

DOI: 10.12086/oe.2022.220177

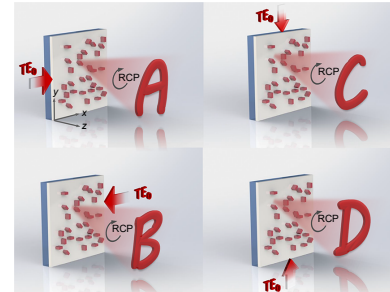
基于片上超表面的多路方向复用全息术

杨睿¹, 于千茜¹, 潘一苇¹, 陈思涵¹, 张宸¹, 叶宏¹,
周鑫尧¹, 时阳阳¹, 万帅¹, 刘阳¹, 李仲阳^{1,2,3*}

¹武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;

²武汉量子技术研究院, 湖北 武汉 430206;

³武汉大学苏州研究院, 江苏 苏州 215123



摘要: 片上超表面是将超表面引入到集成光波导上以实现任意调制, 它为导波与自由空间光波之间的转换提供了一个方便且通用的平台。尽管之前在片上全息方面已经做出了一些探索, 但在扩展编码自由度和多路复用方面仍需突破。本文提出并实验验证了一种基于片上超表面的多路复用全息显示器件。通过迂回相位和几何相位的融合, 使片上超表面将导波以圆偏光的形式耦合到自由空间中, 以打破此前片上超表面沿传播方向上相位简并的局限性, 进一步扩展了编码自由度。同时使用模拟退火相位优化算法和多路复用技术, 实现了可独立编码的四通道远场全息显示复用。本文的设计方法以片上超表面的多功能集成, 为具有高信息存储容量的集成光通信提供了一种新的途径。

关键词: 片上超表面; 导波; 迂回相位; 几何相位; 多路复用; 远场全息

中图分类号: TB34; O43

文献标志码: A

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

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

Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface

Yang Rui¹, Yu Qianqian¹, Pan Yiwei¹, Chen Sihan¹, Zhang Chen¹, Ye Hong¹, Zhou Xinyao¹,
Shi Yangyang¹, Wan Shuai¹, Liu Yang¹, Li Zhongyang^{1,2,3*}

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

²Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan, Hubei 430206, China;

³Suzhou Institute of Wuhan University, Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract: The on-chip metasurface is introduced into integrated optical waveguides to achieve arbitrary modulation of guided waves, which provides a convenient and versatile platform for the conversion between guided waves and free-space functions. Despite previous explorations in on-chip holography demonstration, it still faces critical challenges to expand the encoding freedom and multiplexing. Here, we propose and experimentally demonstrate a quad-fold multiplexed holographic display optics device based on an on-chip metasurface. By mixing the detour

收稿日期: 2022-07-25; 收到修改稿日期: 2022-09-21

基金项目: 湖北省杰出青年科学基金资助项目 (2021CFA043); 武汉市科技局资助项目 (2020010601012196); 千人计划资助项目 (501100010871); 江苏省自然科学基金 (BK20220281); 武汉大学启动项目 (501100007046)

*通信作者: 李仲阳, zhongyangli@whu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

phase and Pancharatnam-Berry (PB) phase, the on-chip metasurface couples the guided waves into free space in circular polarization, destroying the phase degeneracy that exists in the wavevector directions with only the detour phase. Moreover, by utilizing simulated annealing phase optimization algorithm and multiplexing, we achieved a quad-fold multiplexed far-field holographic display with independent encoding capability. The proposed method in this paper opens up a new prospect for multifunctional integration of on-chip metasurfaces and provides an alternative approach for integrated optical communication with high information storage capacity.

Keywords: on-chip metasurface; guided wave; detour phase; Pancharatnam-Berry phase; directional-multiplexing; far-field hologram.

1 引言

光子集成电路 (Photonic integrated circuit, PIC) 为光学信息处理提供了一个极具吸引力且功能强大的平台。它通过将光源、调制器和耦合器等多个光学元件集成到单个光学芯片上, 以指引和操纵波导内的光信号进行快速计算。然而, 基于光波导的传统 PIC 设备通常体积庞大且缺乏在亚波长尺度下对光波的完全控制以实现任意波前整形功能。因此, 非常需要将传统 PIC 光学器件小型化。超表面是一种新型的人造平面光学元件, 它能够在亚波长尺度内实现对光的振幅、相位、偏振等多个自由度的灵活控制^[1-10]。近年来, 将超表面集成在电介质光波导上以联接波导光学和自由空间光学的片上超表面被发明了出来。作为一种新型的片上纳米光子器件, 片上超表面不仅实现了导波耦合到自由空间的多功能转换, 包括导波模式转换^[11]、偏振分束器^[12]、定向发射器/耦合器^[13-15]、片上透镜^[16-18]、轨道角动量发生器^[19]和元全息术^[20-24]等, 还具有无零级、多重级联、无需对齐以及与其他片上微型器件兼容等众多独特优点。

近年来, 国内外学者对由导波驱动的片上超表面进行了初步探索。2019年, Yulaev 等人将入射光转化为导波模式先耦合到电介质中用于模式转换的光栅中, 再经过片上超表面的调制, 实现了高数值孔径聚焦和偏振态转化等功能^[25]。2020年, Guo 等人设计了一种分布在硅波导上的 MIM 谐振式纳米微结构的片上超表面, 用纳米微结构组合操纵迂回相位和传输相位, 实现了近红外波段的光束偏折和聚焦等功能^[26], 这项作为片上超表面控制导波并将其投射到自由空间中奠定了理论基础。2021年, Fang 等人基于铌酸锂波导平台, 利用迂回相位和几何相位的组合对片上纳米微结构进行精心的排布, 实现了片上菲涅尔全息功能和片上涡旋光束^[27]。同年, Shi 等人结合迂回相

位和几何相位实现了片上片外三通道的远场全息显示, 实现了一种彩色 AR 全息显示器^[19]。以上工作都基本局限于单个独立方向的片上功能研究, 并未充分利用片上正负双向方向上复用的自由度。2021年, Ha 等人提出了在硅波导上刻蚀纳米尺度的沟槽结构, 利用菲涅尔衍射的独特优势, 在数值模拟中结合迂回相位, 理论上实现了片上多路复用的菲涅尔全息^[28]。然而, 菲涅尔全息因受其衍射距离限制很难应用于实际显示, 片上远场全息又受限于导波对称传播方向上的相位简并性而无法进行多路复用。

本文设计了一种由二氧化硅 (SiO₂) 衬底, 氮化硅 (Si₃N₄) 波导以及硅 (Si) 纳米柱阵列组成的片上超表面。具有相同亚波长尺寸不同转角的 Si 纳米柱可以将导波以圆偏振的方式耦合到自由空间中, 进而可以利用偏振选择选取所需的全息图像。所设计的相位型片上多路复用超表面远场全息是基于迂回相位^[29]和几何相位^[30-31]复合的原理, 并借助计算全息和模拟退火相位优化算法实现的。当导波分别沿 $\pm x$, $\pm y$ 方向传播时, 在远场显示四幅完全不同的全息图像 ($+x$ - “A”, $-x$ - “B”, $+y$ - “C”, $-y$ - “D”) 如图 1 所示。我们所提出的片上多路复用远场全息可应用于 AR 显示、3D 视觉、光信息存储和多功能光子集成器件中。

2 片上超表面四通道全息的工作原理及设计

2.1 片上超表面单元结构设计及工作原理

如图 2(a) 所示, 片上超表面的单元结构由矩形 Si 纳米柱、Si₃N₄ 波导和 SiO₂ 衬底组成, Si 纳米柱位于 Si₃N₄ 波导顶部。Si 纳米柱的长度 $l = 140$ nm, 宽度 $w = 70$ nm, 高度 $h = 380$ nm, 沿 x/y 方向上的周期都为 $\Lambda = 360$ nm。与传统空间中超表面和空间入射光

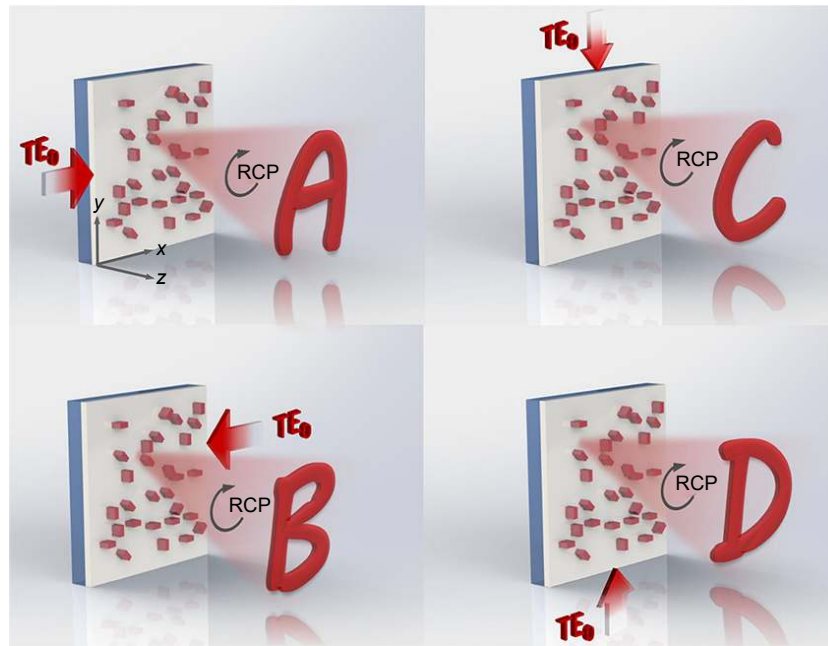


图 1 片上四通道复用全息原理示意图。当光源分别沿 $\pm x, \pm y$ 方向边缘入射时, 集成在波导上的片上超表面分别在远场显示四幅不同的全息图像 (“A/B/C/D”)

Fig. 1 Schematic diagram of the on-chip four-channel multiplexed holography. Four diverse holographic images (“A/B/C/D”) in the far-field could be displayed by the on-chip metasurface integrated on the waveguide, when the laser source is end-fire coupled into the waveguide along the $\pm x$ and $\pm y$ directions, respectively

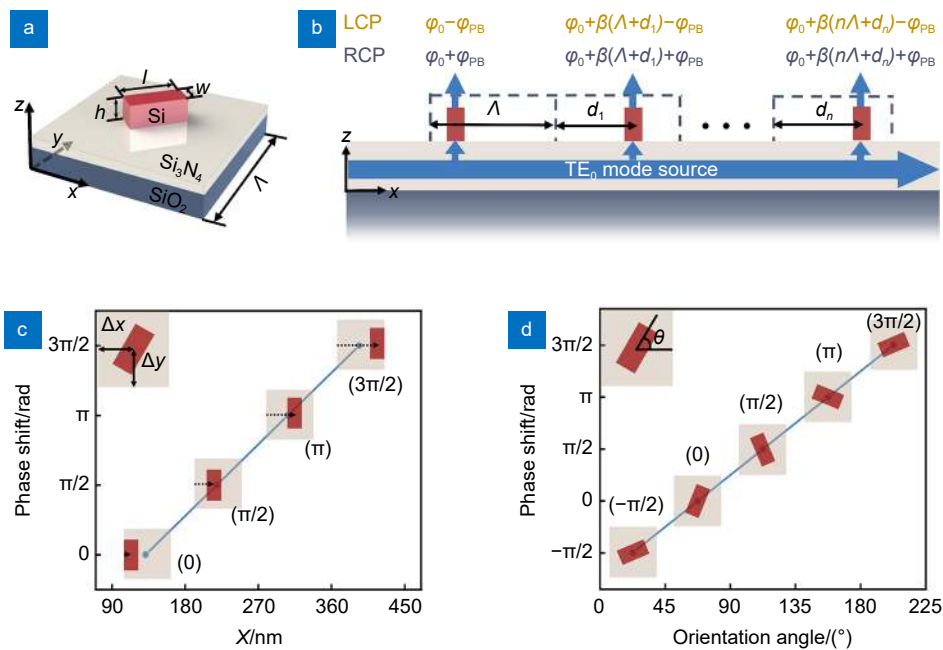


图 2 用于控制和提取导波的片上超表面工作机理。(a) 构成片上超表面的单元结构示意图; (b) 通过结合迂回相位和几何相位来提取导波的原理; (c) 离散迂回相位与单元内 Si 纳米柱位置对应关系; (d) 离散几何相位调控量与 Si 纳米柱方向角的关系

Fig. 2 On-chip metasurface mechanism for controlling the phase of extracted guided waves. (a) Schematic of the unit cell to compose the on-chip metasurface; (b) The principle of guided wave extraction by combining the detour phase and geometric phase; (c) The correspondence between discrete detour phases and the positions of meta-atoms in the unit cell; (d) The relationship between discrete geometric phase delay and the orientation angle of the meta-atoms

直接作用的方式不同, 片上超表面的工作方式是先将光耦合到波导里再与纳米微结构作用。入射激光以边缘耦合的方式在厚度为 220 nm 的 Si_3N_4 波导中激发出 TE_0 模式的导波进行传输^[32], 随后导波被精心设计的纳米微结构调制后重新投射到自由空间中形成所设计的目标光场分布。 Si_3N_4 在可见光波段的折射率约为 2.05, 高折射率波导有利于将光限制在波导内传播。同时, 由于氮化硅的虚部在可见光波段内几乎为零, 因此其在该波段有较宽的透明窗口。

如图 2(b) 所示, 矩形 Si 纳米柱将导波耦合到自由空间时会产生两种相位突变: 一部分来自 Si 纳米柱沿导波传播方向累积的迂回相位 $\varphi_0 + \beta(n\Lambda + d_n)$ 。其中, φ_0 为初始相位, $\beta(n\Lambda + d_n)$ 为传播累积相位, β 是 TE_0 模式的传播常数, d_n 代表第 n 个纳米柱在第 n 个周期内的位置。另一部分则来自 Si 纳米柱各向异性结构特性引入的几何相位 φ_{PB} 。和线偏光类似, TE_0 模式的导波可以看作是 LCP 波和 RCP 波的组合。当导波经过矩形 Si 纳米柱后, 出射光分成两部分: 一部分是与入射光旋向相同的圆偏光, 另一部分是与入射光旋向相反的圆偏光, 同时携带一个附加的相位调制量 φ_{PB} , 其中 φ_{PB} 的值为 Si 纳米柱转角的两倍。对 LCP 导波分量来说, 经过 Si 纳米柱的相位调制后提取的 RCP 波的相位为 $\varphi_0 + \beta(n\Lambda + d_n) + \varphi_{\text{PB}}$, 对 RCP 导波分量来说, 经过柱的相位调制后提取的 LCP 波的相位为 $\varphi_0 + \beta(n\Lambda + d_n) - \varphi_{\text{PB}}$ 。在 $\lambda = 650 \text{ nm}$ 处, Si 纳米柱提取的迂回相位随其在一个周期内的位置连续变化, 我们选取其中的四个具有代表性的离散相位以量化片上四通道复用全息中的迂回相位分布, 如图 2(c) 所示。同样地, 我们选取典型的四种转角来覆盖片上四通道全息所需要的几何相位, 如图 2(d) 所示。

2.2 片上超表面四通道全息复用原理

超表面全息成像技术是计算全息的方法, 即利用计算机计算衍射过程以得到全息图的振幅和相位信息。当全息片受工作波段光源照明时, 会在成像面重现记录在全息面上的图像^[33-34]。片上超表面远场四通道复用全息的计算衍射过程可以用夫琅和费衍射过程表示:

$$U_{\text{obj}}(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \iint U_{\text{holo}}(x_0, y_0) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x_0x}{\lambda z} + \frac{y_0y}{\lambda z}\right)\right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

其中: U_{obj} 和 U_{holo} 分别代表物面和全息面的复振幅,

k 代表波矢, z 代表全息面和物面之间的距离, (x, y) 和 (x_0, y_0) 分别代表物面和全息面的坐标。式 (1) 中的积分项正好是衍射孔径场的傅里叶变换, 因此该公式可以写成傅里叶变换的形式以加速计算:

$$U_{\text{obj}}(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times F\{U_{\text{holo}}(x_0, y_0)\} \quad (2)$$

全息面的复振幅 U_{holo} 也可以写成复数形式: $U_{\text{holo}} = A \exp(i\varphi)$ 。其中, A 为振幅, $\exp(i\varphi)$ 为相位因子。由图 2(b) 可知, 沿 $+x$ 方向上第 n 个周期内的 Si 纳米柱累积的迂回相位为 $\varphi = \beta(n\Lambda + d_n)$, 若导波沿 $-x$ 方向传播时, 传播常数变为 $-\beta$, 则第 n 个周期内的 Si 纳米柱累计的迂回相位 $\varphi = -\beta(n\Lambda + d_n)$ 。根据傅里叶变换的共轭对称性: $F(-\omega) = F^*(\omega)$, 由 $F(A \exp(-i\varphi)) = F^*(A \exp(i\varphi)) = F^*(U_{\text{holo}})$ 可知, 仅由迂回相位编码的全息图会出现共轭像。引入几何相位后, $+x$ 方向上第 n 个周期内 Si 纳米柱提取的 RCP 相位为 $\beta(n\Lambda + d_n) + \varphi_{\text{PB}}$, $-x$ 方向上第 n 个周期内 Si 纳米柱提取的 RCP 相位为 $-\beta(n\Lambda + d_n) + \varphi_{\text{PB}}$ 。由此可见, 在迂回相位的基础上加入几何相位解耦了正负方向上的共轭对称性, 提供了一种新的片上编码自由度, 为片上超表面全息的四通道复用奠定了理论基础。

2.3 片上超表面四通道复用全息设计方案

为了将四幅目标图像“A”、“B”、“C”和“D”编码到一个超表面上, 不仅需要确定 Si 纳米柱的坐标, 还需要确定硅纳米柱在正交方向上的转角。本文利用模拟退火优化算法, 以四幅远场全息相位为优化目标, 以确定 Si 纳米柱沿 x 方向上的迂回相位 Φ_x , 沿 y 方向上的迂回相位 Φ_y , 及 x/y 方向的几何相位 Φ_{PB} 及其对应的纳米柱转角 θ 。模拟退火算法是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法, 其本质是模拟物理固体物质退火过程来解决组合优化问题。

本文利用模拟退火算法进行相位优化具体过程如图 3 所示。首先我们采用 GS (Gerchberg-Saxton) 相位恢复算法计算四幅目标图像衍射到远场的相位作为初始全息相位 φ_A 、 φ_B 、 φ_C 、 φ_D 。具体来说就是先使用目标图像的初始振幅 A 和与目标图像大小相同的随机相位 $\exp(j\varphi_0)$ 作为初始光场分布 $A \exp(j\varphi_0)$ 。初始光场经过傅里叶变换后可以表示为 $A \exp(j\varphi_F)$, 然后用经过傅里叶变换后的相位和目标图像振幅分布构成新的函数 $A \exp(j\varphi_F)$, 对该函数做逆傅里叶变换后得到

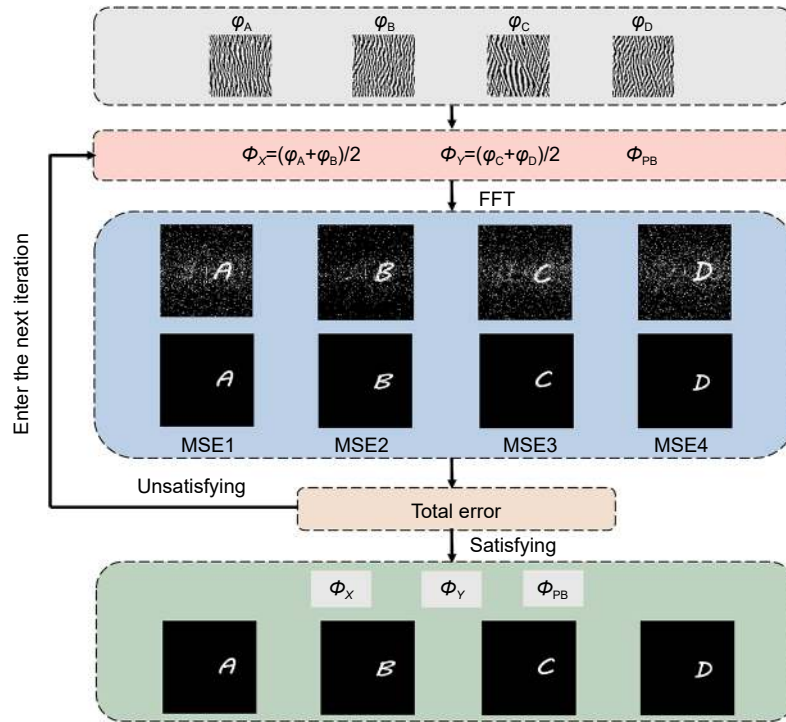


图 3 片上四通道复用全息相位优化流程图

Fig. 3 Phase optimization flowchart for the on-chip quad-fold multiplexed holography

$A \exp(j\phi_F)$, 取 $\exp(j\phi_F)$ 相位部分和目标图像振幅 A 作为下一次迭代的函数。重复以上步骤, 直到均方误差小于预设值得到所需的全息相位。根据 2.2 中的理论推导可知, 沿 $+x$ 、 $-x$ 、 $+y$ 、 $-y$ 四个方向的四通道复用全息相位分布可以表示为: $\phi_A = \phi_X + \phi_{PB}$ 、 $\phi_B = -\phi_X + \phi_{PB}$ 、 $\phi_C = \phi_Y + \phi_{PB} - \pi$ 、 $\phi_D = -\phi_Y + \phi_{PB} - \pi$ 。模拟退火优化算法中以 $\phi_X = (\phi_A + \phi_B)/2$ 、 $\phi_Y = (\phi_C + \phi_D)/2$ 、 ϕ_{PB} 作为模拟退火算法中的初始优化相位计算相应的 ϕ_A 、 ϕ_B 、 ϕ_C 和 ϕ_D , 并对这四个相位进行快速傅里叶变换得到该相位分布下的远场全息图像的强度。将该强度值分别与之相对应的目标图像相减后求和得到总均方误差 (MSE1、MSE2、MSE3 和 MSE4 之和), 若总误差的值小于设定值或迭代次数大于预设值, 则循环终止, 否则进入下一次循环直至满足条件。最终经过多次迭代循环后得到了满足四幅全息图所需要的 ϕ_X 、 ϕ_Y 和 ϕ_{PB} 相位矩阵, 确定了 Si 纳米柱在波导上的位置分布和在正交方向上的转角。

3 片上四通道复用全息实验验证

3.1 片上四通道复用全息超表面的制备

为了验证片上四通道复用全息的可行性, 我们采用标准电子束曝光 (electron beam lithography, EBL)

的工艺进行了片上超表面样品加工, 样品由 800×800 个像素组成, 整体尺寸为 $288 \mu\text{m} \times 288 \mu\text{m}$, 加工流程如图 4(a) 所示, 具体加工步骤如下:

- 1) 采用等离子体增强化学的气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 技术, 在 $500 \mu\text{m}$ 厚的熔融石英衬底上依次沉积 220 nm 厚的 Si_3N_4 和 380 nm 厚的 Si 薄膜;
- 2) 使用匀胶机将 PMMA 光刻胶涂覆在样品表面并以 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度烘烤 3 min , 再覆盖 PEDOT: PSS 薄膜后烘烤 3 min 形成导电层;
- 3) 将样品放置在电子束曝光机 (Raith 150) 中, 以 20 kV 的电压, $10 \mu\text{m}$ 的光阑进行曝光和图案刻蚀。曝光完成后, 使用去离子水洗掉表面的 PEDOT: PSS 导电层, 然后使用显影剂显影 80 s ;
- 4) 使用热蒸发工艺沉积 20 nm 的 Cr 金属掩膜;
- 5) 将样品放入丙酮中, 并将其加热至 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 使光刻胶溶脱剥离 (lift-off), 去除样品表面的光刻胶和多余的 Cr 金属, 保留 Cr 掩膜;
- 6) 使用反应离子刻蚀 (RIE) 对具有 Cr 掩膜的样品进行刻蚀, 除去无 Cr 掩膜覆盖的 Si, 获得所需要的 Si 结构。再将样品放入 Cr 腐蚀液中去去除残留在 Si 结构上的 Cr 金属掩膜后获得最终的样品。样品的扫描电子显微镜 (SEM) 整体图像和局部放大图像如图 5(a) 所示。

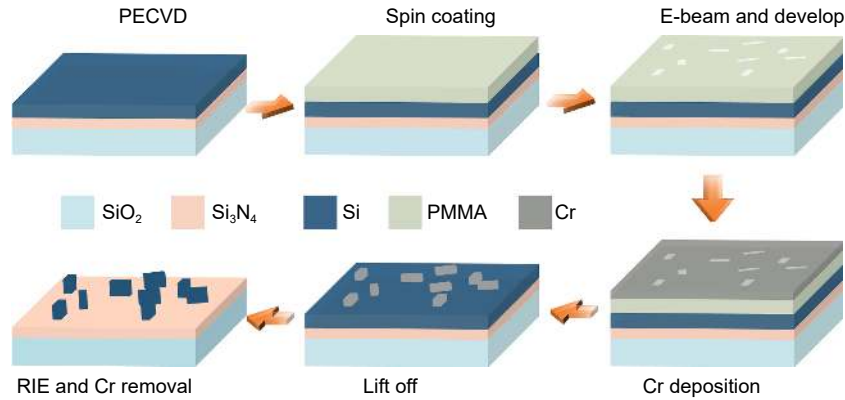


图 4 片上四重复用全息超表面样品制作工艺流程图

Fig. 4 The sample fabrication flow chart of the on-chip quad-fold multiplexing holographic metasurface

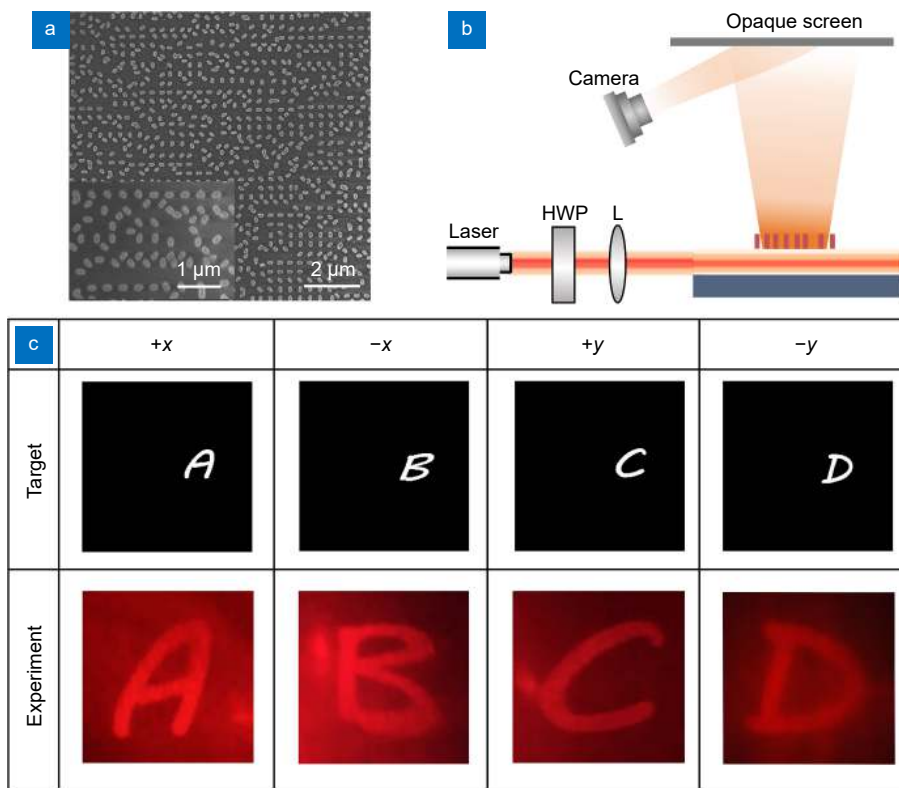


图 5 片上四重全息实验验证。(a) 制备样品的整体 SEM 图像和局部放大 SEM 图像; (b) 测量片上四重全息的光学实验装置图; (c) 导波分别沿 $\pm x/\pm y$ 方向入射时的目标全息图像及与目标图像对应的区域测量的全息图像

Fig. 5 Experimental verification for the on-chip quad-fold holography. (a) The overall SEM image and zoom-in SEM image of the fabricated sample; (b) Optical experimental setup sketch for measuring on-chip quad-fold holography; (c) Target and experimental holograms measured in the area corresponding to the target for guided waves incidence from the $\pm x/\pm y$ direction, respectively

3.2 片上四重复用全息实验及结果分析

由于远场全息图像显示在距离样品表面远场范围, 因此我们需要搭建可直接观察远场全息图像的光路。我们搭建的测量片上多路远场全息的光路简易示意图, 如图 5(b) 所示。波长为 $\lambda = 650 \text{ nm}$ 的激光由氦氖激光器产生, 激光器通过孔径光阑后, 先经过一个半波

片 (HWP) 和一个透镜 (L) 后以边缘入射的方式耦合到片上超表面中。超表面样品被固定在三维位移台上, 通过调节位移台与光源的相对位置, 我们可以精准地将光源耦合到 Si_3N_4 波导中。如果光源没有耦合进入波导中, 远场接收屏上不会显示任何图案。当导波经由片上超表面上的纳米结构阵列耦合到自由空间中时,

经过衍射后会在远场屏幕上显示所设计的全息图像, 然后再由彩色相机捕获并记录。保持测量光路不变, 旋转样品, 使导波分别沿 $+x$ 、 $-x$ 、 $+y$ 、 $-y$ 方向入射传播, 我们在各通道目标图像对应的区域得到了清晰无串扰的“A”、“B”、“C”和“D”四个英文字母图案, 如图 5(c) 所示, 其位置和方向均与设计吻合。这里, 将片上全息效率定义为投影到全息区域的光功率与导波经过超表面区域的光功率之比, 实验测得其效率约为 3%。因为拍摄角度的限制, 全息图像有些许变形, 但总体而言实验所获得的全息图像和目标图像几乎完全匹配。至此, 我们证明了第 2 部分中所提出的可独立编码的四通道远场全息理论。我们所提出的基于片上超表面的多路复用全息显示器件与当前的 PIC 技术兼容, 可以集成在例如 AR 眼镜或者可穿戴光子集成器件中。

4 结论

本文设计并演示了一种基于片上超表面的四通道全息术。基于迂回相位和几何相位复合调控的原理, 再通过模拟退火算法对相位进行优化, 得到了 Si 纳米柱在波导上的复用分布, 实现了 650 nm 的导波分别沿 $\pm x$ 、 $\pm y$ 方向传输时显示完全不同的四幅远场全息图像。这种通过控制导波传播方向的复用方法有效地提高了片上信息存储的能力, 为紧凑型片上光信息处理和显示器件提供了一种新思路。我们提出的片上超表面全息器件具有小型化和多功能集成的优势, 可应用于信息存储、全息摄影、增强现实和信息处理等领域。

参考文献

- [1] Guo X Y, Li B J, Fan X H, et al. Complex amplitude modulation of light fields based on dielectric metasurfaces and its applications[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, 49(9): 20201031. 郭旭岳, 李冰洁, 樊鑫豪, 等. 基于电介质超表面的光场复振幅调制及应用[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9): 20201031.
- [2] Yang B, Cheng H, Chen S Q, et al. Multi-dimensional manipulation of optical field by metasurfaces based on Fourier analysis[J]. *Acta Opt Sin*, 2019, 39(1): 0126005. 杨渤, 程化, 陈树琪, 等. 基于傅里叶分析的超表面多维光场调控[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126005.
- [3] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, 44(3): 255-275. 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255-275.
- [4] Wan S, Tang J, Wan C W, et al. Angular - encrypted quad - fold display of nanoprinting and meta - holography for optical information storage[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, 10(11): 2102820.
- [5] Tang J, Wan S, Shi Y Y, et al. Dynamic augmented reality display by layer - folded metasurface via electrical - driven liquid crystal[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, 10(12): 2200418.
- [6] Cao T, Lian M, Liu K, et al. Wideband mid-infrared thermal emitter based on stacked nanocavity metasurfaces[J]. *Int J Extreme Manuf*, 2022, 4(1): 015402.
- [7] Wang Z J, Dai C J, Li Z, et al. Free-space optical merging via meta-grating inverse-design[J]. *Nano Lett*, 2022, 22(5): 2059-2064.
- [8] Wan C W, Li Z, Wan S, et al. Electric - driven meta - optic dynamics for simultaneous near - /far - field multiplexing display[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, 32(10): 2110592.
- [9] Wang Z J, Dai C J, Zhang J, et al. Real - time tunable nanoprinting - multiplexing with simultaneous meta - holography displays by stepwise nanocavities[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, 32(9): 2110022.
- [10] Zhang D S, Liu R J, Li Z G, et al. Irregular LIPSS produced on metals by single linearly polarized femtosecond laser[J]. *Int J Extreme Manuf*, 2022, 4(1): 015102.
- [11] Li Z Y, Kim M H, Wang C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces[J]. *Nat Nanotechnol*, 2017, 12(7): 675-683.
- [12] Meng Y, Liu Z T, Xie Z W, et al. Versatile on-chip light coupling and (de)multiplexing from arbitrary polarizations to controlled waveguide modes using an integrated dielectric metasurface[J]. *Photonics Res*, 2020, 8(4): 564-576.
- [13] Ding F, Deshpande R, Bozhevolnyi S I. Bifunctional gap-plasmon metasurfaces for visible light: polarization-controlled unidirectional surface plasmon excitation and beam steering at normal incidence[J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 17178.
- [14] Yang R, Shi Y Y, Wan S, et al. On-chip metasurface for optical directional rectification[J]. *J Lightwave Technol*, 2021, 39(17): 5558-5562.
- [15] Shi Y Y, Yang R, Dai C J, et al. On-chip asymmetric beam-steering for broadband visible light[J]. *Opt Lett*, 2022, 47(2): 369-372.
- [16] Wang Z, Li T T, Soman A, et al. On-chip wavefront shaping with dielectric metasurface[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 3547.
- [17] Yang R, Shi Y Y, Dai C J, et al. On-chip metalenses based on one-dimensional gradient trench in the broadband visible[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(20): 5640-5643.
- [18] Ding Y M, Chen X, Duan Y, et al. Metasurface-dressed two-dimensional on-chip waveguide for free-space light field manipulation[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(2): 398-404.
- [19] Zhou N, Zheng S, Cao X P, et al. Ultra-compact broadband polarization diversity orbital angular momentum generator with $3.6 \times 3.6 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. *Sci Adv*, 2019, 5(5): eaau9593.
- [20] Yang R, Wan S, Shi Y Y, et al. Immersive tuning the guided waves for multifunctional on - chip metaoptics[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, 16(8): 2200127.
- [21] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on - chip meta - holography multiplexing[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, 16(6): 2100638.
- [22] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. On-chip meta-optics for semi-transparent screen display in sync with AR projection[J]. *Optica*, 2022, 9(6): 670-676.
- [23] Huang Z Q, Marks D L, Smith D R. Out-of-plane computer-generated multicolor waveguide holography[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 119-124.
- [24] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical

- dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(11): 210030.
- [25] Yulaev A, Zhu W Q, Zhang C, et al. Metasurface-integrated photonic platform for versatile free-space beam projection with polarization control[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(11): 2902–2909.
- [26] Guo X X, Ding Y M, Chen X, et al. Molding free-space light with guided wave-driven metasurfaces[J]. *Sci Adv*, 2020, 6(29): eabb4142.
- [27] Fang B, Wang Z Z, Gao S L, et al. Manipulating guided wave radiation with integrated geometric metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 1923–1930.
- [28] Ha Y L, Guo Y H, Pu M B, et al. Monolithic - integrated multiplexed devices based on metasurface - driven guided waves[J]. *Adv Theory Simul*, 2021, 4(2): 2000239.
- [29] Lin J, Genevet P, Kats M A, et al. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams[J]. *Nano Lett*, 2013, 13(9): 4269–4274.
- [30] Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications: Part II. Partially coherent pencils[J]. *Proc Indiana Acad Sci*, 1956, 44(6): 398–417.
- [31] Zhan Q W, Leger J R. Interferometric measurement of the geometric phase in space-variant polarization manipulations[J]. *Opt Commun*, 2002, 213(4–6): 241–245.
- [32] Chrostowski L, Hochberg M. *Silicon Photonics Design: from Devices to Systems*[M]. New York: Cambridge University Press, 2015.
- [33] Li L L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 197.
- [34] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(4): 308–312.

作者简介



杨睿 (1993-), 女, 博士研究生, 主要从事片上超表面设计与应用研究。

E-mail: yangrui@whu.edu.cn



【通信作者】李仲阳 (1988-), 男, 博士, 教授, 纳米光子学、超构表面、纳米尺度光芯片工艺等。

E-mail: zhongyangli@whu.edu.cn

团队介绍

武汉大学电子信息学院李仲阳教授课题组 (Nanophotonics & Emerging Applications Laboratory, NEAL) 致力于纳米光子学、超构表面、计算光学与多维图像重建、纳米尺度光芯片工艺等的研究。近年来, 在超构表面光学器件领域取得了一系列研究成果, 并在国际权威期刊发表多篇高水平成果, 其中包括 *Advanced Functional Materials* (IF=19.9)、*Small* (IF=15.1)、*Laser & Photonics Reviews* (IF=13.1)、*Nano Letters* (IF=12.3) 和 *Optica* (IF=11.1) 等期刊。

课题组主页: <https://whuneal.wordpress.com/>

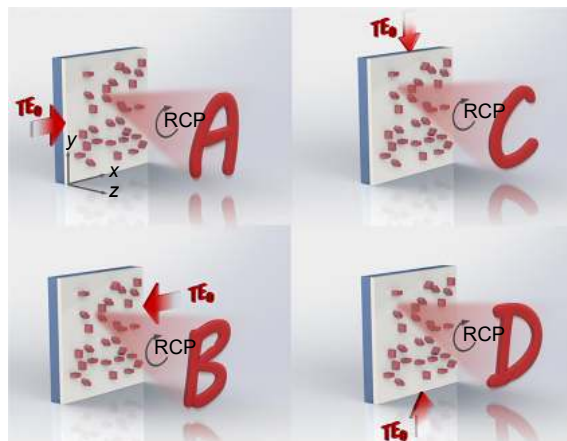
李仲阳, 武汉大学电子信息学院教授、博士生导师、国家青年千人, 任副院长。主持国家高层次人才引进青年项目、国家自然科学基金项目、湖北省杰出青年项目、武汉市科技局应用基础研究等多个科研项目。曾获国家优秀自费留学生“特别优秀奖”, 国际纳米学会授予 Ryan Fellow 头衔, 获 SPIE 光学与光电子学教育奖等。以第一或通讯作者发表包括 *Science* 等权威期刊论文 40 余篇, 被引用超过 2700 余次, 累计影响因子超过 400。申请国家发明专利 20 余项, 并长期担任 *Nature Communications*、*Science Advances*、*Nano Letters*、*ACS Nano*、*Materials Today* 等权威期刊审稿专家。



武汉大学 NEAL 课题组

Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface

Yang Rui¹, Yu Qianqian¹, Pan Yiwei¹, Chen Sihan¹, Zhang Chen¹, Ye Hong¹, Zhou Xinyao¹, Shi Yangyang¹, Wan Shuai¹, Liu Yang¹, Li Zhongyang^{1,2,3*}



On-chip quad-fold multiplexed far-field holography

Overview: Photonic integrated circuits (PIC) serve as an essential and promising candidate to eventually replace electronic circuits for the next-generation information processing. However, traditional PIC devices based on optical waveguides are usually bulky and lack full control at the subwavelength scale to achieve arbitrary wavefront-shaping functionalities. Recently, the invention of on-chip metasurface promotes the connection between guided and free-space optics and realizes the arbitrary conversion of guided waves and free-space light. As a new type of on-chip nanophotonic device, the introduction of metasurface onto the optical waveguide has made significant progress and exhibited multifunctional conversion from the guided waves to free-space, including directional beam-steering emitters, mode-conversion, on-chip lensing, optical router, and on-chip holography, etc. These on-chip nanophotonics devices provide new avenues for photonic chip-scale devices and miniature on-chip systems. For instance, meta-holography is an emerging and universal strategy based on engineered nanoantennas array to construct an optical-field image. However, on-chip far-field holograms are limited for realizing multiplexing for multiple directions due to a lack of arbitrary-encoding capability because their detour phases are complementarily related when the source propagates and excites the on-chip array from either positive or negative direction. Here, we propose and experimentally demonstrate a quad-fold multiplexed far-field holographic display optics device based on an on-chip metasurface. This optics device is composed of silicon nanopillar arrays on top of a planar waveguide of Si_3N_4 , in which a relatively thick layer of silica serves as the bottom cladding substrate. By mixing the detour phase and Pancharatnam-Berry (PB) phase, the on-chip metasurface could couple the guided waves into free space in circular polarization. The phase degeneracy in the positive and negative directions could be decoupled by selecting the desired circular polarization. Subsequently, utilizing a simulated annealing phase optimization algorithm to optimize the phase required by holograms and the multiplexing technology of on-chip directional, we achieved a quad-fold multiplexed far-field holographic display with independent encoding capability. Eventually, to verify the on-chip quad-fold multiplexed holography performance, we fabricated an on-chip metasurface sample by the conventional electron-beam lithography technique and the reactive ion etching processing. Through end-fire coupling from the laser source at $\lambda = 650 \text{ nm}$ into the on-chip metasurface sample along $\pm x/\pm y$ - directions, the far-field holographic images of the four letters (“A”, “B”, “C”, and “D”) multiplexing are successfully observed at their corresponding areas. The method proposed here opens up new prospects for the multifunctional integration of on-chip metasurfaces and provides an alternative approach for integrated optical communication with high information storage capacity.

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; DOI: 10.12086/oe.2022.220177

Foundation item: Hubei Province Funds for Distinguished Young Scientists (2021CFA043), Wuhan Science and Technology Bureau (2020010601012196), Recruitment Program of Global Experts (501100010871), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20220281), and Start-up Program of Wuhan University (501100007046).

¹Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; ²Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan, Hubei 430206, China; ³Suzhou Institute of Wuhan University, Suzhou, Jiangsu 215123, China

* E-mail: zhongyangli@whu.edu.cn