

简单结构超表面实现波长和偏振态同时复用全息显示新方法

徐平 肖钰斐 黄海漩 杨拓 张旭琳 袁霞 李雄超 王梦禹 徐海东

A new method of implementing simultaneous multiplexing holographic display of wavelength and polarization state with simple structure metasurface

Xu Ping Xiao Yu-Fei Huang Hai-Xuan Yang Tuo Zhang Xu-Lin Yuan Xia Li Xiong-Chao Wang Meng-Yu Xu Hai-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 084201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201047

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201047>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

物理学报. 2017, 66(6): 064102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064102>

基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

新材料器件为全息显示带来的新机遇

Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display

物理学报. 2018, 67(2): 024213 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172026>

基于超表面的Tamm等离激元与激子的强耦合作用

Strong coupling between metasurface based Tamm plasmon microcavity and exciton

物理学报. 2020, 69(1): 010201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191225>

简单结构超表面实现波长和偏振态同时 复用全息显示新方法*

徐平¹⁾ 肖钰斐¹⁾ 黄海游²⁾ 杨拓^{1)†} 张旭琳¹⁾
袁霞¹⁾ 李雄超¹⁾ 王梦禹¹⁾ 徐海东¹⁾

1) (深圳大学物理与光电工程学院, 微纳光电子技术研究所, 深圳 518060)

2) (深圳技术大学大数据与互联网学院, 深圳 518118)

(2020年7月2日收到; 2020年12月5日收到修改稿)

本文基于衍射光学设计理论, 提出了仅用一种简单结构实现波长和偏振态同时复用全息显示新方法. 构建了不同入射条件下超表面微元的结构参数与透过相位之间的映射关系, 建立了科学的评价函数, 优化得到超表面每个像素点处最优的单一结构超表面微元尺寸. 仿真结果表明, 本文设计的超表面实现了波长为 532 nm 的 x 线偏振光和波长为 633 nm 的 y 线偏振光入射显示不同形状字符的功能.

关键词: 超表面, 全息显示, 双波长, 双偏振态

PACS: 42.40.-i, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.70.20201047

1 引言

超表面^[1,2]对光波的振幅、相位和偏振具有强大操控能力, 已被广泛应用于光束偏转^[3]、超透镜^[4,5]、全息显示^[6-8]、编码^[9,10]、隐身^[11]等诸多领域, 其可根据需要在纳米尺度上对光波的多个维度进行任意调控, 可以在全息显示、编码、防伪等应用中加载更多信息^[12-16], 提高显示内容、编码容量以及防伪的安全等级. 研究人员提出了各种不同类型的超表面来实现不同复用方式的全息显示.

目前大多数的超表面仅能在特定波长实现全息显示^[17-19], 因此在不同设定波长下实现波长复用全息显示有迫切需求. 已有许多文献运用超表面对 2—3 个波长的独立调控, 从而实现多波长复用全息显示. 主要分成两大类: 在超表面中每个像素

单元上填充多个微元结构; 超表面中每个像素单元采用单一微元结构.

通过在超表面中每个像素单元中填充多个微元结构, 并且设定像素单元中每个微元结构对特定波长响应调制, 实现多波长复用显示. Wang 等^[20]提出了基于 4 个硅矩形柱构成超表面微元的超表面结构, 实现了红绿蓝三色圆偏振光复用的全息显示. 该超表面微元由三种尺寸的硅矩形柱组成, 每种尺寸矩形柱对应红绿蓝三色光的左右旋圆偏振光的透射偏振转化效率不同, 结合 Multiwavelength Gerchberg-Saxton(MWGS) 相位恢复算法, 实现了红绿蓝三色光和左旋偏振、右旋偏振光复用的全息显示, 其中红绿蓝三色光的衍射效率分别为 18.0%, 5.2%, 3.6%. 由于超表面中每个像素单元填充多个微元结构, 增加了每个像素点的尺寸, 从而降低了显示分辨率^[21], 并且限制了各波长的衍射效率.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275167) 和深圳市基础研究计划 (批准号: JCYJ20180305125430954, JCYJ20170817102315892, JCYJ2017081701827765) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangtuo@szu.edu.cn

为了降低显示分辨率, 超表面中每个像素单元采用单个结构的微元, 通过对振幅和相位的同时调控实现多波长复用全息显示. Huang 等^[22]提出了一种铝金属注射成形 (metal injection molding, MIM) 三层结构反射式超表面, 实现了红绿蓝三色波长复用全息显示. Qin 等^[23]提出铝椭圆孔洞结构超表面, 实现了透射式全彩全息显示. Wan 等^[24]采用铝椭圆孔洞结构超表面, 将红绿蓝三色波长对应的全息图添加相位偏移量, 从而实现了红绿蓝三色波长复用全息显示. 由于上述三种超表面中每个微元结构对不同波长具有相同的相位, 进而导致波长串扰. 各向异性超表面微元对不同波长具有不同的相位, 可以用于设计多功能超表面, 特别是双波长超表面^[25–27], 能够降低波长串扰并且提升衍射效率.

因此, 本文提出实现波长和线偏振态同时复用的全息显示的单一结构超表面, 并对其进行优化设计, 可以有效降低波长串扰.

2 超表面微元设计

本文运用单一结构超表面微元对波长和正交线偏振光具有不同相位调控能力的特性, 提出了一种基于超表面的波长和偏振态同时复用全息显示的新方法. 首先运用时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 建立矩形微元尺寸与透过相位的映射关系; 然后根据两个不同波长和偏振态相应的期望输出的目标字符计算出两幅相应的相位全息图; 再根据所计算出来的两幅相位全息图, 设定评价函数, 优化出单一结构超表面微元来表示两幅全息图上各点的相位; 最后构建了实现波长和线偏振同时复用的透射式全息显示超表面. 所设计的双波长、线偏振复用全息显示的超表面微元结构示意图如图 1(a) 所示, 图 1(b) 为超表面在 532 nm 波长和 633 nm 波长、正交线偏振态入射下, 全息显示示意图. 其中, 超表面由周期性排布的矩形柱微元组成, 设计的目标是: 波长为 532 nm 的 x 线偏振光、波长为 633 nm 的 y 线偏振光同时垂直入射到超表面后, 重建出绿色“CET”图像和红色“SZU”图像.

超表面的微元结构为矩形柱, 如图 1(a) 所示, 高度 H 为 270 nm 的微元, 在 x 方向上的周期为 $P_x = 260$ nm, 在 y 方向上的周期为 $P_y = 310$ nm.

L, W 分别为矩形柱在 x, y 方向上的尺寸. 非晶硅 (a-Si) 由于其在可见光和近红外波段折射率高, 被广泛应用于可见光超表面全息^[6,10,28]和近红外超表面全息^[18,29]. 本文选取非晶硅作为微元材料, 其在波长为 532 nm 和波长为 633 nm 处的折射率分别为 $4.03 + 0.093i$ 和 $3.78 + 0.026i$, SiO_2 作为基底材料, 其折射率为 $n_{\text{SiO}_2} = 1.45$. 当任意偏振光沿 z 轴垂直入射到超表面微元时, 其透过电场在 x, y 方向上的分量 E_{tx} 和 E_{ty} 可用传输矩阵 T 与入射电场 E_{ix} 和 E_{iy} 来表示, 如 (1) 式所示^[30]:

$$\begin{bmatrix} E_{tx} \\ E_{ty} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 t_{xx}, t_{yy} 为传输矩阵 T 在同偏振方向的分量, t_{xy}, t_{yx} 为传输矩阵 T 正交偏振方向上的分量. 根据 (1) 式可知, 当入射光为 x 偏振光时, 即 $\begin{bmatrix} E_{ix} \\ 0 \end{bmatrix}$, 其对应的 x 偏振透射光为 $E_{tx} = t_{xx}E_{ix} = |t_{xx}|e^{i\varphi_x}E_{ix}$, φ_x 为 x 偏振光入射时超表面微元的透过相位. 当入射光为 y 偏振光 $\begin{bmatrix} 0 \\ E_{iy} \end{bmatrix}$ 时, 其对应的透射 y 偏振光为 $E_{ty} = t_{yy}E_{iy} = |t_{yy}|e^{i\varphi_y}E_{iy}$, φ_y 为 y 偏振光入射时超表面微元的透过相位. 因此当矩形柱微元宽度 W 固定时, 在 x 偏振光入射下微元的相位

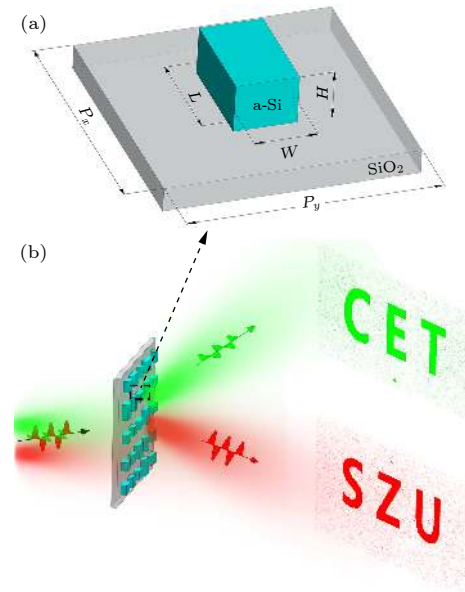


图 1 (a) 超表面微元结构示意图; (b) 超表面在 532 nm 波长和 633 nm 波长、正交线偏振态下, 全息显示示意图

Fig. 1. (a) Schematic of unit cell structure consisting of Si nanobrick on the SiO_2 substrate; (b) schematic of hologram metasurface at wavelength of 532 nm and 633 nm with orthogonal linear polarizations.

主要受微元长度 L 所调控, 同理当矩形柱微元长度 L 固定时, 在 y 偏振光入射下微元的相位主要受微元宽度 W 所调控. 根据 (1) 式, 在不同波长和线偏振态的光照射下, 通过改变矩形柱微元的尺寸 (L, W) 可以获得对应的透过相位. 通过对 L 和 W 两个参数进行合理设计, 使得矩形柱在 x 偏振光入射下的相位响应和 y 偏振光入射下的相位响应均覆盖 $0-2\pi$ 的范围. 以非晶硅矩形柱微元结构组成超表面, 能够实现对双波长的调控, 还可以实现对 x, y 偏振光的独立调控, 从而有可能获得满足双波长、双偏振全息显示所需的透过相位.

为了获得在不同入射条件下, 矩形微元结构尺寸参数与透过相位之间的映射关系, 应用商用 FDTD 软件模拟计算出在 532 nm 波长、 x 线偏振光、633 nm 波长、 y 线偏振光垂直入射下, 透射光的相位和透过效率随矩形柱的尺寸参数 (L, W) 变化时的分布, 如图 2 所示. 由图 2 可知, 当 532 nm

波长、 x 线偏振光入射时, 透射光的相位和透过效率主要受矩形柱的 L 参数调控, W 参数所起的作用相对较小. 而当 633 nm 波长、 y 线偏振光入射时, 透射光的相位和透过效率主要受矩形柱的 W 调控^[18,29].

3 超表面相位全息图设计

利用经典 Gerchberg-Saxton(GS) 相位恢复算法^[30] 计算两个不同波长显示不同目标字符 (CET 和 SZU) 所需的相位全息图. 由于其相位是连续分布的, 考虑到实际加工能力和衍射效率, 需对相位全息图进行量化处理. 根据衍射效率与量化阶数间的关系^[31], 对两幅全息图的相位采用八阶量化, 再将两幅全息图同一位置上的相位用单一矩形超表面微元来表示. 最后在 FDTD 软件中对构建的超表面进行模拟分析.

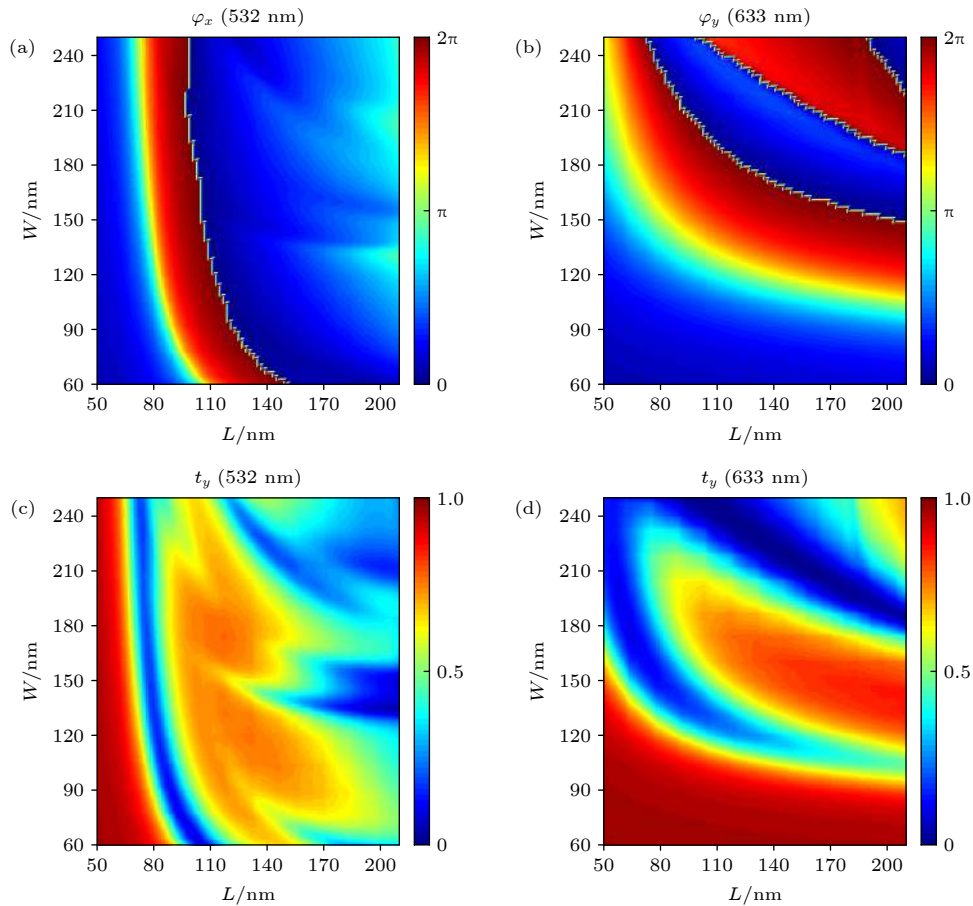


图 2 超表面微元相位分布 (a) 532 nm 波长、 x 线偏振态, (b) 633 nm 波长、 y 线偏振态; 超表面微元透过效率分布 (c) 532 nm 波长、 x 线偏振态, (d) 633 nm 波长、 y 线偏振态

Fig. 2. Phase of the metasurface (a) at 532 nm for x -polarization light and (b) at 633 nm for y -polarization light. Transmission of the metasurface (c) at 532 nm for x -polarization light and (d) at 633 nm for y -polarization light.

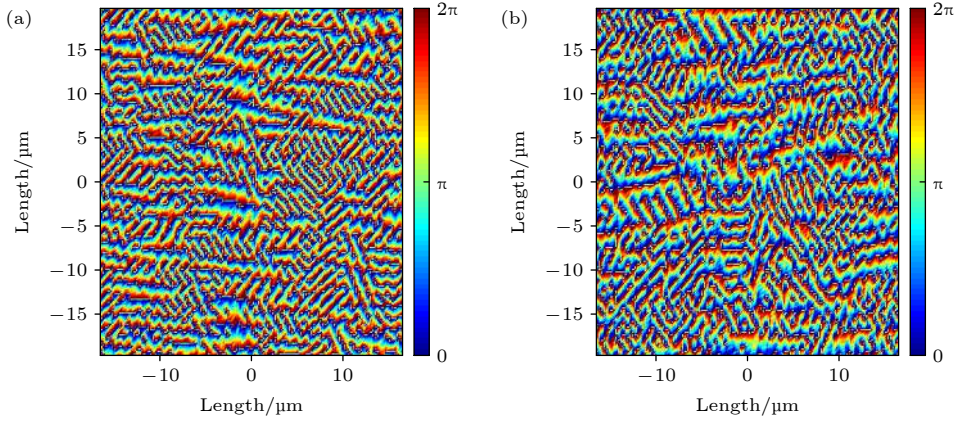


图 3 GS算法计算得到的经八阶量化后目标字符的相位分布 (a) CET字符; (b) SZU字符

Fig. 3. The phase distribution of the images using GS algorithm with eight-step: (a) Image“CET”; (b) image“SZU”.

利用 GS 算法计算 532 nm 波长显示 CET 字符的全息图, 经八阶量化后其相位分布为 $\varphi_1(x, y)$, 633 nm 波长显示 SZU 字符的全息图, 经八阶量化后其相位分布为 $\varphi_2(x, y)$, 其中 x, y 为全息图中像素点的坐标. 经八阶量化后 CET 字符和 SZU 字符的相位分布如图 3 所示.

为了从图 2 中优化得到合适的矩形微元尺寸参数, 使 (x, y) 处的矩形微元能够同时表示两幅全息图对应位置上的相位 $\varphi_1(x, y)$ 和 $\varphi_2(x, y)$, 并且能同时保证透过效率相对较大. 本文建立了科学的评价函数 $\Delta(x, y)$ 来辅助选取, 评价函数如 (2) 式所示:

$$\begin{aligned} \Delta(x, y) = & |1 - \exp(i|\varphi_x(x, y) - \varphi_1(x, y)|)| \\ & + |1 - \exp(i|\varphi_y(x, y) - \varphi_2(x, y)|)| \\ & + [1 - t_y(x, y)] + [1 - t_x(x, y)], \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $\varphi_x(x, y)$, $\varphi_y(x, y)$ 分别表示微元长宽为 $L(x, y)$ 和 $W(x, y)$ 时 532 nm 波长、 x 偏振光和 633 nm 波长、 y 偏振光对应的透过相位值, $t_x(x, y)$, $t_y(x, y)$ 分别表示微元长宽为 $L(x, y)$ 和 $W(x, y)$ 时 532 nm 波长 x 偏振光和 633 nm 波长 y 偏振光对应的透过效率. (2) 式第一、二项考虑了全息图中 (x, y) 处的矩形微元, 能同时表示两幅全息图对应位置上的相位, 第三、四项考虑了矩形微元的透过效率. 评价函数 $\Delta(x, y)$ 值越小, 则表示 $\varphi_x(x, y)$, $\varphi_y(x, y)$ 和 $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ 偏差越小, 并且保证透过效率最大, 说明此时的微元长宽更接近理想值.

字符 CET 和 SZU 对应的全息图八阶量化后各像素点的相位有 8 种值, $\varphi_1(n)$, $\varphi_2(m)$ ($n = 1, 2, \dots, 8$; $m = 1, 2, \dots, 8$), 由于要应用一个微元表示不同

入射条件下的两种相位, 并且同一位置的像素点上对应的两种相位组合最多有 64 个 ($\varphi_1(n)$, $\varphi_2(m)$), 那么根据 (2) 式和图 2 所示的透过相位与微元尺寸之间的关系, 搜索出这 64 个组合所对应 64 个最优的硅矩形柱几何参数 $L(n, m)$, $W(n, m)$. 硅矩形柱几何参数 $L(n, m)$, $W(n, m)$ 对应的在 532 nm 波长 x 偏振光入射下的透过相位为 $\varphi_x(n, m)$, 透过效率为 $t_x(n, m)$, 而在 633 nm 波长、 y 偏振光入射下的透过相位为 $\varphi_y(n, m)$, 透过效率为 $t_y(n, m)$. 图 4(a),(b) 为筛选得出的 64 种硅矩形柱对应的透过相位与 64 种理想组合相位的差值. 图 4(c),(d) 为筛选得出的 64 种硅矩形柱对应的透过效率. 由图 4(a),(b) 可知, 相位差值基本都小于 $\pi/8$, 绝大部分都接近于 0. 由图 4(c),(d) 可知, 硅矩形柱几何参数对应的透过效率变化较大, 根据图 2, 为了满足相位差值尽量小, 所筛选的硅矩形柱几何参数无法避开透过效率过低的区间.

根据字符全息图的相位分布, 获得全息图上所有像素点对应的矩形柱尺寸 $L(x, y)$ 和 $W(x, y)$, 组成双波长、线偏振复用全息显示的超表面. 其示意图如图 5(a) 所示. 图 5(b) 为根据超表面 3×3 像素点内硅矩形柱几何参数的尺寸 $L(n, m)$, $W(n, m)$, 计算得到的 532 nm 波长、 x 偏振光和 633 nm 波长、 y 偏振光对应的透过相位值和透过效率.

4 设计检验

将上述设计的超表面结构参数在 FDTD 软件中建模仿真, 考虑到计算机运算能力的限制, 且为了得到较清晰的全息重建图像, 根据奈奎斯特-香农

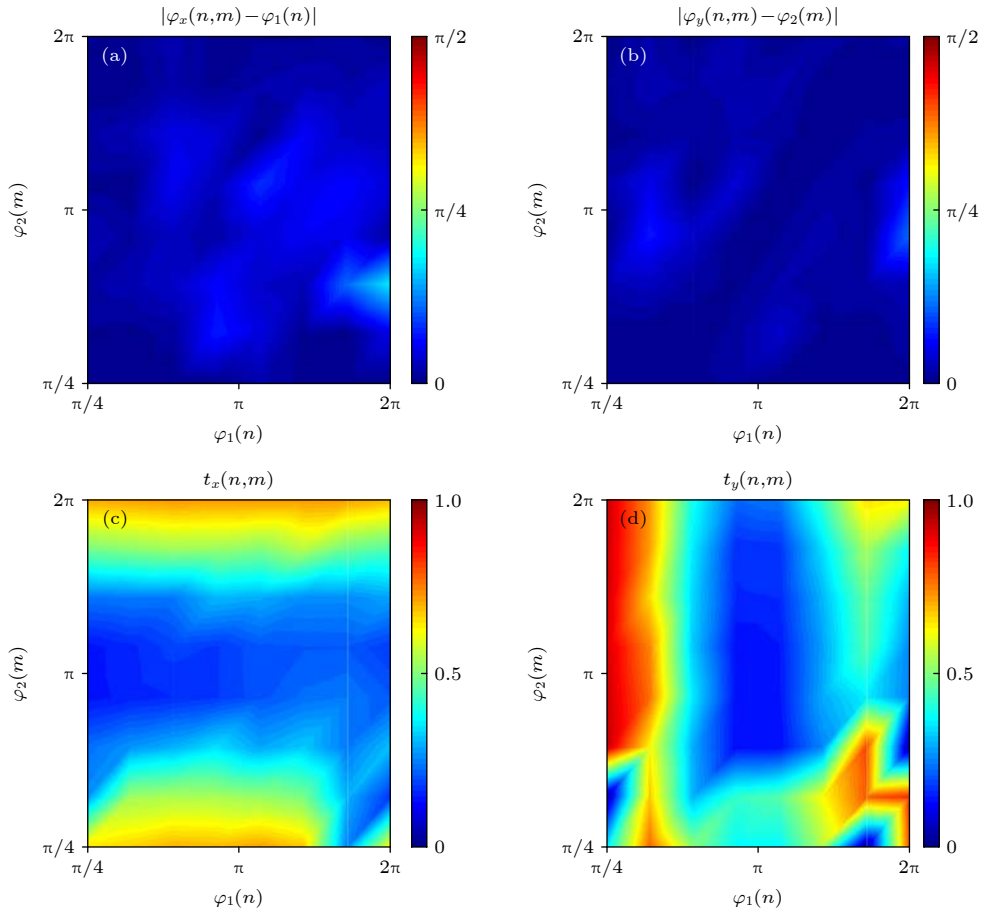


图 4 64 种硅矩形柱对应的透过相位与理想组合相位的差值 (a) 532 nm 波长、 x 线偏振态, (b) 633 nm 波长、 y 线偏振态; 64 种硅矩形柱对应的透过效率 (c) 532 nm 波长、 x 线偏振态, (d) 633 nm 波长、 y 线偏振态

Fig. 4. The deviation plot between the designed and ideal phase (a) at 532 nm for x -polarization light and (b) at 633 nm for y -polarization light. The transmission of the designed metasurface nanoblock (c) at 532 nm for x -polarization light and (d) at 633 nm for y -polarization light.

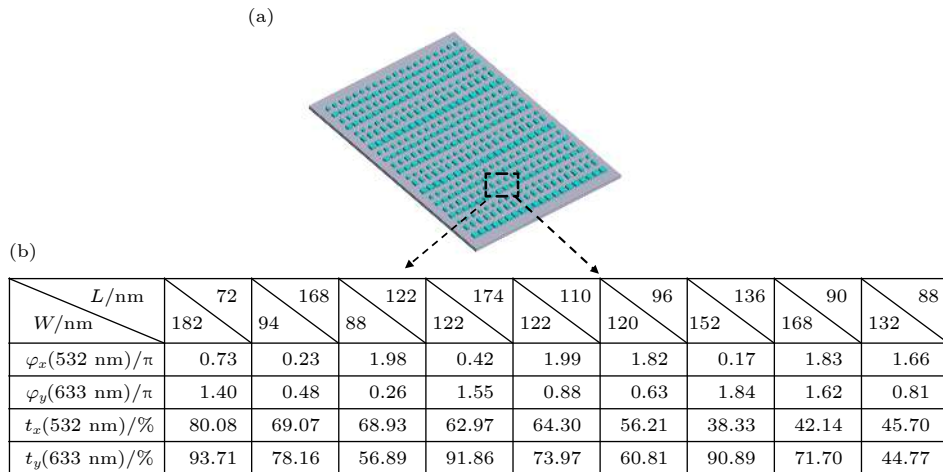


图 5 (a) 超表面结构示意图; (b) 超表面 3×3 像素点内硅矩形柱几何参数的尺寸 $L(n, m)$, $W(n, m)$, 分别在 532 nm 波长、 x 偏振光和 633 nm 波长、 y 偏振光入射下对应的透过相位值和透过效率

Fig. 5. (a) Schematic of metasurface; (b) phase matrix, transmission matrix, length of rectangular unit cell matrix and width of rectangular unit cell matrix. This is shown for 3×3 pixel subsection of the metasurface.

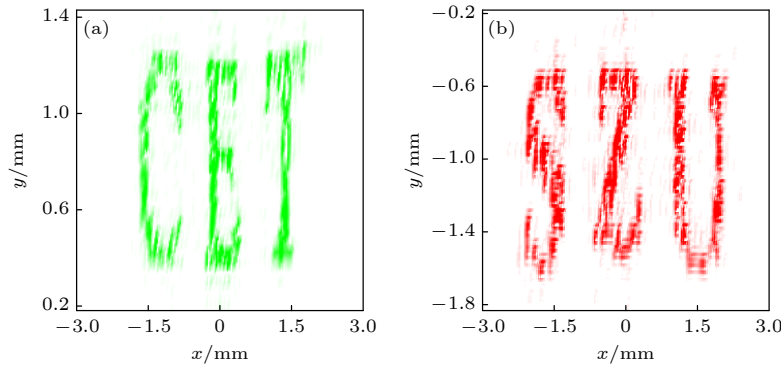


图 6 仿真得到的字符的全息再现像 (a) 532 nm 波长、 x 线偏振态; (b) 633 nm 波长、 y 线偏振态

Fig. 6. Simulated recovered image from the phase map of metasurface: (a) For x -polarization at 532 nm; (b) for y -polarization at 632 nm illumination.

采样定理本文在仿真中选取的超表面微元个数为 128×128 . 平面波从 SiO_2 基底垂直入射到超表面, 模拟计算超表面出射面处的近场光场, 分别根据近场的光场分布运用菲涅耳衍射积分公式计算得到出射光在距离超表面 5 mm 处形成清晰的全息重建图像, 如图 6 所示. 图 6(a), (b) 分别为 532 nm、 x 偏振光和 633 nm、 y 偏振光垂直入射时仿真得到 CET 和 SZU 字符的全息再现像, 所成的两个字符与目标字符相吻合. 而 532 nm、 y 偏振光和 633 nm、 x 偏振光垂直入射时无全息再现像. 因此可以通过对微元的宽度 W 、长度 L 进行调控, 在 532 nm x 线偏振光、633 nm y 线偏振光入射下, 实现不同字符的全息显示, 即波长和偏振态同时复用全息显示.

全息超表面总衍射效率等于超表面的透过效率与全息衍射效率的乘积. 其中全息衍射效率定义为重建图像的光强与超表面的透过光强的比值. 由于超表面上每个点的微元尺寸不同, 每个点的透过效率也不相同, 因此整个超表面的透过效率定义为超表面上所有微元的透过效率的平均值^[32,33]. 根据 FDTD 计算, 532 nm 波长、 x 偏振光入射时, 透过效率为 36.7%, 总的衍射效率为 12.8%; 当 633 nm 波长、 y 偏振光入射时, 透过效率为 36.8%, 总的衍射效率为 11.4%. 由于仿真中超表面微元个数较少, 因此全息再现像质量不高, 衍射效率相对较低, 实际制作中可通过提高微元数量来提升成像质量和衍射效率.

通过仿真结果与期望输出的目标字符比较可知, 本文提出的单一的矩形结构超表面可实现 532 nm、632 nm 波长和 x 偏振、 y 偏振复用的全息

显示, 能够使用现有的互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 加工工艺制作, 降低了加工制作难度, 降低了波长间的串扰, 并具有较高的衍射效率, 具有重要的学术意义和应用价值.

5 结 论

本文设计了由 x , y 两个正交方向上周期不同的矩形柱微元组成的简单结构超表面, 在可见光波段实现了双波长、双偏振态同时复用的全息显示. 仿真结果表明, 所设计的超表面实现了 x 偏振的 532 nm 平面波和 y 偏振的 633 nm 平面波同时照射下显示出不同形状字符. 本文所设计的超表面具有结构简单、易于加工的优势, 降低了波长间的串扰, 并具有较高的衍射效率, 可望在编码、防伪等领域有良好的应用前景.

参考文献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Yu N F, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [3] Khorasaninejad M, Crozier K B 2014 *Nat. Commun.* **5** 5386
- [4] Khorasaninejad M, Zhu W, Crozier K B 2015 *Optica* **2** 376
- [5] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, Capasso F 2016 *Science* **352** 1190
- [6] Huang K, Dong Z, Mei S, Zhang L, Liu Y, Liu H, Zhu H, Teng J H, Luk'yanchuk B, Yang J K W, Qiu C W 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 500
- [7] Jiang Q, Jin G F, Cao L C 2019 *Adv. Opt. Photonics* **11** 518
- [8] Genevet P, Capasso F 2015 *Rep. Prog. Phys.* **78** 024401
- [9] Jin L, Dong Z, Mei S, Yu Y F, Wei Z, Pan Z, Rezaei S D, Li X, Kuznetsov A I, Kivshar Y S, Yang J K W, Qiu C W 2018 *Nano Lett.* **18** 8016
- [10] Dong F, Feng H, Xu L, Wang B, Song Z, Zhang X, Yan L, Li

- X, Tian Y, Wang W, Sun L, Li Y, Chu W 2019 *ACS Photonics* **6** 230
- [11] Ni X, Wong Z J, Mrejen M, Wang Y, Zhang X 2015 *Science* **349** 1310
- [12] Xu P, Yuan X, Yang T, Huang H X, Tang S T, Huang Y Y, Xiao Y F, Peng W D 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 124201 (in Chinese) [徐平, 袁霞, 杨拓, 黄海漩, 唐少拓, 黄燕燕, 肖钰斐, 彭文达 2017 *物理学报* **66** 124201]
- [13] Xu P, Tang S T, Yuan X, Huang H X, Yang T, Luo T Z, Yu J 2018 *Acta Phys. Sin.* 024202 (in Chinese) [徐平, 唐少拓, 袁霞, 黄海漩, 杨拓, 罗统政, 喻珺 2018 *物理学报* 024202]
- [14] Huang H X, Ruan S C, Yang T, Xu P 2015 *Nano-Micro Lett.* **7** 177
- [15] Pan Y, Huang H X, Lei L, Zou Y, Xiao Y F, Yang T, Xu P 2019 *Appl. Sci.* **9** 407
- [16] Xu P, Yuan X, Huang H X, Yang T, Huang Y Y, Zhu T F, Tang S T 2016 *Nanoscale Res. Letters.* **11** 485
- [17] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, Huang Y W, Sun G, Chiang I D, Liao C Y, Hsu W L, Lin H T, Sun S, Zhou L, Liu A Q, Tsai D P 2014 *Nano Lett.* **14** 225
- [18] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Commun* **6** 7069
- [19] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, Groever B, Capasso F 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 113901
- [20] Wang B, Dong F, Li Q T, Yang D, Sun C, Chen J, Song Z, Xu L, Chu W, Xiao Y F, Gong Q, Li Y 2016 *Nano Lett.* **16** 5235
- [21] Wan W, Gao J, Yang X 2017 *Opt. Mater.* **5** 1700541
- [22] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, Wu P C, Wang C M, Sun G, Tsai D P 2015 *Nano Lett.* **15** 3122
- [23] Qin F F, Liu Z Z, Zhang Z, Zhang Q, Xiao J J 2018 *Opt. Express* **26** 11577
- [24] Wan W, Gao J, Yang X 2106 *ACS Nano* **10** 10671
- [25] Eisenbach O, Avayu O, Ditcovski R, Ellenbogen T 2015 *Opt. Express* **23** 3928
- [26] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, Horie Y, Faraon A 2016 *Opt. Express* **24** 18468
- [27] Tang S W, Ding F, Jiang T, Cai T, X H X 2018 *Opt. Express* **26** 23760
- [28] Wei Q S, Sain B, Wang Y T, Reineke B, Li Xiao W, Huang L L, Zentgraf T 2019 *Nano Lett.* **19** 8964
- [29] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 937
- [30] Gerchberg R W, Saxton W O 1972 *Optik* **35** 237
- [31] Zhao W, Jiang H, Liu B, Song J, Jiang Y, Tang C, Li J 2016 *Sci. Rep.* **6** 30613
- [32] Yoon G, Lee D, Nam K T, Rho J 2017 *ACS Photonics* **5** 1643
- [33] Sajedian I, Lee H, Rho J 2019 *Sci. Rep.* **9** 10899

A new method of implementing simultaneous multiplexing holographic display of wavelength and polarization state with simple structure metasurface*

Xu Ping¹⁾ Xiao Yu-Fei¹⁾ Huang Hai-Xuan²⁾ Yang Tuo^{1)†} Zhang Xu-Lin¹⁾
Yuan Xia¹⁾ Li Xiong-Chao¹⁾ Wang Meng-Yu¹⁾ Xu Hai-Dong¹⁾

1) (*Institute of Micro-Nano Optoelectronic Technology, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

2) (*College of Big Data and Internet, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China*)

(Received 2 July 2020; revised manuscript received 5 December 2020)

Abstract

In this paper, we propose a new method to realize both polarization-multiplexing and wavelength-multiplexing using a simple structure, which can realize hologram by the multiplexing of double wavelengths and double polarization in the visible band. Our design can reduce color cross-talk and have a higher diffraction efficiency. We design a transmission metasurface composed of simple rectangular cells. Firstly, we establish the relationship of structural parameters with the transmission phase under various incident conditions of light beams. Then we propose a fitness function that can optimize the structural parameters of the unit cell at each pixel point, which can display different images by 532 nm x -polarization and 633 nm y -polarization incident light beams respectively. Finally, finite difference time domain method is used to analyze the structure, and the holographic result fits the theoretical design very well. This work proposes using single metasurface structure to solve the problems of wavelength cross-talk appearing when using simple structures, and will have great importance in coding and anti-counterfeiting.

Keywords: metasurface, holographic, double wavelengths, double polarization

PACS: 42.40.-i, 42.25.Bs

DOI: [10.7498/aps.70.20201047](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201047)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275167) and the Basic Research Project of Shenzhen, China (Grant Nos. JCYJ20180305125430954, JCYJ20170817102315892, JCYJ2017081701827765).

† Corresponding author. E-mail: yangtuo@szu.edu.cn