

基于周期调控的离轴超表面全息成像位置研究*

郭文浩¹⁾ 蒲欣欣¹⁾ 张维^{2)†} 梁海峰¹⁾ 朱业传^{1)‡}
侯劲尧¹⁾ 孙雪平¹⁾ 周顺¹⁾ 刘卫国^{1)‡‡}

1) (西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710021)

2) (深圳技术大学工程物理学院, 超强激光应用技术研究中心, 深圳市超强激光与先进材料技术重点实验室, 深圳 518118)

(2025年8月7日收到; 2025年9月24日收到修改稿)

基于平面光学器件的超表面全息图因其在实现光学器件和系统微型化方面的潜力而受到广泛关注. 然而, 传统同轴全息术中固有的零级衍射和双像效应会显著降低成像质量, 限制其在实际应用中的推广. 相比之下, 离轴超表面全息成像具有显著优势. 在离轴超表面全息的设计过程中, 不同周期的单元结构会导致全息图在成像过程中产生图像位置偏移的现象. 为此, 本文研究了单元结构周期对离轴全息成像位置的影响. 采用高透过率的二氧化硅作为基底材料, 以二氧化钛作为相位调控单元, 设计工作波长为 635 nm. 数值模拟结果表明, 随着单元结构周期的增加, 全息像的中心位置逐渐靠近成像面的中心区域. 在该设计方案中, 当周期设定为 324 nm 时, 全息像能够成像于预设位置. 此外, 分别对不同离轴角度和单元结构高度构建的超表面全息图进行数值模拟分析发现, 成像位置均位于设计位置处, 说明成像位置主要受周期影响. 因此, 可以通过精确调控周期参数, 实现全息图像在预定位置的重建, 从而为高精度全息成像系统设计提供理论依据.

关键词: 超表面, 离轴全息, 单元结构周期**PACS:** 42.25.Bs, 42.40.-i, 42.40.Ht**DOI:** 10.7498/aps.74.20251068**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251068

1 引言

近年来, 超表面作为一种新型的平面光学器件, 由于能够在纳米尺度上精确调控光的振幅^[1,2]、相位^[3,4]和偏振^[5-8], 因此在全息成像领域受到了极大的关注. 传统全息术通过记录干涉图样来重建全息图像, 该干涉图样编码了散射光的振幅和相位信息. 然而, 相位调制的范围受材料特性限制, 导致其相位控制精度不足. 因此需要较大的体积才能实现所需的相位调制, 这阻碍了其与现代薄电子器件

的集成. 超表面全息术的出现为克服这一限制提供了一种新的方法, 使超薄全息图成为可能^[9]. 通过使用厚度薄至纳米级的超表面全息图在可见光范围可以实现高分辨率、低噪声的全息成像^[10].

超表面全息技术的发展为光学成像、数据显示、信息存储和加密等领域的应用带来了巨大的机遇. 研究人员基于几何相位超表面已实现了高分辨率、大视角和消色差全息, 大幅提高了设计自由度^[11]. 通过优化超表面单元结构, 可以同时控制光的相位和振幅^[12,13], 实现宽带、高效的全息图, 从而提高图像质量、均匀性和信噪比^[14].

* 国家自然科学基金 (批准号: 52075410)、陕西省重点研发计划 (批准号: 2025CY-YBXM-085)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2025JC-JCQN-093)、陕西省创新能力支撑计划 (批准号: 2025ZY1-GNYZ-05) 和深圳市科技计划 (批准号: JCYJ20220530153013030) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangwei0105@sztu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zyc_xatu@126.com

‡‡ 通信作者. E-mail: wgliu@163.com

目前的研究集中在单波长或偏振状态下的全息成像, 以及开发多功能、多通道的超表面全息图. 例如, 通过介质超表面的空间复用, 可以实现以最小的不同颜色之间的串扰重建 RGB 图像的全彩色全息图^[15]. 利用宽带等离子体调制技术, 构建的多色三维超表面全息图可以精确地重建二维和三维全彩全息图像^[16,17]. 通过可拉伸基板上的应变复用超表面全息图可以在不同的全息图像之间动态切换, 为可重构的光通信和显示提供了可能^[18]. 在提高全息效率方面, 一些研究通过设计具有双磁共振的介电超表面, 在可见光范围内实现了高效全息图^[19]. 同时, 通过反射式超表面也实现了衍射效率高达 80% 的全息图^[20]. 基于超表面空间复用和角度复用的七通道纳米打印和超表面全息技术有效地增强了信息存储能力和加密能力^[21].

尽管超表面全息技术取得了重大进展, 但在克服信息稀疏性、实现任意色调-饱和度-亮度 (hue-saturation-brightness, HSB) 控制以及进一步提高全息带宽方面仍然存在挑战^[22]. 为了解决这些问题, 研究人员提出了端到端设计方法, 通过神经网络优化超表面材料和单元结构, 以提高全息效率并最大限度地减少不同图像通道之间的串扰^[23]. 人工智能驱动的全息算法和紧凑的色散补偿波导几何结构相结合, 可以实现全彩 3D 全息增强现实 (augmented reality, AR) 显示, 从而在设备中呈现出全彩的 3D AR 内容^[24]. 目前, 超表面全息的研究主要集中在同轴设计上. 然而, 同轴全息术中固有的零级衍射严重影响了成像质量, 限制了其实际应用. 为了解决这个问题, 我们提出了一种基于干涉原理的离轴超表面全息设计方法^[25]. 在研究过程中, 采用数值模拟使用不同周期单元结构构成的超表面全息图时, 发现全息像的成像位置会随周期的改变而移动, 从而影响实际应用. 为此, 本文研究了不同周期和高度的单元结构对全息像位置的影响.

本文设计了由 TiO_2 纳米柱和 SiO_2 衬底组成的单元结构, 并使用离轴超表面全息设计方法, 设计超表面全息图. 在保持材料、周期等其他参数不变的情况下, 通过改变单元结构的周期, 对离轴成像位置进行分析, 得到成像位置随单元结构周期变化的规律. 为了进行更精确的分析, 还探讨了在保持材料、周期等其他参数不变的情况下, 分析仅改变离轴角度或纳米柱高度情况下, 成像位置的变化. 研究分析结果为后续基于该方法设计离轴超表

面全息图提供了理论基础, 为高精度全息成像系统的设计提供理论依据.

2 单元结构和超表面全息图设计方法

超表面全息图的设计主要包括两个关键部分: 单元结构的设计与全息图的整体排布. 在设计完成满足特定光学功能需求的单元结构之后, 这些单元结构将依据目标全息图所对应的相位分布被精确排列, 从而构建出完整的超表面全息图. 如图 1(a) 所示, 当平行光入射至该结构表面时, 在光的传播方向相对一侧能够清晰地重建出预期的离轴全息图像.

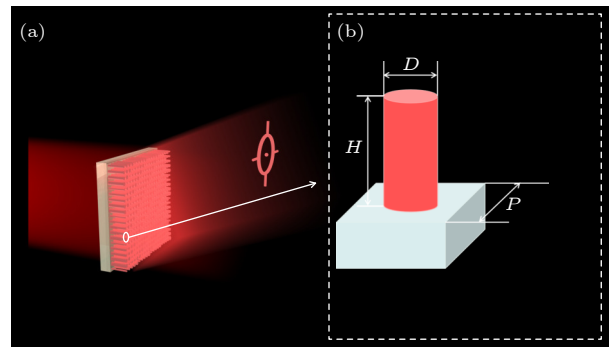


图 1 超表面全息图示意图 (a) 基于超表面的全息成像示意图; (b) 单个周期内的单元结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of metasurface hologram: (a) Schematic diagram of metasurface-based holographic imaging; (b) the unit cell diagram in one period.

2.1 单元结构设计

本文所设计的超表面单元结构由 SiO_2 基底和 TiO_2 纳米圆柱构成, 如图 1(b) 所示. 该结构充分利用了 TiO_2 在可见光波段中具有高折射率和低损耗的特性, 使其成为实现高效相位调控的理想材料. 为确保足够的相位积累并实现有效的相位控制, TiO_2 纳米柱的高度被设置为 $H = 600 \text{ nm}$. 在数值模拟中, 采用波长为 635 nm 的线性偏振光照射单元结构, 以获取其在可见光范围内的相位响应及透过率变化. 为了探究单元结构周期对离轴超表面全息性能的影响, 本文设置单元结构周期 P 在 $280\text{--}350 \text{ nm}$ 范围内进行分析. 在保持周期不变的条件下, 通过调节纳米圆柱的直径, 可实现 $0\text{--}2\pi$ 范围内的连续相位调制. 如图 2(a), (b) 所示, 当纳米柱周期和直径相对较小时, 可获得均匀的相位分布. 然而在不同周期条件下, 实现目标相位分布所需的直径范围存在差异. 为提升模拟的准确性,

在不同周期条件下均将纳米圆柱的最小直径设定为 $D = 100$ nm, 并通过增加直径实现所需的全相位覆盖. 随着周期的增大, 实现 2π 相位调控所需的最大直径也随之增大. 例如, 在周期 $P = 350$ nm 时, 对应的最大直径 $D = 304$ nm. 此外, 在所研究的各个周期范围内, 单元结构的平均透过率均超过 98%, 其中最大平均透过率达到 99.27%, 对应周期 $P = 350$ nm.

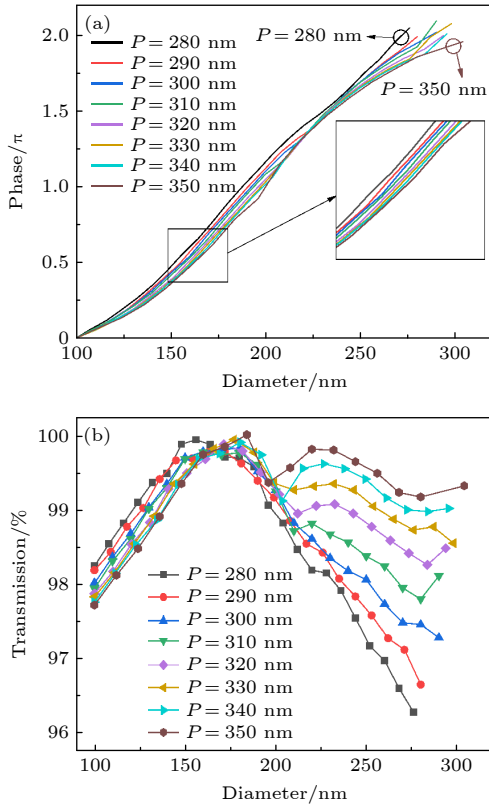


图 2 不同周期单元结构的相位调制和透射率随直径的变化 (a) 相位调制; (b) 透射率
Fig. 2. Variation of phase shift and transmission with diameter for the unit cell with various period: (a) Phase shift; (b) transmission.

2.2 纯相位计算全息图设计

在全息图设计过程中, 由于采用干涉全息原理实现离轴显示. 因此在干涉记录过程中引入物光 U_d 与参考光 U_r . 为实现离轴显示, 设定物光携带物体信息直接照射全息图, 通过改变参考光的角度为所需角度即可, 如下式所示:

$$U_d = A_d \exp[i\varphi_d(x, y)], \quad (1)$$

$$U_r = A_r \exp[i\varphi_r(x, y)] \\ = A_r \exp[i(x \cos \alpha + y \cos \beta)], \quad (2)$$

其中, A_d 和 A_r 分别是物光和参考光的振幅强度; φ_d 和 φ_r 分别是物光和参考光的相位; α, β 分别为参考光入射方向与 x, y 轴的夹角. 根据干涉全息理论, 物光与参考光干涉叠加后的强度 I 分布可表示为

$$I(x, y) = |U_d(x, y) + U_r(x, y)|^2 \\ = |U_d(x, y)|^2 + |U_r(x, y)|^2 + U_d(x, y)U_r^*(x, y) \\ + U_d^*(x, y)U_r(x, y) \\ = (A_d^2 + A_r^2) + A_d A_r \exp[i(\varphi_d - \varphi_r)] \\ + A_d A_r \exp[-i(\varphi_d - \varphi_r)] \\ = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos(\varphi_d - \varphi_r), \quad (3)$$

其中, U_d^* 和 U_r^* 分别为物光和参考光的共轭信息.

根据该原理设计纯相位计算全息图, 首先需要从图 3(a) 所示的目标图像中提取物体的光信息. 随后, 通过算法将所设计好的参考光与物光相干叠加, 以获得仅包含相位的全息图, 如图 3(b) 所示. 设计离轴角为 45° , 将参考光平行照射全息图, 则可以得到离轴的全息像, 如图 3(c) 所示. 可以看出, 全息像可以按照所设计的位置成像, 全息像中心点位于 $x = 0.5$ m 和 $y = 0.5$ m 的位置处, 与成像面 x 轴夹角为 45° .

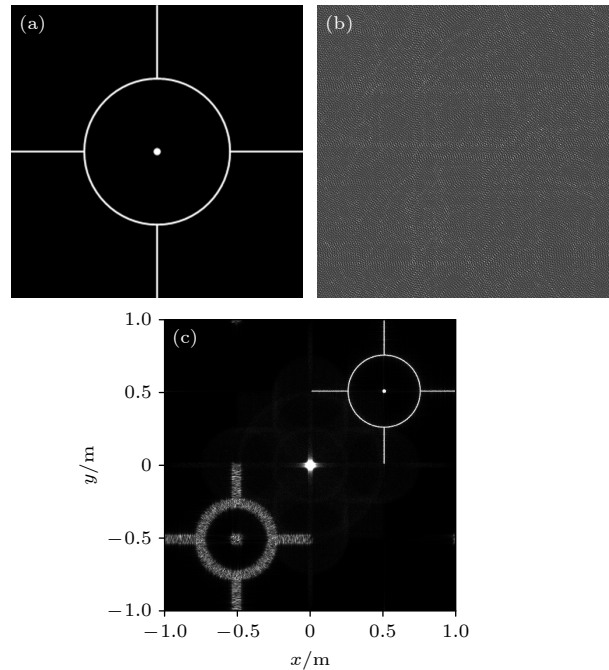


图 3 离轴全息图模拟 (a) 目标图案; (b) 相位全息图; (c) 计算机生成的全息像
Fig. 3. Simulation of off-axis hologram: (a) Target pattern; (b) phase-only hologram; (c) computer-generated hologram imaging.

综上所述, 我们首先构建了能够实现连续 $0-2\pi$ 相位调控的单元结构, 以确保全息图所需的完整相位覆盖. 随后, 依据计算全息原理, 设计得到了一幅相位分布范围在 $0-2\pi$ 的纯相位全息图, 从而有效避免了相位不全所带来的信息损失. 在上述设计的基础上, 依据纯相位全息图的相位分布逐点确定单元结构尺寸, 并将其进行排布, 进而构成目标超表面全息图.

3 超表面全息图数值模拟结果

对所得到的超表面全息图进行数值模拟仿真, 数值模拟结果如图 4 所示. 其中, 图 4(a)–(h) 分

别是单元结构周期为 280–350 nm 时, 所构成的超表面全息图数值模拟结果. 由于单元结构周期的不同, 因此所设计的超表面全息图尺寸也不同. 在设计过程中, 成像距离设计为 1 m, 且成像面坐标在 $[-1, 1]$ 之间. 根据设计要求, 所设计的全息成像中心位置应该位于 $x = 0.5$ m 和 $y = 0.5$ m 处, 即红色虚线的交点位置. 从图 4 可以看出, 当单元结构周期较小时, 成像位置会远离成像面中心. 随着周期的逐渐增大, 成像位置会逐渐靠近成像面中心, 并且中心点沿着设计角度移动. 当周期 $P = 320$ nm 时, 全息像中心位于 $(0.505, 0.5)$. 当周期 $P = 330$ nm 时, 全息像中心位于 $(0.47, 0.48)$. 从图 4(i) 也可以看出, 随着周期的增加, 全息像所对

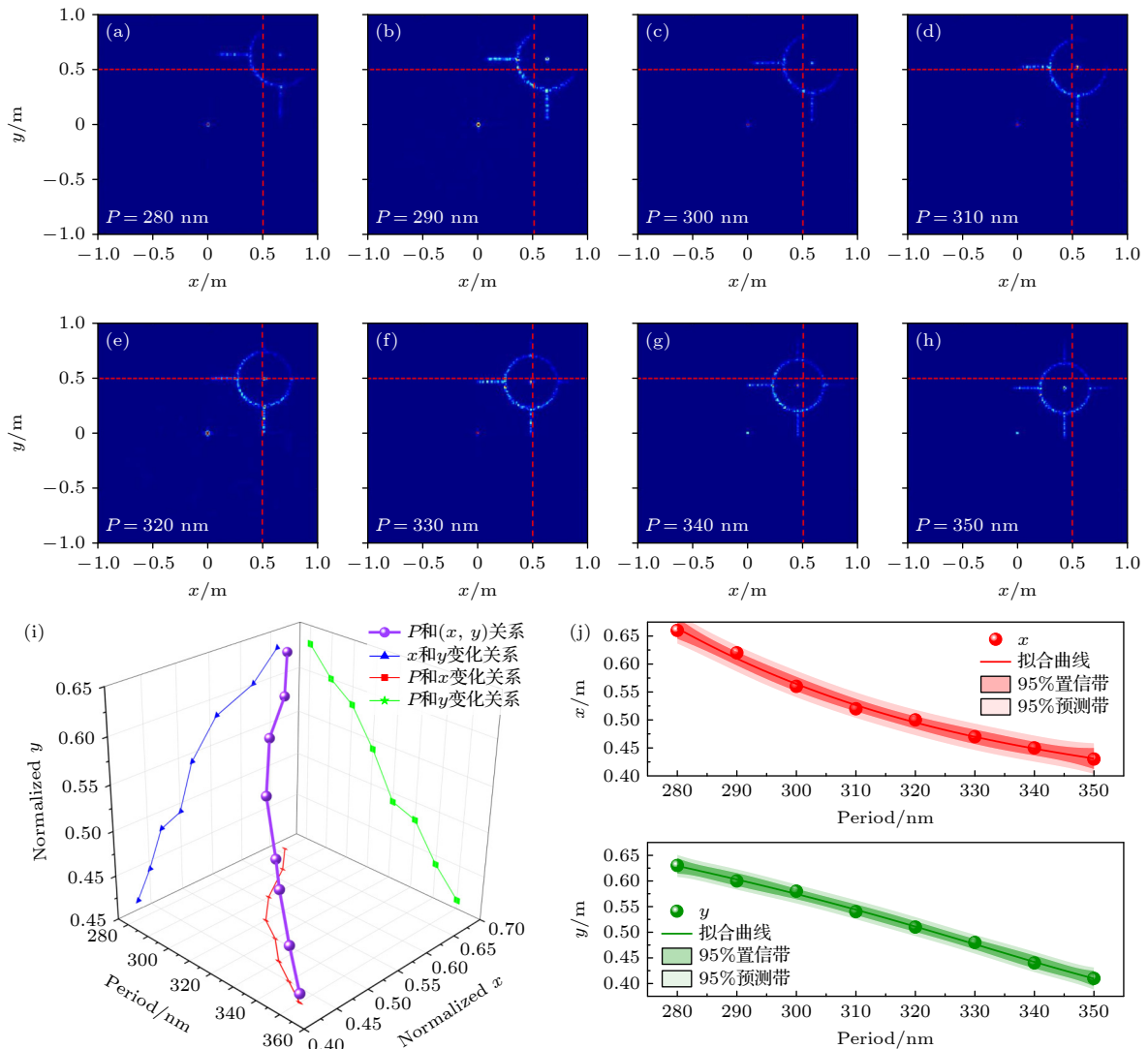


图 4 (a)–(h) 单元结构周期分别为 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350 nm 时的全息图数值模拟结果; (i) 不同周期对应的全息图像中心坐标; (j) 全息像中心坐标 x 和 y 与单元结构周期变化关系拟合曲线

Fig. 4. (a)–(h) Numerical simulation results of holography images with the unit cell periods of 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, and 350 nm; (i) centre coordinates of holographic images corresponding to different periods; (j) fitted curves of the dependence of the holographic image center coordinates x and y on the unit cell period.

应的位置坐标逐渐减小. 为了更清楚地分析周期对坐标位置的影响, 分别对全息像中心点坐标 x 和 y 与单元结构周期 P 的变化关系进行拟合, 可得到图 4(j). 可以看出, x 和 y 随周期变化趋势是趋近于一个线性的变化. 并且, 所得到的坐标数据均位于 95% 置信区内. 因此, 全息像成像在预设位置时对应的周期在 $P = 320\text{--}330\text{ nm}$ 之间.

为了更加细致地分析单元结构周期对成像位置的影响, 研究了单元结构周期 P 在 $310\text{--}330\text{ nm}$ 之间时成像位置的变化, 如图 5(a)–(j) 所示. 从图 5 可以看出, 当单元结构周期 $P = 324\text{ nm}$ 时, 其成像中心位置几乎与设计位置重合. 根据数值模拟结果对全息像中心点位置坐标进行提取, 得到 $P = 324\text{ nm}$ 时, 全息像中心位置坐标为 $(0.5, 0.5)$, 满足设计要求. 并且随着全息像逐渐靠近成像面中心点, 其成像效果逐渐提升. 因此合理地选择单元结构的周期, 有助于提升成像质量.

为了分析全息像的成像质量, 选择利用结构相似性 (structure similarity index measure, SSIM) 和峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)

来进行定量评估, 并将其分别定义为 Δ_{SSIM} 和 Δ_{PSNR} . 其中, SSIM 用于衡量图像的结构相似性, 是评估图像质量的关键指标之一. 其取值范围为 $[0, 1]$, 数值越高表明图像质量越优. 当两幅图像完全一致时, $\Delta_{\text{SSIM}} = 1$. 对于两幅图像中的坐标 x 和 y , 其结构相似性可定义为

$$\Delta_{\text{SSIM}}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (4)$$

其中 μ_x 和 μ_y 分别表示图像的均值, σ_x^2 和 σ_y^2 分别表示图像的方差, σ_{xy} 表示图像的协方差, C_1 和 C_2 为确保稳定性添加的常数. PSNR 用于衡量两幅图像间的峰值信噪比, 数值越高表明图像差异越小, 与真实图像的匹配度越高:

$$\Delta_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{max}}^2}{\text{MSE}} \right) \quad (5)$$

其中 I_{max} 代表图像像素的最大值, 通常设为 255; MSE 表示均方误差.

将数值模拟结果与理想全息重建效果进行对比计算得到 PSNR 和 SSIM, 如图 6 所示. 随着周

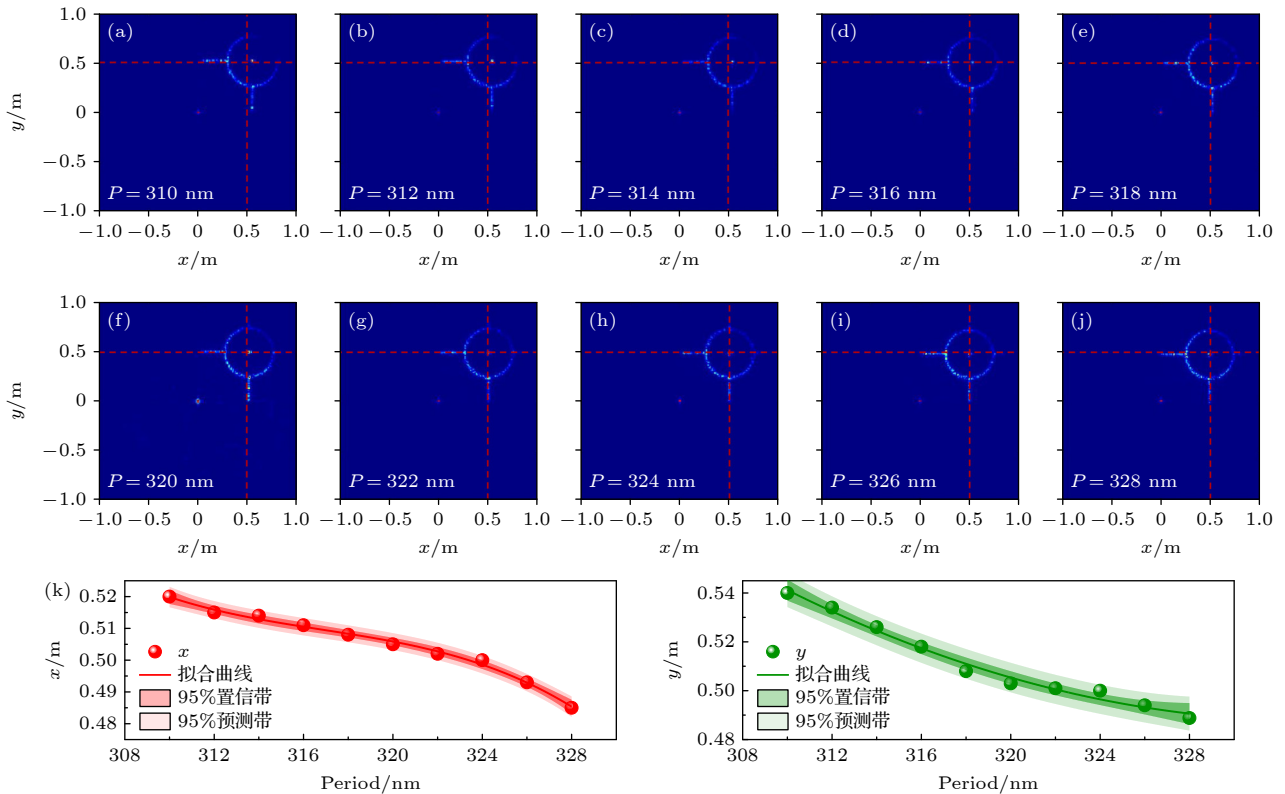


图 5 (a)–(j) 单元结构周期分别为 310, 312, 314, 316, 318, 320, 322, 324, 326, 328 nm 时的全息图数值模拟结果; (k) 全息像中心坐标 x 和 y 与单元结构周期变化关系拟合曲线

Fig. 5. (a)–(j) Numerical simulation results of holography images with the unit cell periods of 310, 312, 314, 316, 318, 320, 322, 324, 326 and 328 nm; (k) fitted curves of the dependence of the holographic image center coordinates x and y on the unit cell period.

期从 280 nm 逐渐增至 350 nm, PSNR 和 SSIM 均经历先增加后减小的过程. 并在 $P = 324$ nm 时, 达到最大值分别为 35.6 dB 和 0.889. 根据分析可知, 随着全息像逐渐靠近成像面中心点, 其成像效果也是先提升后降低. 因此合理的选择单元结构的周期, 有助于提升成像质量.

为了更加细致地分析单元结构周期变化对成像位置的影响, 研究了一维排布下, 周期 P 分别为 310, 316, 324, 330 nm 时的电场分布, 其中黑色虚线框为纳米柱结构, 如图 7 所示. 图 7(a)—(d) 分别是周期为 310, 316, 324, 330 nm 时, 纳米柱直径为 100 nm. 图 7(e)—(h) 分别是周期为 310, 316,

324, 330 nm 时, 纳米柱满足 2π 相位时所对应的最大直径. 由于周期的不同, 会导致电场在单元结构内部的积累产生差异. 因此不同周期情况下满足 2π 相位时所对应的最大直径也不相同. 从图 7 可以看出: 当纳米柱直径 $D = 100$ nm 时, 不同周期情况下纳米柱内部的光场分布并没有太大的差异. 而当纳米柱直径为最大时, 可以看出不同周期下纳米柱内部光场的分布强度先增强后减小, 相应的纳米柱对光的约束能力也是先增大后减小. 因此, 周期的变化会导致实际成像位置发生改变. 并且当周期过小时, 由于单元结构之间的近场耦合增

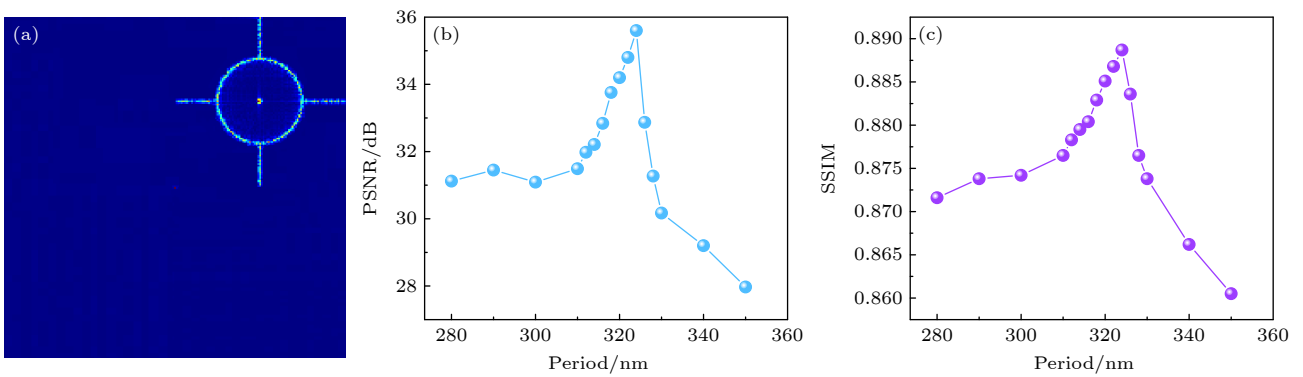


图 6 不同周期下成像性能 (a) 理想情况下成像效果; (b) PSNR; (c) SSIM

Fig. 6. Imaging performance under different periods: (a) Ideal imaging result; (b) PSNR; (c) SSIM.

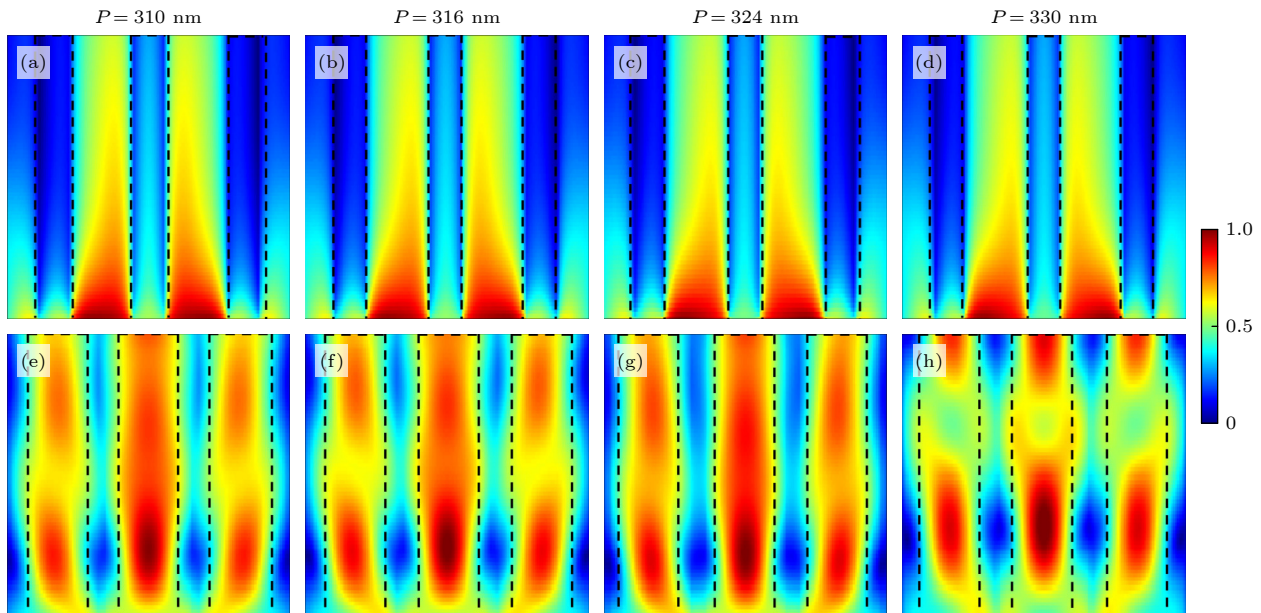


图 7 数值模拟单元结构周期 P 分别为 310, 316, 324, 330 nm 时的电场强度分布 (a)—(d) 纳米柱直径 $D = 100$ nm; (e)—(h) 纳米柱满足 2π 相位时最大直径

Fig. 7. Electric field intensity distributions from numerical simulations for unit cell periods $P = 310, 316, 324,$ and 330 nm: (a)—(d) The nanopillar diameter $D = 100$ nm; (e)—(h) the maximum nanopillar diameter at 2π phase.

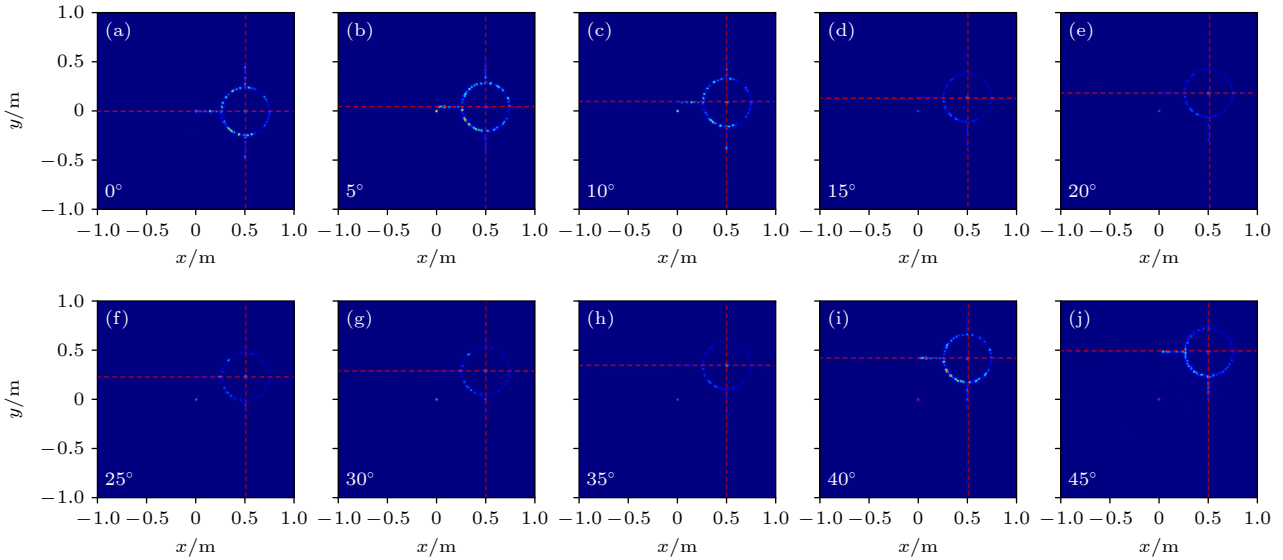


图 8 (a)–(j) 单元结构周期 P 为 324 nm 时, 离轴角分别为 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° 和 45° 时的数值模拟结果

Fig. 8. (a)–(j) Numerical simulation results of holograms generated by the off-axis angle of 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° and 45° .

强, 导致纳米柱对光场调控能力减弱, 无法将全息像稳定在预设的离轴位置. 而随着周期的增大, 其近场耦合效应会减弱, 纳米柱对光场的调控能力会增强, 使得全息像会逐渐接近预设的离轴位置. 随着周期的继续增大, 单元结构满足 2π 相位所对应的最大直径会减小, 导致结构的离散化程度增强, 使得局部干涉效应会迅速提升, 光进一步被约束靠近成像面中心区域 (光轴位置), 从而导致全息像会靠近成像面中心位置. 其中 $P = 324$ nm 时, 纳米柱对光场的约束能力最强, 且干涉效应的强度小于纳米柱对光场的调控能力. 因此, 当单元结构周期为 324 nm 时, 所得到的全息像可以位于所预设位置.

根据前面的研究可知, 在本文设计的单元结构中, 当单元结构周期为 324 nm 时, 可将全息像重建在所设计位置, 并提高成像质量. 为了更加准确地验证周期对成像位置的影响, 分别从离轴角度和单元结构高度两个方面来对其进行验证. 首先, 数值模拟了不同离轴角度下超表面全息成像结果, 如图 8 所示. 分别选取离轴角度为 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° 和 45° . 并获取了不同角度所对应的坐标分别为 $(0.5, 0)$, $(0.5, 0.04)$, $(0.5, 0.09)$, $(0.5, 0.13)$, $(0.5, 0.18)$, $(0.5, 0.23)$, $(0.5, 0.29)$, $(0.5, 0.35)$, $(0.5, 0.42)$ 和 $(0.5, 0.5)$, 均位于设计位置. 根据所获得的坐标计算得到的离轴角度也符合设计要求. 因此, 进一步验证了成像位置只与单元结构周期相关的结论.

其次, 分析单元结构高度变化对相位分布的影响. 为了更好地探究在不同高度下, 成像位置的变化. 在上述研究基础上, 选择 324 nm 作为最优单元结构周期. 并分别选取纳米柱高度范围在 600—2000 nm. 同样, 为了更好地分析数据, 初始直径均选择为 100 nm, 通过增大纳米柱直径来得到满足需求的相位分布, 如图 9(a) 所示. 其中, 红色虚线表示相移为 2π 的基准线, 可以看出不同高度纳米柱所对应的单元结构随着纳米圆柱直径的增大, 均可以满足 0 — 2π 的相位分布. 且随着高度的增大, 满足 2π 相位的最大直径变化趋势为逐渐减小. 纳米柱高度为 2000 nm 时, 所对应的最大直径最小为 165.4 nm. 而纳米柱高度为 600 nm 时, 所对应的最大直径最大为 301.8 nm. 不同高度的平均透过率均高于 98.89%, 最大平均透射率为 99.20%, 其高度为 $H = 900$ nm.

纳米柱高度分别为 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 nm 时, 对这些单元结构所构成的超表面全息图进行数值模拟, 结果如图 10(a)–(j) 所示. 其中, 虚线分别为 $x = 0.5$ m 和 $y = 0.5$ m 的标线. 从图 10 可以看出, 随着高度的增加, 全息像的中心位置没有发生变化, 依然位于所设计位置. 其所对应的位置坐标均为 $(0.5, 0.5)$. 因此可以得到结论, 全息像位置不随纳米柱高度的变化而变化.

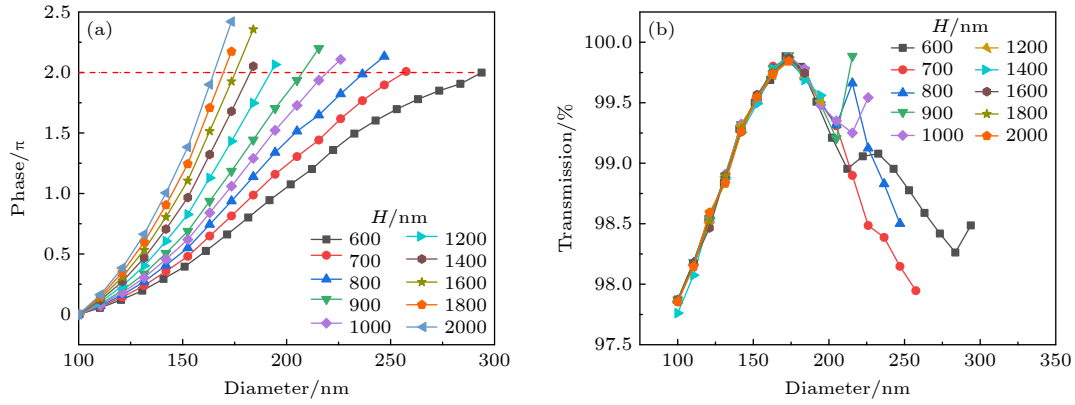


图 9 不同高度单元结构的相位调制和透射率随直径的变化 (a) 相位调制; (b) 透射率

Fig. 9. Variation of phase shift and transmission with diameter for the unit cell with various height: (a) Phase shift; (b) transmission.

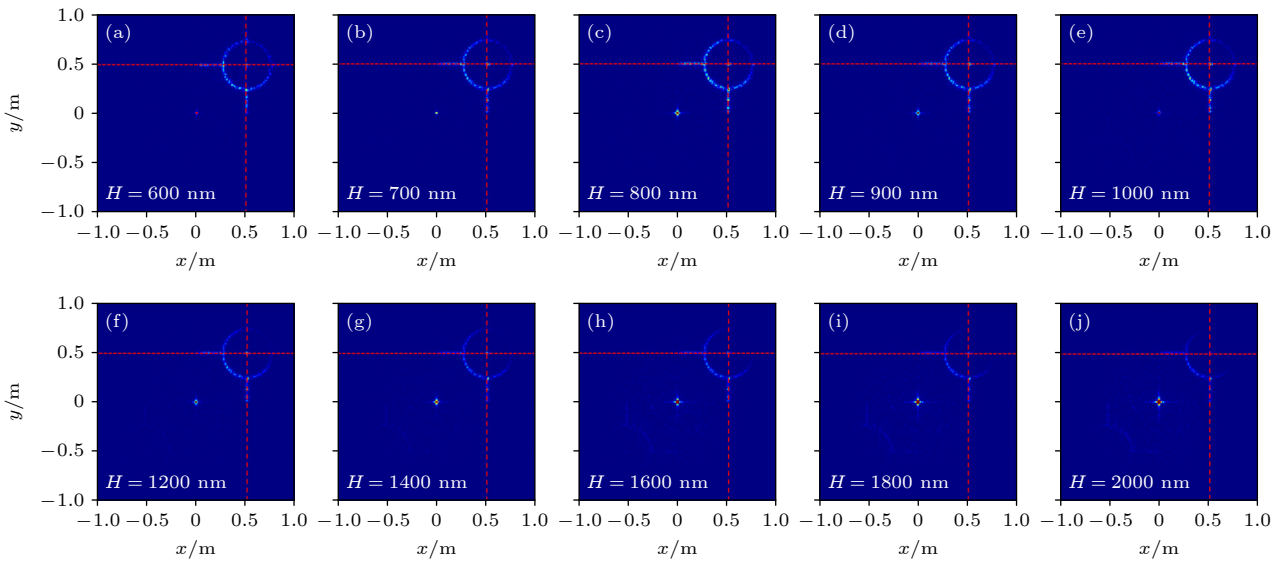


图 10 (a)–(j) 单元结构高度分别为 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 nm 时的全息图数值模拟结果

Fig. 10. (a)–(j) Numerical simulation results of holograms with the unit structure height of 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, and 2000 nm.

4 结 论

通过对数值模拟结果的分析, 发现单元结构周期会对全息像在成像面上的位置产生影响. 随着周期的逐渐增大, 全息像中心位置会逐步靠近成像面的中心区域. 因此, 当所设置的单元结构周期增大到一定程度时, 全息像的中心点将能够位于所设计的位置处. 在本文设计的单元结构中, 当单元结构周期满足 $P = 324 \text{ nm}$ 时, 全息像成功位于设计位置. 对于单元结构周期 $P = 324 \text{ nm}$ 时, 设计的不同离轴角度情况下的超表面全息图, 数值模拟结果表明离轴角度和成像位置均满足所设计需求. 此

外, 还对不同高度单元结构构成的超表面全息图进行数值模拟, 发现全息像的位置不会随高度变化而变化. 在离轴超表面全息成像中, 成像位置仅随周期的变化发生偏移. 因此, 选择合适的周期大小可以使全息像成功成像在预设位置.

参考文献

- [1] Thureja P, Shirmanesh G K, Fountaine K T, Sokhoyan R, Grajower M, Atwater H A 2020 *ACS Nano* **14** 15042
- [2] Su D E, Wang X W, Shang G Y, Ding X M, Burokur S N, Liu J, Li H Y 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **23** 5102
- [3] High A A, Devlin R C, Dibos A, Polking M, Wild D S, Percel J, Leon N P, Lukin M D, Park H 2015 *Nature* **522** 192
- [4] Wang Z H, Zhu Y C, Zhou S, Guo W H, Liu Y, He C, Bai M Y, Liu W G 2024 *Infrared Phys. Techn.* **142** 105521

- [5] Yuan Y Y, Sun S, Chen Y, Zhang K, Ding X M, Ratni B, Wu Q, Burokur S N, Qiu C W 2020 *Adv. Sci.* **7** 2001437
- [6] Yue Z, Li J T, Zheng C L, Li J, Chen M Y, Hao X R, Xu H, Wang Q, Zhang Y T, Yao J Q 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 043601
- [7] Yuan Y Y, Zhang K, Ratni B, Song Q H, Ding X M, Wu Q, Burokur S N, Genevet P 2020 *Nat. Commun.* **11** 4186
- [8] Xu P, Xiao Y F, Huang H X, Yang T, Zhang X L, Yuan X, Li X C, Wang M Y, Xu H D 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 084201 (in Chinese) [徐平, 肖钰斐, 黄海漩, 杨拓, 张旭琳, 袁霞, 李雄超, 王梦禹, 徐海东 2021 物理学报 **70** 084201]
- [9] Ren H R, Fang X Y, Jang J, Bürger J, Rho J, Maier S A 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 948
- [10] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M 2013 *Nat. Commun.* **4** 2807
- [11] Ji R N, Zheng X R, Li Y L, Xie X, Lin F C, Liu C, Zheng Y W, Yu P Q, Li X R, Song K, Li Z F, Lu W, Zhang S, Wang S W, Wang D, Wang Q H 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** e00398
- [12] Pu X X, Sun X P, Ge S B, Cheng J, Zhou S, Liu W G 2022 *Micromachines-Basel.* **13** 1956
- [13] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, Gu J Q, Li Y F, Tian Z, Singh R, Zhang S, Han J G, Zhang W L 2016 *Sci. Rep.* **6** 32867
- [14] Liu K F, Chen Q M, Liu Y L, Song S C, Zhang H M, Shi L T, He M Y, Xiao S Q, Xiao S M, Zhang X H 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 041703
- [15] Zhao W Y, Liu B Y, Jiang H, Song J, Pei Y B, Jiang Y Y 2016 *Opt. Lett.* **41** 147
- [16] Li X, Chen L W, Li Y, Zhang X H, Pu M B, Zhao Z Y 2016 *Sci. Adv.* **2** e1600892
- [17] Li X, Chen L W, Li Y, Zhang X H, Pu M B, Zhao Z Y, Ma X I, Wang Y Q, Hong M H, Luo X A 2016 *Sci. Adv.* **2** e1601102
- [18] Malek S C, Ee H S, Agarwal R 2016 *Nano Lett.* **16** 5053
- [19] Li Z, Kim I, Zhang L, Mehmood M Q, Anwar M S, Saleem M, Lee D, Nam K T, Zhang S, Luk'yanchuk B S, Wang Y, Zheng G X, Rho J, Qiu C W 2017 *ACS Nano* **11** 9382
- [20] Zheng G X, Mühlendernd H, Kenney M, Li G X, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308
- [21] Gao F, Zhou X, Lu L T, Deng J, Yan B 2023 *Results Phys.* **52** 106925
- [22] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, Guo C, Li J T, Sun S, Zhou Z K, Qiu C W, Wang X H 2019 *Light Sci. Appl.* **8** 95
- [23] Noh J, Kim J, Rho J 2024 *Nano Lett.* **25** 11398
- [24] Gopakumar M, Lee G Y, Choi S, Chao B, Peng Y F, Kim J, Wetzstein G 2024 *Nature* **629** 791
- [25] Guo W H, Pu X X, Zhu Y C, Wang Z H, Sun X P, Liu Y, Zhou S, Ge S B, Hang L Y, Liu W G 2025 *Opt. Commun.* **535** 130015

Off-axis metasurface holographic imaging positions based on periodic modulation*

GUO Wenhao¹⁾ PU Xinxin¹⁾ ZHANG Wei^{2)†} LIANG Haifeng¹⁾
 ZHU Yechuan^{1)‡} HOU Jinyao¹⁾ SUN Xueping¹⁾
 ZHOU Shun¹⁾ LIU Weiguo^{1)††}

1) (Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

2) (Shenzhen Key Laboratory of Ultraintense Laser and Advanced Material Technology, Center for Intense Laser Application Technology, and College of Engineering Physics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China)

(Received 7 August 2025; revised manuscript received 24 September 2025)

Abstract

Metasurface holography based on planar optical devices has attracted considerable attention due to its potential for miniaturizing optical components and systems. However, traditional on-axis holography has inherent zeroth-order diffraction and twin-image effects, which significantly degrade image quality and limit its

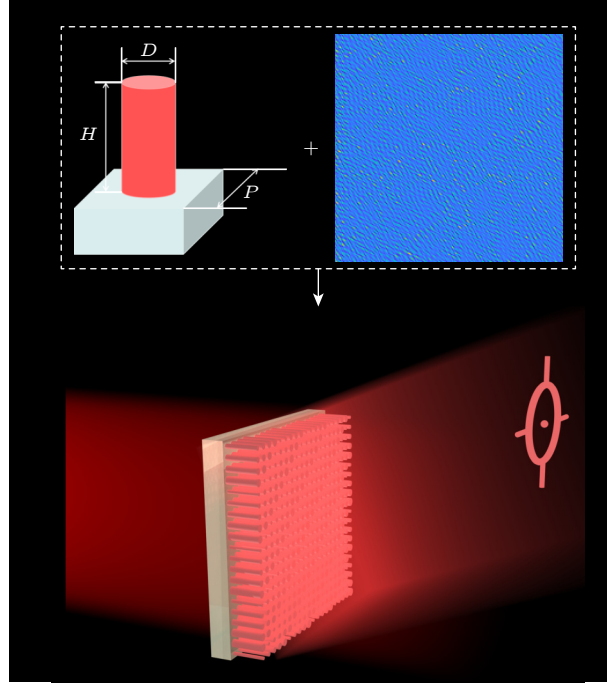
* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52075410), the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2025CY-YBXM-085), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi, China (Grant No. 2025JC-JCQN-093), the Innovation Capability Support Program of Shaanxi, China (Grant No. 2025ZY1-GNYZ-05), and the Science and Technology Program of Shenzhen, China (Grant No. JCYJ2022 0530153013030).

† Corresponding author. E-mail: zhangwei0105@sztu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zyc_xatu@126.com

†† Corresponding author. E-mail: wgliu@163.com

practical applications. Off-axis metasurface holography, in contrast, provides a promising solution to overcoming these limitations. In this work, we design a metasurface hologram composed of titanium dioxide (TiO_2) nanopillars on a silicon dioxide (SiO_2) substrate, by using the high refractive index and low optical loss of TiO_2 in the visible light range to achieve efficient phase control. The unit cell height is set to 600 nm to ensure sufficient phase accumulation, and the working wavelength is 635 nm. The hologram is constructed by mapping the continuous $0-2\pi$ phase distribution obtained from computational holography onto the unit cell array, and changing the nanopillar diameter to achieve full phase coverage. We systematically investigate the effect of the unit cell period on the imaging position in off-axis holography. Numerical simulations show that as the period increases from 280 nm to 350 nm, the center of the holographic image gradually shifts toward the center of the image plane. The optimal period is found to be 324 nm, at which the image is reconstructed precisely at the designed position. Further simulations using different off-axis angles ($0^\circ-45^\circ$) and nanopillar heights (600–2000 nm) confirm that the imaging position remains fixed at the target location, indicating that it is mainly determined by the unit cell period rather than other structural parameters. These results demonstrate that by carefully selecting the unit cell period, the holographic image can be accurately reconstructed at a predetermined positions with high image quality, providing theoretical guidance for designing high-precision off-axis metasurface holographic imaging systems.



Keywords: metasurface, off-axis hologram, unit cell period

PACS: 42.25.Bs, 42.40.-i, 42.40.Ht

DOI: 10.7498/aps.74.20251068

CSTR: 32037.14.aps.74.20251068



基于周期调控的离轴超表面全息成像位置研究

郭文浩 蒲欣欣 张维 梁海峰 朱业传 侯劲尧 孙雪平 周顺 刘卫国

Off-axis metasurface holographic imaging positions based on periodic modulation

GUO Wenhao PU Xinxin ZHANG Wei LIANG Haifeng ZHU Yechuan HOU Jinyao SUN Xueping
ZHOU Shun LIU Weiguo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 244201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251068

CSTR: 32037.14.aps.74.20251068

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251068>

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

大焦深离轴超透镜的设计与制作

Design and fabrication of off-axis meta-lens with large focal depth

物理学报. 2021, 70(19): 197802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202235>

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

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

物理学报. 2021, 70(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201047>

离轴螺旋长周期光纤光栅特性研究

Properties of off-axis helical long-period fiber gratings

物理学报. 2023, 72(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230415>

基于双开缝环结构的半反射和半透射超宽带超薄双偏振太赫兹超表面

Double-split-ring structure based ultra-broadband and ultra-thin dual-polarization terahertz metasurface with half-reflection and half-transmission

物理学报. 2023, 72(15): 158701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230471>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

基于非对称吸声器的发动机声学超表面声衬

Metasurface acoustic liner of engine based on asymmetric absorber

物理学报. 2023, 72(5): 054301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222011>