Dai Qi^{1,2*}, Zheng Guoxing^{1,2*}



Schematic diagram of the multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing

Overview: Metasurface, which is capable of flexibly controlling the polarization, amplitude, frequency, and phase of light waves, provides substantial possibilities for the development of high-performance, high-efficiency, and high-integrated optical systems. The precise control of optical properties is achieved mainly by adjusting shapes, geometric parameters, rotation states, multi-atom combination strategies, incident angles, or material refractive indexes of metasurfaces. This feature of multiple design degrees of freedom means that metasurfaces can be utilized for synchronously controlling multiple optical properties, and the information capacity, as well as functionality, can be greatly improved. For example, multiple nanoprining image switching and encoding can be realized by establishing a coherent pixel design strategy. Near-field nanoprining and far-field holographic image displays are simultaneously accomplished with a single metasurface, which combines amplitude and phase modulations by introducing orientation degeneracy.

In this paper, we propose and experimentally verify a multifunctional metasurface enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing. In near- and far-field multiplexing, the geometric phase modulation and the light intensity modulation are combined by introducing the orientation degeneracy of nanostructures. A “one-to-four” strategy is established to generate four different phase delays while keeping identical light intensity, then near-field nanoprining and far-field holographic image displays are both successfully achieved with a single-sized metasurface. As is known, people receive different spatial frequency components of an image when the observation distance changes. Based on this principle, we chose the high-frequency components of an image (P_1) and the low-frequency component of another image (P_2) as the high-frequency and low-frequency images, and designed their hybrid image to be the target holographic image for spatial frequency multiplexing. In our work, SOI material is used to design and fabricate the multifunctional metasurface, and experimental results verify that three images (a grayscale image, a high-frequency image, and a low-frequency image) can be easily observed at different distances. Specifically, a polarizer and an analyzer are employed to realize specific polarization control for the near-field grayscale image decoding. On the other hand, the circularly polarized laser light is used to reconstruct the holographic image in the far-field, and then another two images can be decoded by high- and low-pass filtering. This work provides a new path for multifunctional metasurface design, and possesses broad applications in optical encryption, optical anti-counterfeiting, and many other related fields.

Zhou Y C, Ding W J, Li Z L, et al. Multifunctional metasurface image display enabled by merging spatial frequency multiplexing and near- and far-field multiplexing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230153; DOI: 10.12086/oee.2023.230153

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFE0205800), National Natural Science Foundation of China (12204359, 62205252), Natural Science Foundation of Hubei Province (2022CFB641), and China Postdoctoral Science Foundation (2022M722448, 2022TQ0243)

¹Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; ²Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518055, China; ³Institute of Applied Physics and Materials Engineering, University of Macau, Macao SAR 999078, China

* E-mail: daiqiu@whu.edu.cn; gxzheng@whu.edu.cn