

文章编号: 1671-7449(2026)05-0640-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 640-647.

基于全硅 Janus 超表面的方向不对称轨道角动量调控

梁方正¹, 桑鲁晓^{2*}, 李仕奇², 李腾腾³, 刘美宏³, 姚建铨⁴

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266000;

2. 太原理工大学 人工智能微纳传感山西省重点实验室, 山西 晋中 030024;

3. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051;

4. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为实现太赫兹波段光场的多维信息调控与轨道角动量态的高效产生, 提出并设计了一种基于单层全硅矩形柱阵列结构的 Janus 超表面。该结构能够在 0.9 THz 频段实现正向与反向入射下的方向不对称涡旋光调控, 分别生成轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 为 $OAM=-2$ 和 $OAM=+3$ 的螺旋波前。通过几何相位与传播相位的联合控制, 在单层结构中实现了方向相关的相位差分调制。此外, 对结构的相位分布、电场强度及 OAM 纯度进行了系统研究。结果表明, 所设计的 Janus 超表面在正反入射下的相位分布呈明显的多螺旋结构, 中心相位奇点与理论设计一致, OAM 纯度超过 70%。该设计结构简单、损耗低、方向响应可控, 为太赫兹通信、光场调制与三维波前编码提供了一种新型高效方案。

关键词: Janus 超表面; 轨道角动量; 方向不对称; 太赫兹波; 全硅结构

中图分类号: O441

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026064

引用格式: 梁方正, 桑鲁晓, 李仕奇, 等. 基于全硅 Janus 超表面的方向不对称轨道角动量调控[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 640-647.

Liang Fangzheng, Sang Luxiao, Li Shiqi, et al. Asymmetric directional control of orbital angular momentum with all-silicon janus metasurface[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 640-647.

Asymmetric Directional Control of Orbital Angular Momentum with All-Silicon Janus Metasurface

Liang Fangzheng¹, Sang Luxiao^{2*}, Li Shiqi², Li Tengting³, Liu Meihong³, Yao Jianquan⁴

(1. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266000, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Artificial Intelligence Micro-Nano Sensing,
Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030024, China;

3. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,
North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

【收稿日期】2025-11-28

【修回日期】2026-01-07

【录用日期】2026-03-09

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62301509, 62405293); 中国博士后科学基金资助项目(2025M770537); 山西省基础研究计划资助项目(202303021212191)

【作者简介】梁方正(1990—), 男, 国家一级注册计量师, 硕士, 主要从事光电超构器件及测试计量技术研究。E-mail: liangfangzheng@ei41.com。

*【通信作者】桑鲁晓(1993—), 男, 副教授, 博士, 主要从事光学超表面、光学生物传感、新型生物材料等研究。E-mail: sangluxiao@tyut.edu.cn。

Abstract: To achieve multidimensional control of terahertz (THz) wavefields and efficient generation of optical orbital angular momentum states, this work proposes and designs a Janus metasurface based on a single-layer all-silicon rectangular-pillar array. The device realizes direction-asymmetric manipulation of vortex beams at 0.9 THz, producing helical wavefronts with $OAM = -2$ and $OAM = +3$ under forward and backward incidence, respectively. By jointly engineering the Pancharatnam-Berry phase and the propagation phase, direction-dependent differential phase modulation is implemented within a single-layer architecture. In addition, the phase distribution, field intensity, and OAM purity of the structure are systematically investigated. The results show pronounced multi-helical phase patterns under opposite incidences, with the central phase singularities consistent with theoretical design and an OAM purity exceeding 70%. Benefiting from its simple, low-loss, and direction-controllable all-dielectric configuration, the proposed metasurface offers an efficient and compact solution for THz communications, optical-field modulation, and three-dimensional wavefront encoding.

Key words: Janus metasurface; orbital angular momentum; directional asymmetry; terahertz waves; all-silicon structure

0 引言

轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 光场是一类具有螺旋相位结构的电磁波, 其复振幅包络包含 $\exp(im\varphi)$ 形式的相位因子, 其中, m 为整数, 表示 OAM 量子数, φ 为方位角。OAM 光场在传播过程中具有螺旋波前和中空强度分布, 在动量空间中, 携带 OAM 的模具有非零的角向动量分量, 因而在能流图中呈现出绕轴旋转的特征线。由于不同 m 值的模在正交基上可完全分离, 这类模天然适用于模式复用技术 (Mode Division Multiplexing, MDM), 基于其正交特性, 不仅解复用过程可通过简单的空间滤波或逆变换实现, 且理论上可承载无限多个相互正交的模式通道。因此, 该类模式被广泛应用于高容量通信、粒子捕获、光学操控、成像增强及量子信息传输等领域^[1-6]。

传统产生 OAM 光场的方式包括螺旋相位片、空间光调制器、q-plate, 以及基于 PB (Pancharatnam-Berry) 相位的 J-plate 等^[7-9]。这些方法通常依赖体型器件或多层堆叠结构, 难以在紧凑平面内实现高效率的方向依赖调控。尤其在太赫兹波段, 由于波长较长、器件尺寸较大、材料损耗明显^[10-11], 常规金属超表面的表面损耗会显著拉低透过率与相位保真度, 使得理想的 $0 \sim 2\pi$ 连续相位调控在实际器件中呈现“台阶化”或“幅相耦合”等折中现象。同时, 单元厚度与周期受加工可达分辨率限制, 进一步要求其形貌设计必须在

有限尺寸内最大化相位覆盖并实现幅相解耦。在此需求背景下, 单层全硅结构凭借其低损耗和高设计自由度的特点展现出显著优势, 为实现高性能调控提供了一条有效的技术路径^[12]。

近年来, Janus 超表面因其能够在正反入射方向展现完全不同的光学功能而受到关注^[13-15]。Janus 一词来源于罗马神话中的“双面神”, 在光学中代表一种方向不对称的功能器件。这种方向不对称性的物理核心在于 PB 相位的高度方向依赖性, 该相位对结构单元的旋转方向与偏振手性敏感。当入射由 $+z$ 反转为 $-z$ 时, 等效旋转角或手性关系“翻转”, 从而导致几何相位变号; 而传播相位主要由等效折射率与光程决定, 对入射方向不敏感。通过将 PB 相位与传播相位进行叠加, 即可在同一平面器件内实现针对不同入射方向的差异化相位输出的 Janus 行为^[16-19]。通过在 Janus 超表面单元结构中引入几何相位与传播相位的方向依赖响应, 可以实现入射方向敏感的波前控制, 从而在同一平面结构中获得偏振转换、聚焦与波前整形等不同输出功能^[20-21], 然而, 目前大多数设计采用金属-介质复合或多层堆叠结构, 导致制作复杂且损耗较高^[22-23]。相比之下, 全介质超表面, 尤其是硅基超表面, 展现出低损耗、高透过率和高功率承受能力等突出优势^[24], 硅材料在太赫兹区不仅介电常数稳定且拥有成熟的微纳加工工艺作为支撑^[25]。因此, 利用全硅结构构建方向可控的 Janus 超表面, 不仅是抑制欧姆损耗的有效策略, 也为与现有硅基光子技术平台实现高效兼容奠定了基础。

本文提出一种单层全硅矩形柱阵列式 Janus 超表面, 工作频率为 0.9 THz。通过将传播相位和几何相位相结合, 实现了正向入射时产生 $OAM=+3$ 、反向入射时产生 $OAM=-2$ 的方向不对称涡旋光。这项为实现太赫兹波段高性能、方向可控的紧凑型 OAM 器件提供了有效的解决方案。

1 结构设计与仿真方法

本文所设计的超表面整体结构如图 1 所示。本设计中所讨论的方向不对称是指在固定偏振条件下, 由于入射方向由 $+z$ 反转至 $-z$ 所引起的电磁响应差异。局部相位来源包括几何相位 Φ_{PB} 和传播相位 Φ_p 。PB 相位依赖于单元的旋转角, 遵循 $\Phi_{PB}=\pm 2\alpha$ 的规律, 而传播相位由单元尺寸及介质厚度共同决定。几何相位和传播相位叠加可形成方向敏感的相位差。通过设计单元旋转分布函数 $\alpha(x,y)$, 即可在正反入射下分别实现不同的 OAM 波前。

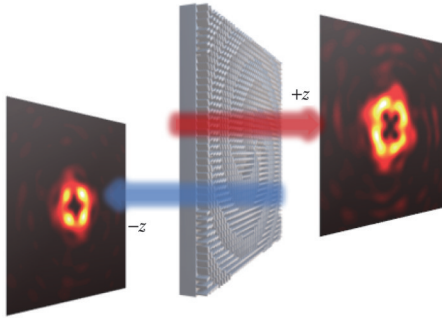


图 1 Janus 超表面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Janus metasurface structure

为了在单层结构中实现与方向相关的波前调制, 采用几何相位和传播相位编码技术, 利用超构单元固有的各向异性响应, 将所需的两种相位分布编码到同一超表面, 仅切换光的入射方向即可输出不同波前。在超表面设计中, 当亚波长尺度的纳米结构明显小于工作波长时, 高阶衍射成分通常被抑制, 因此, 只需考虑零阶传播模式。在无损耗系统假设下, 响应可通过简化的单轴晶体琼斯矩阵描述为^[26-27]

$$J = \begin{bmatrix} \exp(i\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

通过引入空间旋转坐标变换矩阵 $M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix}$, 传输矩阵的形式为

$$T(\theta, \phi) = M(\theta) J M^{-1}(\theta). \quad (2)$$

当圆偏振光 $E_{in} = E_0(1, i\sigma)^T$ 入射时, 输出场分解为 2 个分量,

$$E_{out} = E_0 \cos \phi(1, i\sigma)^T + iE_0 \sin \phi(1, -i\sigma)^T. \quad (3)$$

对于各向异性矩形硅柱单元, 其有效折射率随几何尺寸 (l, w) 与厚度 h 共同决定, 进而引入传播相位 $\varphi_{(x,y)}$; 而 PB 相位则由单元取向角 $\theta_{(x,y)}$ 决定, 其符号随入射方向的改变而反转。基于上述两种相位机制, 交叉偏振通道的正向入射 φ_f 和反向入射 φ_b 可定义为

$$\varphi_f = \varphi_{(x,y)} - 2\theta_{(x,y)}, \quad \varphi_b = \varphi_{(x,y)} + 2\theta_{(x,y)}. \quad (4)$$

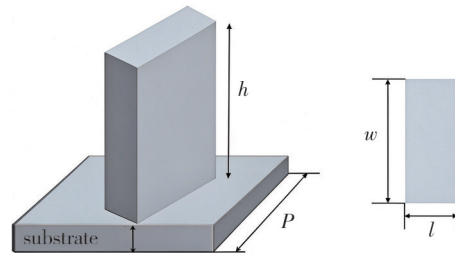
通过求解得出传播相位和几何相位分布为

$$\phi(x, y) = \frac{\varphi_b(x, y) + \varphi_f(x, y)}{2}, \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \frac{\varphi_b(x, y) - \varphi_f(x, y)}{4}. \quad (6)$$

该方程确立了非对称波面生成的基本设计原则: 参数 $\phi(x, y)$ 和 $\theta(x, y)$ 。其中, 传播相位 $\phi(x, y)$ 提供了波前曲率与聚焦等“方向无关”的基底相位分布, 而几何相位 $\theta(x, y)$ 则提供“方向相关”的差分相位。二者叠加使得同一单层器件能够对正、反两个入射方向的光束产生不同的目标波前。此方法实现了双向波前的解耦与独立操控, 并且后续可以通过外部激励对关键参数进行实时调控, 从而使器件的响应特性在不同功能状态之间实现可逆切换。该参数化调控方式使 Janus 器件具备动态功能重构能力, 为多功能和可调谐器件设计提供了思路。

Janus 超表面的矩形硅柱单元结构如图 2(a) 所示, 阵列编码结构如图 2(b) 所示, 材料为高阻硅 (电阻率 $>10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$), 基底厚度为 $300 \mu\text{m}$, 硅柱高度 $h=200 \mu\text{m}$, 长度 $l=20 \mu\text{m}$, 宽度 $w=115 \mu\text{m}$, 周期 $P=120 \mu\text{m}$ 。



(a) 单元结构

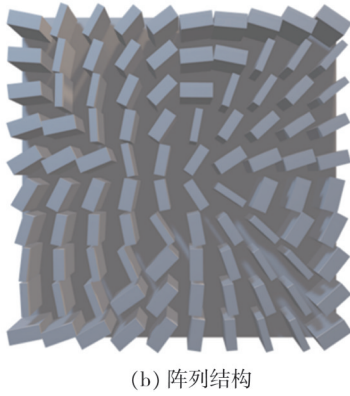


图 2 超表面结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of metasurface structure

为评估所提出的超表面单元结构的传输效率, 利用 CST Studio Suite 进行了数值模拟。模型在 x 方向和 y 方向设置为周期性边界条件, 在单元参数优化阶段, 采用沿 z 方向入射的 x 偏振和 y 偏振平面波表征矩形硅柱在正交线偏振下的透射幅度与相位响应, 从而筛选出在目标频率下具有较高透射效率和良好相位覆盖能力的几何参数组合。为最大限度地提高透射效率, 对矩形硅柱的几何参数进行了优化。

在 0.9 THz 工作频率下, 模拟计算了矩形硅柱的长度 l 和宽度 w 在 20~115 μm 范围内变化时, 两种正交线性极化入射下的透射幅度与相位响应。图 3(a) 和 (b) 分别对应 x 偏振和 y 偏振入射时的透射图谱, 图 3(c) 和 (d) 则展示了相应的相位分布。图 3 显示出, 在给定 l 、 w 组合下, 主通道透射幅值大于 60%, 避免了后续阵列级出现满足相位延迟但能量不足的情况, 同时, 相位响应随 l 或 w 呈现良好的线性关系, 便于插值选取 8 个离散单元构成近连续的 $0\sim 2\pi$ 覆盖。随后, 为了不牺牲透过的同时细化相位采样密度, 通过协同设计 PB 相位与传播相位, 等效构造出兼具方向不对称与高保真波前的相位分布。本文选取了能够实现 LCP 到 RCP 的偏振转换的 8 个超原子单元来构成传播相位梯度, 利用 PB 相位原理确定了单元结构的取向角。结合传播相位和 PB 相位实现了最终双面 Janus 相位的调制。所选的 8 个超表面单元在目标频率下透射率高于 60%, 且 PB 相位与旋转角度呈线性关系, 表明所设计的超表面能够实现对复杂波前的精确调控。

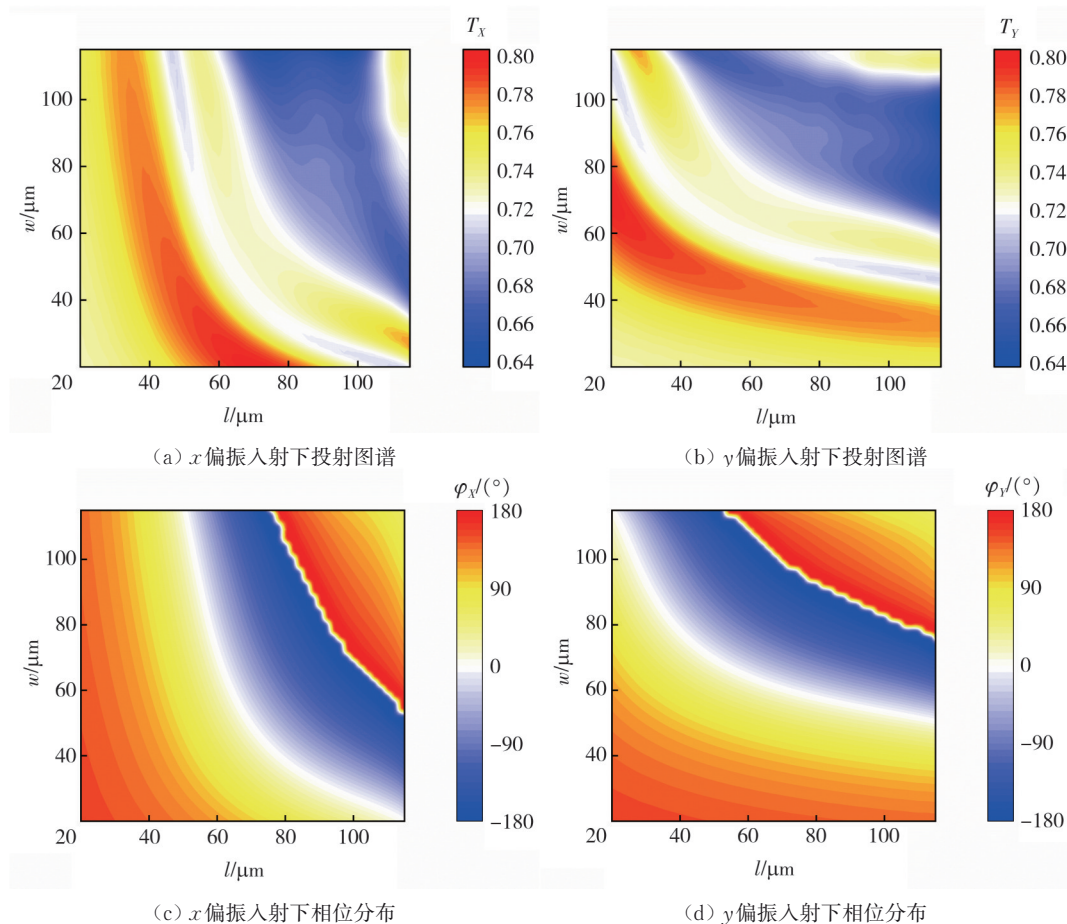


图 3 超表面单元结构在不同入射波下的透射和相位分布

Fig. 3 Transmission and phase distributions of metasurface unit structure under different incident waves

在完成单元结构设计后,根据目标相位分布对超表面阵列进行排布。当LCP偏振光入射时,超表面晶胞阵列对应的相位为 ϕ_{forward} 和 ϕ_{backward} ,为了实现OAM的清晰成像,将螺旋相位与聚焦相位进行叠加,这种复合相位设计能将能量收拢到焦平面附近,使得环形主瓣与中心奇点在较短传播距离处清晰成像,从而降低对远场探测距离与采样口径的要求,便于在后续数值仿真中用有限的探测面观测OAM的特征条纹。超表面的整体相位设计为携带聚焦功能的涡旋相位,即聚焦的OAM叠加态。因此,正向和反向入射对应的两组相位分布可以表示为^[28-29]

$$\phi_{\text{backward}} = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) + 2 \times \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad (7)$$

$$\phi_{\text{backward}} = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) - 3 \times \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad (8)$$

式中:焦距 $f=5\,000\,\mu\text{m}$; x 和 y 为确定超表面的空间坐标。本文模拟了一个直径为 $4\,000\,\mu\text{m}$ (40个周期)的阵列,超表面单元正反向所需相位排布如图4所示。

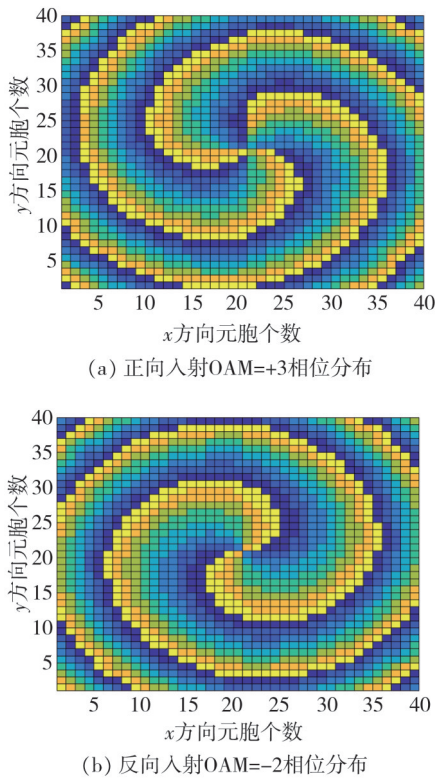


图4 超表面阵列排布所需的相位分布

Fig. 4 Transmission and phase distributions of metasurface unit structure under different incident waves

2 结果与分析

仿真结果如图5所示,显示了Janus超表面在正反入射下的输出OAM幅度分布,结果表明,正反向都实现了涡旋光的生成,且幅度较高,主模环形主瓣与背景相比具有足够的信噪比,不同方位角处的幅度起伏较小,不会掩盖相位螺旋带来的条纹特征。幅度判据采用主模环形能量与总透射能量的定性比对方式。

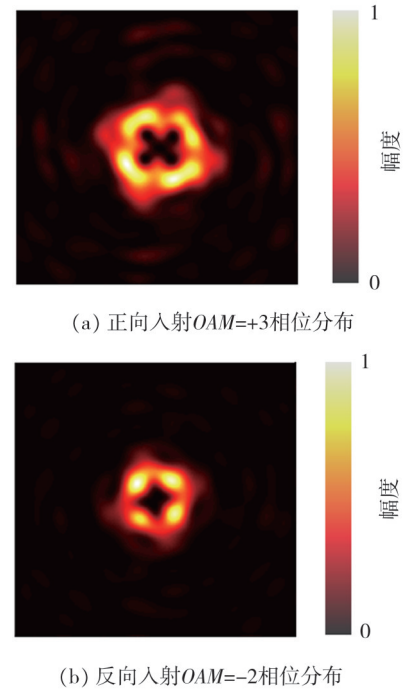


图5 正反入射下的OAM幅度分布图

Fig. 5 OAM amplitude distribution under forward and backward incidence

如图6所示,正向入射时,输出波前呈现三周期螺旋相位分布,对应 $OAM=+3$ 阶涡旋光;反向入射时,波前形成双周期反向螺旋,对应 $OAM=-2$ 。这里的“三周期”与“双周期”分别指一个完整方位角内相位变化为 $3 \times 2\pi$ 与 $2 \times 2\pi$,其在图中直观体现为相位色标环绕光轴的圈数差异。需强调的是,这种差异不仅在于螺旋方向相反,更重要的是阶数不同,这正是Janus相位叠加所导致的方向敏感。若仅是几何相位变号而传播相位呈镜像对称,往往只得到 $\pm m$ 的对称模式。本文通过传播相位和PB相位的协同设计,使得正反两方向的总相位设计目标分别独立对应 $+3$ 与 -2 两个目标值,从而在单一器件上实现入射方向和OAM阶数的双重不对称调控。

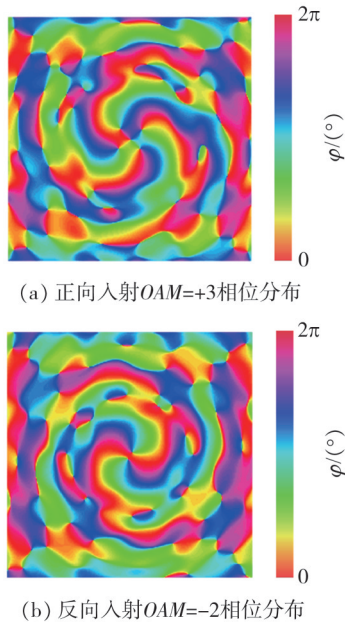


图6 正反入射下的OAM相位分布

Fig. 6 OAM phase distribution under forward and backward incidence

如图7所示,正向与反向入射条件下的聚焦仿真结果与前文设计值高度吻合,Janus超表面在正反入射下分别生成+3阶与-2阶OAM涡旋波前。为了进一步验证波前相位分布与焦点设计位置的一致性,对 x - z 截面上的场分布进行了仿真分析。结果表明,正向与反向入射情况下的聚焦位置均与理论设计焦距 $f=5$ mm基本吻合;能量峰值沿光轴分布稳定,表明结构实现的螺旋相位不仅在横向(x - y 平面)上满足目标OAM拓扑特征,在纵向传播方向上也维持了期望的聚焦特性。聚焦面内能量主要集中于两个对称的高强度区域,呈现出OAM光场中典型的双瓣干涉结构。由于正反向OAM阶数不同,能量条纹的疏密及旋向表现出轻微差异,但主峰位置保持一致。该结果进一步表明,本文设计的相位叠加策略在保证方向不对称OAM生成的同时,仍能保持良好的聚焦精度和能量收敛性。这一结果进一步验证了几何相位与传播相位协同设计的有效性,其中,几何相位决定了螺旋波前的阶数与旋向,传播相位控制焦距与波前曲率,两者共同确保正反方向聚焦点均落在理论设计位置,从而实现单层全硅结构下的方向可控OAM聚焦。

为评估所生成涡旋光束的模式纯度,对输出场进行模式分解^[30-31]。OAM纯度是指目标OAM模式的能量占有所有OAM模式能量的比例。为了计算OAM纯度,对输出光场进行了角向傅里叶

变换,并分解为不同的OAM模态。通过计算每个模式的能量占比,得到了目标OAM模式在所有模式中的能量比例。

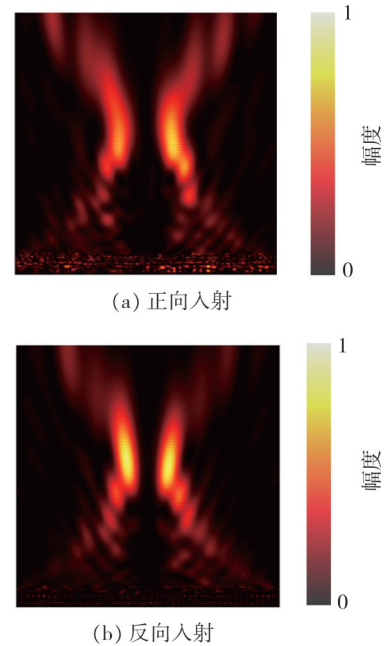


图7 正反入射下的聚焦OAM纵向焦平面分布

Fig. 7 Longitudinal focal-plane distribution of the focused OAM under forward and backward incidence

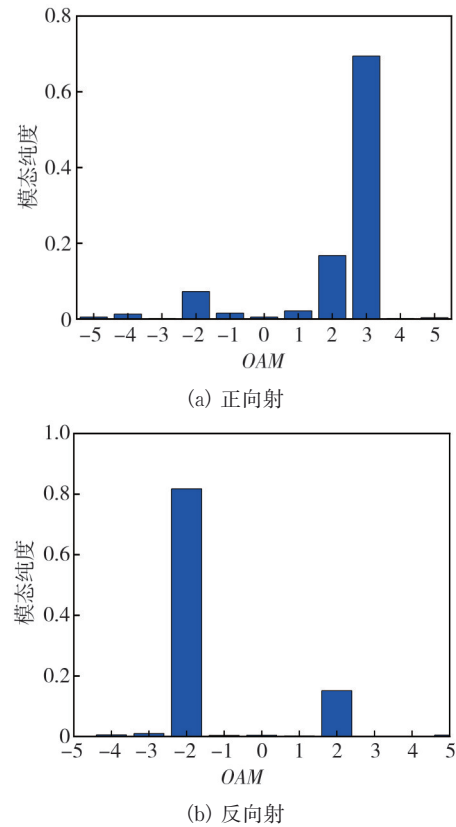


图8 正反入射下的OAM纯度分析

Fig. 8 OAM purity analysis under forward and backward incidence

计算结果如图8所示,主模能量占比达70%,其余模式纯度低于20%,表明该结构实现了高纯度、高保真度的OAM态。由于实际版图存在离散化与幅相耦合等实际因素限制,非目标阶 $m \neq m_0$ 的泄露难以完全避免;本文验证的70%主模占比已经充分证明,在8级单元采样与所选口径下,主要能量成功聚焦在目标模式中。若要进一步提升模式纯度,可以考虑增加相位采样级数、均衡各单元的透过幅度、在阵列边缘做过渡带以抑制衍射泄露等策略。

3 结 论

本文提出并仿真验证了一种基于全硅矩形柱阵列的单层Janus超表面,在0.9 THz实现了正向 $OAM=+3$ 与反向 $OAM=-2$ 的方向不对称轨道角动量态。理论分析和全波仿真结果均表明,通过几何相位与传播相位的协同设计可在单层结构中实现方向相关相位响应,无需金属或多层结构。仿真结果显示,正反入射下的波前相位分布分别形成双周期与三周期螺旋结构,且输出光场的OAM纯度超过70%。与传统金属-介质复合型结构相比,所提出的全硅Janus超表面具有低损耗、高透过率、工艺简单等优点。本研究为实现太赫兹波段高性能、方向可控的OAM调制器提供了理论基础和结构范例,在多通道通信、非对称成像和太赫兹雷达系统等领域具备良好的应用前景。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M, Spreeuw R, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45 (11): 8185-8189.
- [2] He H, Friese M, Heckenberg N, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(5): 826-829.
- [3] Macdonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures [J]. *Science*, 2002, 296 (5570): 1101-1103.
- [4] Harwit M. Photon orbital angular momentum in astrophysics [J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 597 (2): 1266-1270.
- [5] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G. Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(4): 282-286.
- [6] Zhu L, Wang A, Chen S, et al. Orbital angular momentum mode groups multiplexing transmission over 2.6-km conventional multi-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25637-25645.
- [7] Tanaka Y, Okida M, Miyamoto K, et al. High power picosecond vortex laser based on a large-mode-area fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (16): 14362.
- [8] Karimi E, Slussarenko S, Piccirillo B, et al. Polarization-controlled evolution of light transverse modes and associated Pancharatnam geometric phase in orbital angular momentum [J]. *Physical Review A*, 2010, 81 (5): 053813.
- [9] Guo C, Liu X, Ren X, et al. Optimal annular computer-generated holograms for the generation of optical vortices [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2005, 22(2): 385-390.
- [10] Liu X, Fan K, Shadrivov I V, et al. Experimental realization of a terahertz all-dielectric metasurface absorber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 191-201.
- [11] Zhang M, Ma Z, Yang M, et al. Polarization-independent multi-resonance with high Q-factor for highly sensitive terahertz sensors based on all-dielectric metasurface [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14 (4): 4845408.
- [12] Li H, Zheng C, Duan S, et al. Polarization detection of terahertz waves using all-silicon metasurfaces with tightly focusing behavior [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(12): 2300428.
- [13] Chen K, Ding G, Hu G, et al. Directional Janus metasurface [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32 (2): 1906352.
- [14] Shang G, Hu G, Guan C, et al. A non-interleaved bidirectional Janus metasurface with full-space scattering channels [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11 (16): 3729-3739.
- [15] Chen K, Feng Y. A review of recent progress on directional metasurfaces: concept, design, and application [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55

- (38): 383001.
- [16] Yang W, Chen K, Dong S, et al. Direction-duplex Janus metasurface for full-space electromagnetic wave manipulation and holography[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(22): 27380-27390.
- [17] Bao L, Zhu L, Guo X, et al. Transparent and conformal directional Janus metasurface with joint amplitude and phase modulations [J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(18): 2500340.
- [18] Hu S, Han Z, Du S, et al. Nonvolatile switchable Janus metasurface for multi-dimension encoded near- and far-field functionalization [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(16): 2419741.
- [19] Wang J, Jiang L, Kou N, et al. Realization of asymmetric near-field focusing by transmissive Janus metasurface[J]. Physics Letters A, 2025, 553: 130680.
- [20] Naveed M A, Ansari M A, Kim I, et al. Optical spin-symmetry breaking for high-efficiency directional helicity-multiplexed metaholograms[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2021, 7: 5.
- [21] Liang X, Deng L, Shan X, et al. Asymmetric hologram with a single-size nanostructured metasurface [J]. Optics Express, 2021, 29(13): 19964-19974.
- [22] Chen B, Yang S, Chen J, et al. Directional terahertz holography with thermally active Janus metasurface [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 136.
- [23] Chen K, Ding G, Hu G, et al. Directional Janus metasurface [J]. Advanced Materials, 2020, 32 (2) : 1906352.
- [24] Chong M, Zhou Y, Zhang Z, et al. Generation of polarization-multiplexed terahertz orbital angular momentum combs *via* all-silicon metasurfaces [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2024, 5(3): 1.
- [25] Li H, Li J, Zheng C, et al. Flexible terahertz phase modulation profile *via* all-silicon metasurfaces [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 167: 107616.
- [26] Lin C, Huang J, Su H, et al. Directionally asymmetric in orbital angular momentum generation using single-layer dielectric Janus metasurfaces [J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(31): 2401335.
- [27] Zheng C, Wang G, Li J, et al. All-dielectric metasurface for manipulating the superpositions of orbital angular momentum *via* spin-decoupling [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(10): 2002007.
- [28] Li J, Wang G, Yue Z, et al. Dynamic phase assembled terahertz metalens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization [J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(1): 210062.
- [29] Zhang S, Chen X, Liu K, et al. On-chip non-volatile reconfigurable THz varifocal metalens [J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(11): 2300482.
- [30] Zhu Q, Xiao X, Yu L, et al. Generation of terahertz OAM waves with six modes based on three-layer Z-shaped reflective metasurface [J]. Electronics, 2023, 12(13): 2859.
- [31] Yan N, Zhang J, Yang F, et al. High-purity OAM generator using low-profile Huygens' metasurface with stable response [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(12): 4857-4861.