

全介质超表面实现双波段正交方向光束偏折

苏新然 胡鹏涛 高若谦 葛明锋 董文飞

All-dielectric metasurface achieving opposite beam deflection at dual bands

SU Xin-ran, HU Peng-tao, GAO Ruo-qian, GE Ming-feng, DONG Wen-fei

引用本文:

苏新然, 胡鹏涛, 高若谦, 葛明锋, 董文飞. 全介质超表面实现双波段正交方向光束偏折[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0157

SU Xin-ran, HU Peng-tao, GAO Ruo-qian, GE Ming-feng, DONG Wen-fei. All-dielectric metasurface achieving opposite beam deflection at dual bands[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0157

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0157>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于太赫兹全介质超表面的独立双带连续域束缚态

Independent dual-band bound states in the continuum based on terahertz all-dielectric metasurfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1230 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0004>

高衍射效率偏振无关合束光栅的双层梯形槽形设计与分析

Design and analysis of a double-layer trapezoidal groove of polarization-independent beam-combining gratings with high diffraction efficiency

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 53 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0083>

大变倍比制冷型红外双波段变焦光学系统设计

Design of cooled infrared dual-band zoom optical system with large-magnification-ratio

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1431 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0007>

红外双波段制冷型变焦Offner型光谱成像系统设计

Design of an infrared dual-band cooled zoom focal Offner-type spectral imaging optical system

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1327 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0080>

双路偏振结构的激光多普勒测速系统

Laser Doppler velocimetry with a dual polarization structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 753 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0211>

基于非对称混合等离子体结构的双槽超紧凑偏振分束器

Double-slot ultra-compact polarization beam splitter based on asymmetric hybrid plasmonic structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1215 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0028>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

全介质超表面实现双波段正交方向光束偏折

苏新然^{1,2}, 胡鹏涛¹, 高若谦^{1,3*}, 葛明锋¹, 董文飞^{1,2}

- (1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 生物材料与干细胞研究室, 江苏 苏州 215163;
2. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 济南国科医工科技发展有限公司, 山东 济南 250001)

摘要: 光谱成像、片上通信及多功能集成光子学的快速发展, 正推动光学系统向小型化与高度集成化方向演进, 并对紧凑平台上多波段光束的独立空间调控提出了迫切需求。然而, 传统多波段调控方案通常依赖多片器件或复杂光路, 结构笨重且易产生跨波段串扰, 限制了系统的集成度与可扩展性。针对这一挑战, 本文提出了一种基于双波段双梯度相位协同构建的单层全介质超表面设计策略, 可在单层结构中实现不同波段波前调控功能的方向解耦。为验证该策略的有效性, 我们选取硅(Si)与二氧化硅(SiO₂)构建超表面, 并以 800 nm 与 1150 nm 两个波段为示例验证策略。所构建的超表面单元在各自工作波段实现完整的 0-2 π 高效相位覆盖, 通过梯度相位实现各自波段的定向偏折, 并将两类单元以旋转交错 90° 的方式排列形成复合周期结构, 使双波段相位分布在同一平面内共存且互不干扰。结果表明, 垂直入射条件下, 器件将 800 nm 波段的透射光束相对于入射法线在一个横向方向偏折约 14°, 而将 1150 nm 波段的透射光束则在与其正交的另一横向方向偏折约 24°, 从而实现空间通道的清晰分离与独立调控。同时, 器件保持偏振无关性与稳定波前控制, 验证了双波段空间正交调控性能的可靠性。该设计策略为实现高集成度、多波段且具空间正交调控能力的片上光子器件提供了一种紧凑、高效且具有普适性的技术路径, 在光谱成像、双波段通信及集成光子学系统中具有广泛的应用潜力。

关键词: 双波段光束偏折; 双梯度相位设计; 全介质超表面; 偏振无关

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0157 CSTR: 32171.14.CO.2025-0157

All-dielectric metasurface achieving opposite beam deflection at dual bands

SU Xin-ran^{1,2}, HU Peng-tao¹, GAO Ruo-qian^{1,3*}, GE Ming-feng¹, DONG Wen-fei^{1,2}

- (1. Biomaterials and Stem Cell Laboratory, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, 215163, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China;
3. Jinan Guoke Medical Technology Development Co., Ltd., Jinan, Shandong 250001, China)

* Corresponding author, E-mail: gaorq@sibet.ac.cn

Abstract: With the rapid development of spectral imaging, on-chip communication, and multifunctional in-

收稿日期: 2025-12-15; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2024YFF0618201); 山东省青年自然科学基金项目 (No. ZR2023QF136)

National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFF0618201); Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (No. ZR2023QF136)

egrated photonics, modern optical systems require multi-band beams to be independently controlled in three dimensions within compact platforms. However, conventional multi-band solutions typically rely on multiple optical components or complex folded beam paths, resulting in bulky structures and inter-band crosstalk that limit device integration and scalability. To address this challenge, we propose a dual-band dual-phase-gradient design strategy for independent wavefront control. This approach enables mutually independent phase-gradient units for different wavelengths to coexist on a single-layer metasurface, achieving spatially independent beam deflection. To validate the strategy, a Si/SiO₂ all-dielectric metasurface is designed for the 800 nm and 1150 nm bands. The meta-units provide full 0–2 π phase coverage at their respective bands. By imposing phase gradients and arranging the two types of units in a 90° rotationally interleaved configuration, a composite periodic structure is formed in which dual-band phase profiles coexist without interference. Simulations show that under normal incidence, the device deflects the 800 nm and 1150 nm transmitted beams by approximately 14° and 24° along orthogonal transverse directions, achieving clear spatial separation and independent beam manipulation. The device also exhibits polarization-insensitive and stable wavefront control, confirming the reliability of its dual-band orthogonal operation. This design strategy provides a compact, efficient, and generalizable pathway toward highly integrated multi-band on-chip photonic devices, with broad potential applications in spectral imaging, dual-band communication, and integrated photonic systems.

Key words: dual-band beam deflection; dual-gradient phase design; all-dielectric metasurface; polarization-independent

1 引言

随着超表面技术的快速发展,传统光学器件(如凸透镜和凹透镜)在集成光学系统中的局限性日益凸显^[1]。此类器件主要依赖光在介质中的传播相位积累来实现波前调控,其尺寸通常与工作波长处于同一量级,难以满足微型化和高集成度光学系统的需求。近年来,研究者逐渐转向基于结构设计的波前调控方案,摆脱了对材料本征传播特性的单一依赖。超表面的提出为电磁波的精确调控提供了全新的物理途径^[2-5]。作为由亚波长元素构成的二维人工结构,超表面能够在超薄的厚度下灵活地调节光的幅度^[6-7]、相位^[8-10]以及偏振状态^[11-13],这种复杂的光学响应依赖于精密设计的纳米结构和先进的纳米制造技术,为超小型光学器件的开发提供了理想平台^[14-17]。

近年来,基于介质超表面的各种功能性光学器件,如平面透镜、相位调制器、波片等,得到了迅速发展,推动了光束偏转^[18-19]、聚焦^[20-21]、全息成像^[22-23]等一系列应用的实现。在光学频率下,

同时兼顾高能量效率、结构简洁性与多自由度波前调控仍然是一项具有挑战性的任务,这在多波段超表面器件中尤为重要。在多种超表面器件中,光束分束器作为集成光学系统的基础模块,广泛应用于各种光子学领域^[24-26]。然而,传统的光束分束器件体积庞大、集成度较低,无法满足现代微纳光子学日益增长的对小型化和高集成度的要求。与此相比,基于超表面的超薄光束分束器件提供了全新的解决方案,推动了光子器件的小型化和芯片集成化^[27]。

目前,基于超表面的分束器研究可大致分为三种类型:第一类是偏振分束器,能够将入射光束分成两个正交的偏振分量^[28-29];第二类是功率分束器,根据预定的功率比分配光束^[30-31];第三类是波长分束器,基于多个波长带的不同角度分离入射光^[32]。传统分束器往往需要额外的光学组件来准直或耦合外部光源,这不仅容易引入对准误差,还增加了系统的复杂性。与之相比,无需外部组件的集成分束器在光子集成系统中展现出更加卓越的紧凑性和可靠性,成为现代光子集成的理想选择。为实现多通道光场调控与功能集成,已有

研究从不同物理维度探索了光束分离与复用的实现方式^[33-34]。例如, 部分研究通过结构色或谱-空信息编码实现多波长光场调制, 主要面向颜色显示或全息成像应用; 另有研究基于相位梯度, 在单一工作波长条件下实现光束在不同衍射方向上的角度分束^[35]; 也有工作借助偏振复用或双层结构, 实现多通道光束调控。这些方案在各自应用场景中具有重要价值, 但其设计目标与物理机制均不同于跨波段条件下光束传播方向的独立与解耦控制。然而这些方法往往面临着结构复杂、制造难度大和光学响应一致性差等问题, 特别是在实现多波段控制和偏振无关性方面仍存在很大挑战。

针对上述问题, 本文提出了一种基于双波段双梯度相位协同构建的全介质超表面的通用设计策略。该策略通过在两个目标波长分别构建满足线性相位梯度的超表面单元阵列, 并采用相互旋转 90° 的交错式空间排布, 使不同波段的相位调控功能在同一物理孔径、同一单层结构中实现集成与方向解耦, 从而在两个工作波段同时获得偏振无关、方向近似正交的异常偏折。与传统依赖多层堆叠、几何相位或空间分区实现多波段调控的方案不同, 即通过不同波长下相位响应的选择性差异, 使双梯度相位在共孔径条件下保持相互独立的工作状态, 从而有效抑制跨波段串扰。因此, 该方法对具体材料体系具有良好的适应性, 只要材料在目标波段具有足够的折射率对比并保持较低吸收, 即可实现类似的功能调控。在本研究中, 选用硅 (Si) 和二氧化硅 (SiO₂) 材料体系对该设计策略进行了验证。仿真结果表明, 该结构在两个工作波段内均实现了稳定、可控的波前调制, 并在共孔径条件下展现出清晰的双波段正交偏折特性。设计中的功能单元在各自工作波段内发挥主导作用, 成功避免了明显的交叉串扰, 从而提高了器件的可靠性与稳定性。本研究为实现高效、紧凑的共孔径双通道分束器件提供了一种可扩展的设计思路, 并为多功能集成光子系统的发展奠定了重要基础。

2 基本原理

光在介质中传播时, 总是沿着光程最短的路径传播, 即遵循费马原理。当平面波以入射角

θ_i 入射到由两种介质构成的光学界面时, 如果界面存在沿横向方向分布的相位不连续性, 则在界面上的任意两点之间会形成两条无限接近的传播路径。根据相位连续性条件, 这两条路径在界面处的相位差应为零, 即有:

$$[k_0 n_i \sin \theta_i dx + (d\phi + d\theta)] - (k_0 n_t \sin \theta_t dx) = 0 \quad (1)$$

整理可得广义斯涅尔定律^[36]:

$$\sin(\theta_t) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\phi}{dx} \quad (2)$$

式中, k_0 为自由空间波数, n_i 为入射介质的折射率, n_t 为透射介质的折射率, θ_i 为入射角, θ_t 为透射角, dx 为超表面单元的横向尺寸, $d\phi$ 为超表面微结构引入的几何相位, $d\theta$ 为相位修正项, λ 为工作波长。由式(2)可知: 在入射角保持不变的情况下, 调控界面处的相位梯度即可实现对光束传播方向的主动调控, 这正是广义斯涅尔定律的核心内涵。

由此可见, 构建具有可控相位梯度的光学界面是实现光束偏折的关键。超表面正是实现该目标的有效途径。本研究采用高折射率介质 (Si) 嵌入低折射率介质 (SiO₂) 的全介质超表面结构, 光波在其中传播所引入的相位累积可近似表示为:

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}(r) h \quad (3)$$

其中, $n_{eff}(r)$ 为该位置单元的有效折射率, h 为结构高度。通常在实际制备中, 为简化工艺流程, 结构高度设计为固定值, 而通过调控结构的几何尺寸 (如纳米柱的半径) 改变 $n_{eff}(r)$, 即可实现连续的相位覆盖。这种几何维度调控型方案具有设计灵活、损耗低、易于集成等优势, 非常适合实现高效率的透射式光束调控器件。

基于上述理论, 本研究利用时域有限差分法 (FDTD) 对不同结构单元的透射相位进行了系统仿真, 并获得了在垂直入射条件下的相位延迟分布。通过提取超表面界面上的相位梯度, 即可确定光束的偏转角度, 实现对波前的精准操控。当在同一界面上设计两组方向相反的线性相位梯度结构时, 即可在两个工作波段产生透射光束在横向平面内互相正交的偏折方向, 从而实现双波段、空间正交的光束分离功能。这为多波段光场调控提供了一种全新的单层超表面设计范式。

3 双波段光束偏转超表面设计

我们提出了一种基于双波段双梯度相位超表面的通用设计策略,在垂直入射的条件下,该超表面能够高效地控制两个工作波长下光束的双波段正交方向偏折。如图 1 所示,展示了该超表面在空间波前调控中的功能示意图。

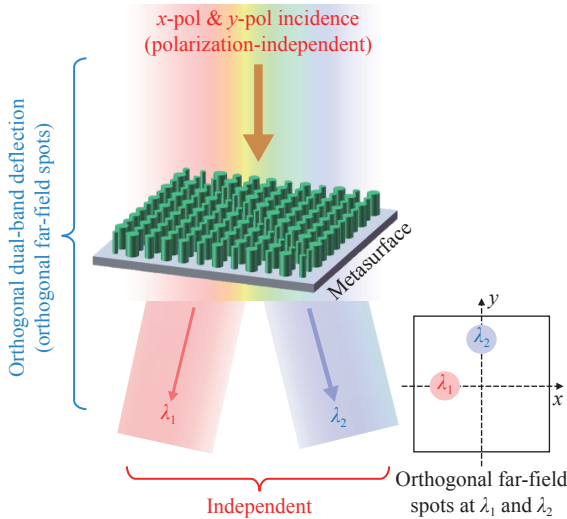


图 1 超表面的工作原理示意图。单层全介质超表面在两个工作波长 λ_1 、 λ_2 下将垂直入射光分别偏折至互相正交的空间通道,在远场形成正交分离的双波段光斑

Fig. 1 Schematic of a polarization-independent dual-band metasurface with orthogonal beam deflection. Under normal incidence, the single-layer all-dielectric metasurface redirects the two operating wavelengths λ_1 and λ_2 into mutually orthogonal spatial channels, yielding orthogonally separated far-field spots

该结构在材料选择、几何参数和仿真设置方面进行了系统优化,以满足高透过率、宽相位覆盖范围和低损耗的要求。单晶硅具有超过 3.5 的折射率,并且在近红外波段具有极低的光学损耗,是构建高效超表面的理想材料。因此,我们选择了中心对称的硅圆柱作为超原子单元。每个硅圆柱可以视为一个偏振无关的截断波导结构,能够精确地在亚波长尺度上调节入射光的波前。

3.1 超表面单元的结构优化设计

设计的超表面由周期为 $P=500$ nm 的单晶硅纳米柱阵列构成,纳米柱高度 H 固定为 800 nm,半径在 50 nm 至 150 nm 范围内连续变化,以便全面分析不同几何参数对光学响应的影响。硅纳米

柱被构建 SiO_2 的基底上,基底的折射率为 1.46。该基底不仅提供了优异的光学透明性,还由于其红外振动模态,可有效调控与纳米柱的耦合作用,从而优化结构的谐振响应。所设计硅纳米柱的高度与最小半径纵横比约为 16,该尺寸范围可通过成熟的电子束曝光与干法刻蚀工艺实现^[37]。超表面单元的详细结构如图 2 所示。

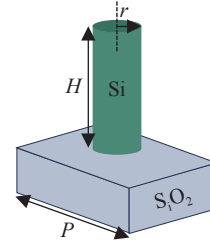


图 2 超表面单元结构图。硅纳米柱周期性排布在二氧化硅基底上,横向周期 $P=500$ nm,柱高 $H=800$ nm,半径 $r=50-150$ nm

Fig. 2 Schematic of the metasurface unit. Silicon nanopillars are periodically arranged on a silica substrate, with a lateral period $P=500$ nm, pillar height $H=800$ nm, and radius $r=50-150$ nm

我们采用 FDTD 方法对设计的超表面结构进行了建模与仿真。为了保持结构的二维周期性, x 和 y 方向上施加了周期性边界条件,而在 z 方向上则采用完美匹配层 (PML) 吸收透射波,消除边界反射,如图 3 所示。平面波在 800 nm 和 1150 nm 波长下从超表面单元的硅侧入射,监测器设置在 SiO_2 基底侧,用于收集透射场。

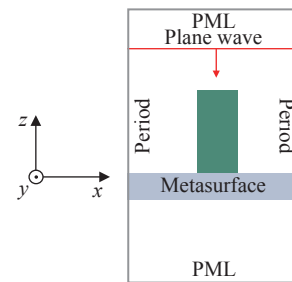


图 3 FDTD 数值仿真模型示意图

Fig. 3 Schematic of the FDTD simulation setup

通过改变硅纳米柱半径并保持其他参数不变,我们研究了透射率和输出相位随纳米柱半径的变化规律。图 4 展示了在平面波照射下,800 nm 和 1150 nm 两个波长下透射相位随硅圆柱半径变化的情况。通过对两个波段进行逐一扫描,在 50 nm 至 150 nm 的圆柱半径范围内,设计结构在

两波长下均可实现完整的 $0-2\pi$ 相位覆盖, 由于传播相位对波长及有效折射率色散的固有依赖性, 相同几何参数的硅纳米柱在不同波长下对应不同的相位响应。这种波长依赖的相位差异为双波段功能的独立调控提供了物理基础。

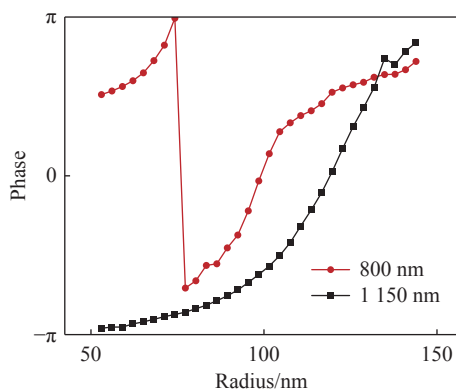


图 4 相位随纳米柱半径变化的关系曲线

Fig. 4 Phase shift as a function of nanopillar radius

图 5 展示了平面波照射下, 硅圆柱半径变化对透射率和反射率的影响。图中, 800 nm 和 1150 nm 波长下的透射率分别用橙色和红色曲线表示, 而反射率则分别用蓝色和绿色曲线表示。如图所示, 当硅圆柱半径小于 140 nm 时, 两个波段的透射率均保持较高水平, 超过 70%; 但随着半径的进一步增大, 反射率迅速上升, 导致透射率显著下降。因此, 为确保较高的透射率, 选择的圆柱半径不应过大。

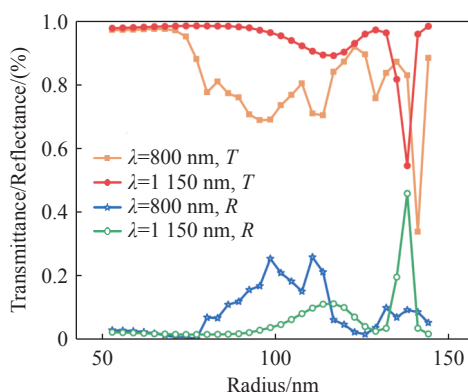


图 5 透射率和反射率随圆柱半径变化的关系曲线

Fig. 5 Transmission and reflection spectra as functions of the nanopillar radius

3.2 双波段线性相位单元的相位与透射特性分析

为了实现高透射效率与完整的相位调控, 我们为每个工作波长分别选择了一组具有代表性的硅纳米柱半径, 并基于这些半径构建了梯度超表

面单元。800 nm 波长下, 透射相位与透射率随纳米柱半径的变化关系如图 6 所示。所选半径覆盖近似 2π 的相位范围, 保证了线性相位梯度, 同时保持高透射效率。插图显示了对应的梯度超表面结构示意图, 所示柱半径从左到右依次为 75、78.6、83.6、121.2、149.7 nm, 其余结构参数保持不变。基于这些半径构建的超表面在 800 nm 处的 $x-z$ 平面透射相位分布如图 7 所示, 透射区域内的等相位面呈现出规则且连续的倾斜分布。

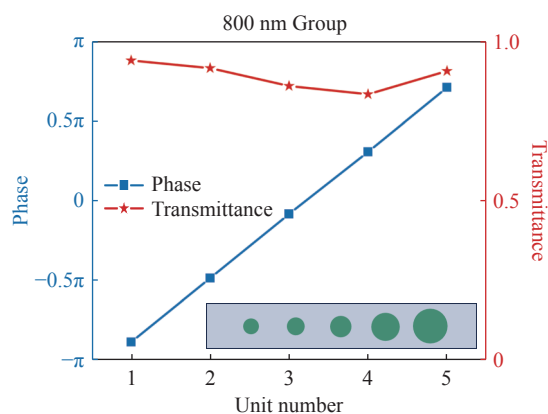


图 6 800 nm 波长下透射相位与透射率随纳米柱半径的变化。插图为结构示意图所示柱半径从左到右依次为 75、78.6、83.6、121.2、149.7 nm

Fig. 6 Simulated transmission phase and efficiency as a function of nanopillar radius at 800 nm. The inset shows the unit-cell structure with radii of 75, 78.6, 83.6, 121.2, and 149.7 nm from left to right

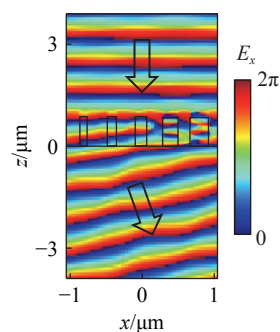


图 7 800 nm 波长下超表面 $x-z$ 平面透射相位分布

Fig. 7 $x-z$ plane transmitted phase of the metasurface at 800 nm

同样地, 图 8 表示了 1150 nm 波长下, 透射相位与透射率随纳米柱半径的变化, 所选半径实现了完整 2π 相位覆盖并保持高透射效率。对应的插图展示了梯度超表面结构示意图所示柱半径从左到右依次为 62、101.8、115.2、124.5、132.6、140 nm, 其余结构参数保持不变。图 9 显示

了 1150 nm 下的 x - z 平面透射相位分布, 表明所设计单元能够在第二工作波长下实现精确的空间相位调控。

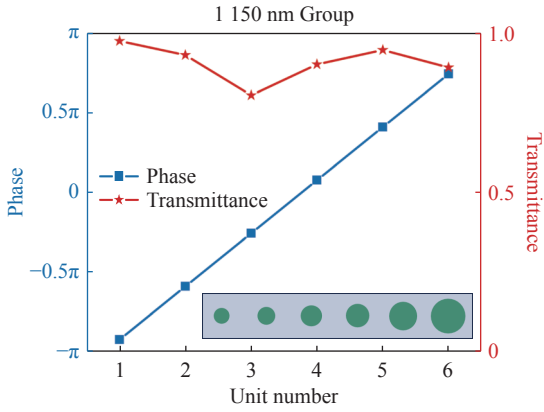


图 8 1150 nm 波长下透射相位与透射率随纳米柱半径的变化。插图为单位结构示意图所示柱半径从左到右依次为 62、101.8、115.2、124.5、132.6、140 nm

Fig. 8 Simulated transmission phase and efficiency as a function of nanopillar radius at 1150 nm. The inset shows the unit-cell structure with radii of 62, 101.8, 115.2, 124.5, 132.6 and 140 nm from left to right

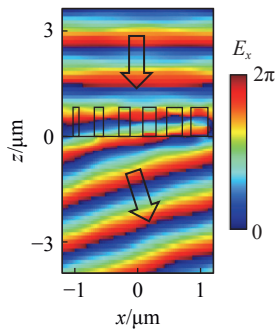


图 9 1150 nm 波长下超表面 x - z 平面透射相位分布

Fig. 9 x - z plane transmitted phase of the metasurface at 1150 nm

通过建立纳米柱半径与透射相位的映射关系, 本设计实现了透射效率与相位调控能力的同步优化, 不仅保证了在 800 nm 和 1150 nm 的优异光学性能, 也为后续多波段超表面功能结构的设计与实现提供了可靠的理论依据和设计方法。

为进一步定量评估交错式排布结构中不同波段之间的相互干扰, 我们分别以对方工作波段作为入射条件, 测试各相位梯度单元的透射相位响应, 如图 10 所示。可以看到, 对于 800 nm 组, 在 1150 nm 入射条件下, 其各单元透射相位变化趋于平稳, 整体分布较为集中, 未呈现明显的线性相位梯度特征; 同样地, 对于 1150 nm 组, 在 800 nm

入射条件下, 其相位变化亦相对平缓。上述结果表明, 在非目标波段入射时, 对应单元组主要提供近似均一的相位背景, 对目标波段相位梯度的扰动有限, 从而有利于实现双波段相位调控功能的共存与解耦。

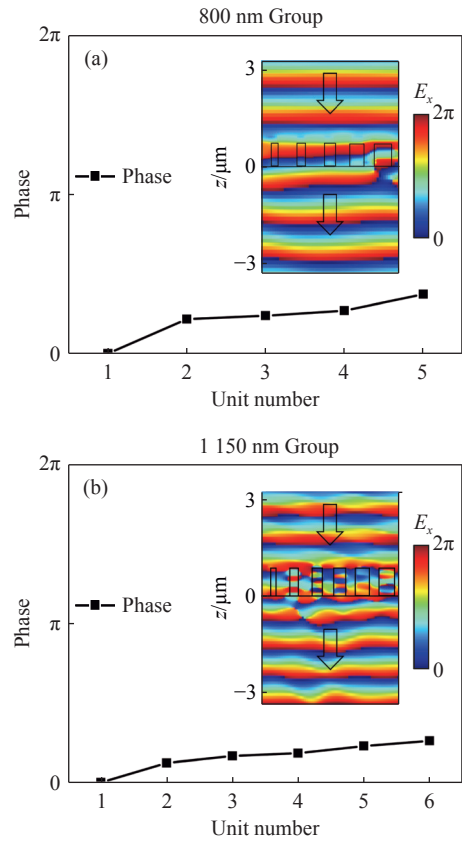


图 10 超表面单元在非目标波段入射条件下的相位响应分析。(a) 1150 nm 入射条件下 800 nm 组的各单元相位变化与相位分布; (b) 800 nm 入射条件下 1150 nm 组的各单元相位变化与相位分布

Fig. 10 Phase response analysis of metasurface elements under. (a) Phase changes and phase distribution of each element in the 800 nm group under an incident light condition of 1150 nm. (b) Phase changes and phase distribution of each element in the 1150 nm group under an 800 nm incident condition non-target wavelength incident conditions

3.3 交错式双波段超表面集成结构设计

为进一步提高器件的集成度, 并系统验证多波段超表面在紧凑构型下的波长独立性, 本研究提出了一种 90° 交错式空间复用的相位梯度排布策略。如图 11 所示, 针对 800 nm 和 1150 nm 两个工作波长分别设计的相位梯度超原子在同一孔径内以 90° 交错方式有序排布, 从而构建出紧凑型多波段集成超表面。针对 800 nm 波段设计

的相位梯度单元沿一个方向周期性排列, 而针对 1150 nm 波段设计的单元沿与其正交的方向周期性排列, 两类单元在空间上交错穿插并周期重复形成整片器件。

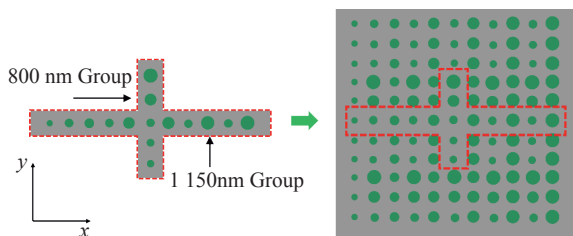


图 11 旋转 90°交错排列相位梯度超原子示意图

Fig. 11 Schematic diagram of a 90°rotated staggered phase gradient superatom

与传统将不同波段功能区简单划分为空间隔离区域的设计思路相比, 旋转 90°交错式排布在显著压缩器件占空面积的同时, 仍能保持对各工作波长的高效、独立相位调控能力, 使单一器件即可在共孔径下实现双波段功能复用与方向性分束。从数值仿真结果图 12 我们可以看到, 交错式排布并不会显著降低各工作波段的偏折效率。

在 800 nm 入射条件下, 针对 800 nm 设计的相位梯度单元在 $x-z$ 截面内提供主要的线性相位梯度, 而针对 1150 nm 设计的单元则在该波长下表现为近似均匀的相位与高透射背景, 所以其等相位面呈现出规则倾斜分布, 对应约 14°的异常偏折方向, 如图 12(a) 所示。

需要指出的是, 在 800 nm 入射条件下(图 12(a)), 透射相位分布中局部区域出现轻微的不连续特征。该现象一方面源于交错排布结构中非目标波段相位梯度单元在该波长下的相位响应特性。由于该类单元并非针对 800 nm 波段设计用于提供线性相位梯度, 其相位响应在空间上表现为近似均匀的背景, 并在局部区域与目标相位分布产生叠加效应。

此外, 由于器件在异常偏折条件下工作, 透射光的主传播方向相对于 $+z$ 轴发生倾斜, 而相位分布是在固定的 $x-z$ 平面内提取得到, 因此在非主传播通道区域中可能出现弱场或高阶衍射分量上的相位不连续。

尽管存在上述局部相位起伏, 从整体趋势来看, 超表面在目标波段下仍保持清晰、连续的线性相位梯度, 其主导相位贡献来自针对 800 nm 设

计的相位梯度单元。因此, 该局部不连续现象并未改变整体相位梯度的方向与幅值, 也未破坏整体波前调控机制, 从而保证了目标工作波段下异常偏折行为的稳定性。

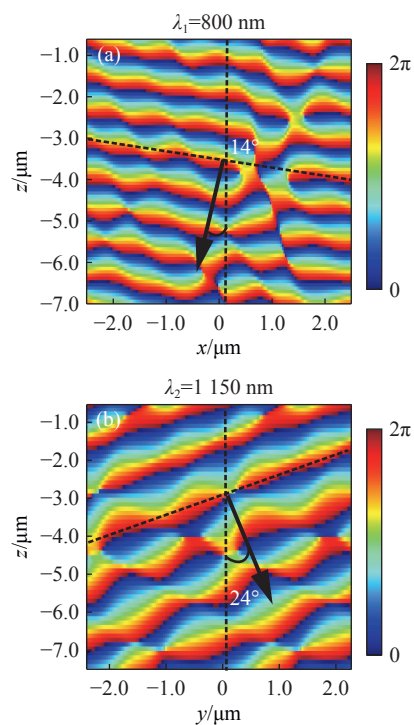


图 12 双波段正交透射偏折相位分布的数值仿真结果。其中虚线表示等相位面, 箭头表示光的传播方向。(a) 入射波长 800 nm 时 $x-z$ 面的透射相位分布; (b) 入射波长 1150 nm 时 $y-z$ 面的透射相位分布。

Fig. 12 Numerical simulations of dual-band orthogonal transmitted phase distributions. where the dashed lines represent the equi-phase surfaces and the arrows indicate the light propagation direction. (a) Phase distribution at the incident wavelength of 800 nm in the $x-z$ plane; (b) Phase distribution at the incident wavelength of 1150 nm in the $y-z$ plane

在 1150 nm 入射条件下, 情况则呈现出相互对应的特征。此时, 针对 1150 nm 设计的相位梯度单元在 $y-z$ 截面内提供主导的线性相位梯度, 其等相位面倾斜方向对应约 24°的异常偏折, 如图 12(b) 所示; 而针对 800 nm 的单元在该波长下同样表现为近似均匀的相位响应, 对整体相位分布的影响较弱。由此可见, 交错式排布并未破坏各工作波段下的相位梯度构建, 反而在单层结构中实现了双波段相位调控功能的有效解耦。

同时, 我们对整片器件的透射性能进行了统

计分析。结果表明,在 800 nm 入射条件下,器件的整体透过率约为 64%,而在 1150 nm 入射条件下,整体透过率约为 72.4%,说明交错式双波段结构在两个工作波段内均保持了较为稳定的透射特性,且未引入显著的额外透射损耗。

3.4 双波段正交光束偏折超表面的远场分析

为了全面评估所提出双波段正交光束偏折超表面的偏折能力,对其在 800 nm 和 1150 nm 两个工作波段的远场散射分布进行了数值仿真分析。仿真采用 FDTD,在结构下方设置监测面以提取远场分布,并对不同波长入射时的能量分布和主要偏折方向进行系统研究。

在单独工作条件下,两类功能单元分别在其目标波段内产生线性相位梯度,从实现对应方向上的单向异常偏折。进一步将两类单元以互穿方式构建复合周期结构后,两套相位梯度在空间上同时存在,并在各自波段内保持独立工作。远场仿真结果图 13 清晰展示了这一互补特性:

在 800 nm 入射时,超表面产生在 $-x$ 方向的单一主瓣偏折,并在二维角度分布中呈现出强烈的能量集中 (图 13(a));而在 1150 nm 入射时,主瓣则偏折至 $+y$ 方向 (图 13 (b)) 其偏折方向在横向平面内与 800 nm 波段相互正交,实现了清晰的角度分离与空间通道的独立调控。值得强调的是,这种近 90° 的方向差异并非源自结构设计中的额外耦合机制,而是由交错式复合周期结构中两类单元在不同波段下的独立相位响应所自然形成。换言之,超表面对双波段的调控在相位层面保持独立性,其在远场中则体现为两束透射光在空间角度上的正交分离,从而实现典型的双波段正交双向异常偏折。

在垂直入射条件下,器件在远场形成清晰的异常偏折主瓣;相应地,在保持光源与探测系统条件不变的情况下移除器件,透射光仅沿法线方向传播,形成直照光斑且不产生偏折分量。因此,为了验证器件的分束效率,我们采用角度积分的方法,将偏折的强度与空光路直照条件下获得的强度进行对比,偏折通道的强度通过对偏折主瓣在不同角度积分半宽 $\Delta\theta$ 内的累积强度获得,并与空光路直照条件下在相同角度范围内得到的参考强度进行比值处理,随后对结果进行归一化,从而得到相对分束效率曲线。

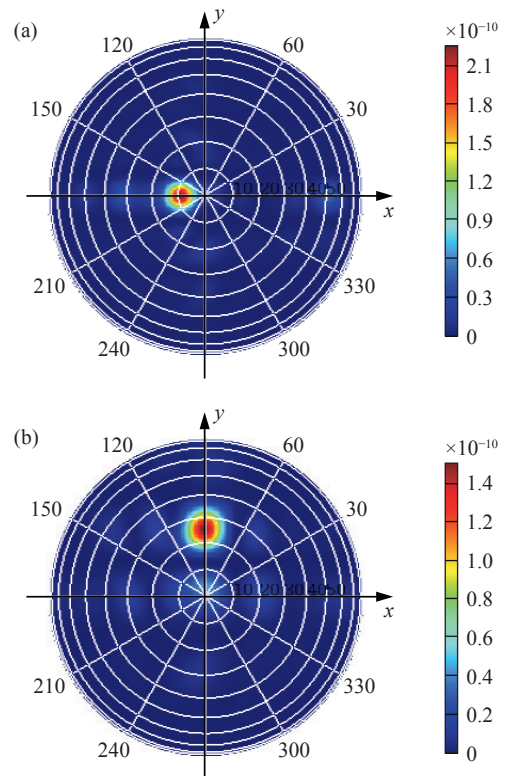


图 13 超表面阵列在双波段条件下的透射远场强度分布。(a) 800 nm 工作波长下的透射远场强度分布图; (b) 1150 nm 工作波长下的透射远场强度分布图

Fig. 13 Dual-band far-field transmitted intensity distributions of the metasurface array. (a) Far-field intensity pattern at 800 nm wavelength; (b) Far-field intensity pattern at 1150 nm wavelength

如图 14,随着角度积分半宽 $\Delta\theta$ 的增大,效率曲线逐渐上升并趋于饱和,表明偏折能量主要集中于有限的角度范围内。进一步比较不同波段可以发现,800 nm 波段在较小 $\Delta\theta$ 范围内即可获得较高的相对分束效率,说明其偏折主瓣角向能量分布更为集中;而 1150 nm 波段需要更大的积分角度范围才能达到饱和,表明其偏折光束在角度空间中的分布相对更宽。两条效率曲线在整体变化趋势上的一致性表明,尽管两个工作波段的偏折方向彼此正交,所设计的超表面在两个波段下均能够实现稳定且有效的分束行为。

综上,该双波段全介质超表面在两个工作波长下实现了稳定且可控的方向性波前调控,并通过交错式单层布局实现了紧凑的多波段功能集成。更重要的是,两个波段在远场中产生了近似正交的异常偏折方向,实现了空间通道之间的有效分离与独立调控。该设计在结构紧凑性、双波

段相位调控的独立性与稳定性以及正交通道的高效分束能力等方面均展现出优异表现, 为多功能集成光子芯片、双波段空间调控器件及未来正交光场操控平台的实现提供了可行且具有拓展潜力的技术路径。

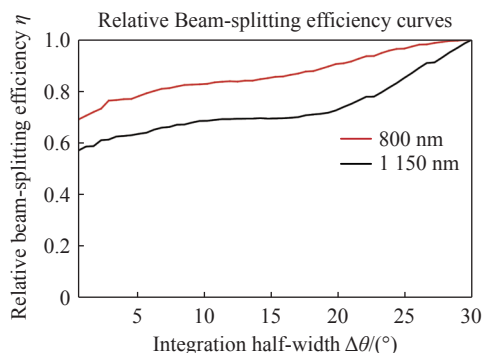


图 14 相对分束效率曲线

Fig. 14 Relative beam-splitting efficiency curves

4 结 论

本文提出了一种基于双波段双梯度相位协同

构建的全介质超表面设计策略, 能够在单层平台上同时实现 800 nm 和 1150 nm 近红外波段互相正交方向的双向光束偏转。该结构具有良好的偏振无关性和精确的平面角度控制能力。模拟结果表明其在两个工作波段均能实现稳定且清晰的方向性光束调控: 相对于入射法线方向, 在 800 nm 入射时, 出射主瓣向 $-x$ 方向偏折约 14° , 而在 1150 nm 入射时, 主瓣则向 $+y$ 方向偏折约 24° 。两工作波段在远场横向平面内形成近似正交的偏折方向, 实现空间通道的有效分离与独立调控, 验证了其稳健的双波段正交工作能力。

所提出的超表面设计策略将双波段正交偏折与双向控制集成于单层结构中, 实现了对多个光谱通道的独立调控而不会产生串扰。其紧凑的设计在最大化结构集成度的同时, 保持了高效率 and 相位调控精度。这些特性使该超表面在片上光路由、多通道光谱调控以及波分复用等领域具有重要应用潜力, 为先进的集成光子系统提供了一个多功能平台。

参考文献:

- [1] MA J Y, REN J L, ZHANG J H, *et al.*. Quantum imaging using spatially entangled photon pairs from a nonlinear metasurface[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 2.
- [2] LI ZH D, ZHAI W, LI X W, *et al.*. Additively manufactured dual-functional metamaterials with customisable mechanical and sound-absorbing properties[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(4): 864-880.
- [3] PARK J, JEONG B G, KIM S I, *et al.*. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional LiDAR applications[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(1): 69-76.
- [4] IYER P P, DECRESCENT R A, MOHTASHAMI Y, *et al.*. Unidirectional luminescence from InGaN/GaN quantum-well metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(9): 543-548.
- [5] WANG H, WANG ZH G, GONG CH, *et al.*. Using light to image millimeter wave based on stacked meta-MEMS chip[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 59.
- [6] YIN Y Y, JIANG Q, WANG H B, *et al.*. Color holographic display based on complex - amplitude metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(1): 2400884.
- [7] HE G L, ZHENG Y Q, ZHOU CH D, *et al.*. Multiplexed manipulation of orbital angular momentum and wavelength in metasurfaces based on arbitrary complex-amplitude control[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 98.
- [8] FANG X Y, REN H R, GU M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 102-108.
- [9] HU Y Q, LI L, WANG Y J, *et al.*. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(2): 994-1002.
- [10] PRISCILLA N, SULEJMAN S B, ROBERTS A, *et al.*. New avenues for phase imaging: optical metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(8): 2843-2859.
- [11] TENG SH Y, ZHANG Q, WANG H, *et al.*. Conversion between polarization states based on a metasurface[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(3): 246-250.
- [12] SONG Q H, BARONI A, SAWANT R, *et al.*. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase

- metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2651.
- [13] LENG B R, ZHANG Y, TSAI D P, *et al.*. Meta-device: advanced manufacturing[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(1): 5.
- [14] XU M J, YAN D X, WANG Y, *et al.*. Graphene-assisted dual-frequency third harmonic generation in nonlinear metamaterials for high-efficiency on-chip terahertz integration[J]. *Frontiers of Physics*, 2026, 21(4): 044201.
- [15] ZHAO C C, YAN D X, LI X J, *et al.*. A single dual-frequency reflective metasurface for simultaneous multi-mode orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2025, 575: 131313.
- [16] CAO Y J, WU CH J, LI X J, *et al.*. A deep learning-surrogate optimization strategy for the design of two-dimensional terahertz metamaterial absorbers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2026, 153: 106350.
- [17] 谢阅, 田仲韬, 郑宝荣, 等. 超表面光波导: 增强现实光学技术新范式[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(11): 1606-1614.
XIE Y, TIAN ZH T, ZHENG B R, *et al.*. Metasurface waveguides: a new paradigm for augmented reality optical technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(11): 1606-1614. (in Chinese).
- [18] MARTINI E, MACI S. Theory, analysis, and design of metasurfaces for smart radio environments[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(9): 1227-1243.
- [19] JIANG L, FANG B, YAN ZH G, *et al.*. Bandwidth-enhanced carpet cloak by using a phase-gradient metasurface with a multilayer unit cell in terahertz range[J]. *Optics Communications*, 2020, 471: 125827.
- [20] 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.
- [21] ARBABI A, ARBABI E, KAMALI S M, *et al.*. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 13682.
- [22] KIM I, JANG J, KIM G, *et al.*. Pixelated bifunctional metasurface-driven dynamic vectorial holographic color prints for photonic security platform[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3614.
- [23] GEORGI P, WEI Q SH, SAIN B, *et al.*. Optical secret sharing with cascaded metasurface holography[J]. *Science Advances*, 2021, 7(16): eabf9718.
- [24] LIU SH, VABISHCHEVICH P P, VASKIN A, *et al.*. An all-dielectric metasurface as a broadband optical frequency mixer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2507.
- [25] DUN X, IKOMA H, WETZSTEIN G, *et al.*. Learned rotationally symmetric diffractive achromat for full-spectrum computational imaging[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 913-922.
- [26] YESILKOY F, ARVELO E R, JAHANI Y, *et al.*. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(6): 390-396.
- [27] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [28] KHORASANINEJAD M, CROZIER K B. Silicon nanofin grating as a miniature chirality-distinguishing beam-splitter[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5386.
- [29] LI J, LIU CH, WU T SH, *et al.*. Efficient polarization beam splitter based on all-dielectric metasurface in visible region[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 34.
- [30] HE Q, SHEN ZH. Polarization-insensitive beam splitter with variable split angles and ratios based on phase gradient metasurfaces[J]. *Nanomaterials*, 2021, 12(1): 113.
- [31] CHEN X Y, ZOU H J, SU M Y, *et al.*. All-dielectric metasurface-based beam splitter with arbitrary splitting ratio[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(5): 1137.
- [32] LI ZH Y, PALACIOS E, BUTUN S, *et al.*. Ultra-wide angle, directional spectrum splitting with visible-frequency versatile metasurfaces[C]. *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, IEEE, 2016: 388-389.
- [33] WANG CH, LIU S Q, SUN Y, *et al.*. Tunable beam splitter using bilayer geometric metasurfaces in the visible spectrum[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28672-28685.
- [34] DORRAH A H, PARK J S, PALMIERI A, *et al.*. Free-standing bilayer metasurfaces in the visible[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 3126.
- [35] ZHANG D, REN M X, WU W, *et al.*. Nanoscale beam splitters based on gradient metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 267-270.
- [36] 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.

- [37] ANTONOV P V, ZUIDDAM M R, FRENKEN J W. Fabrication of high-aspect ratio silicon nanopillars for tribological experiments[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(4): 044506.

作者简介:



高若谦(1993—), 男, 吉林长春人, 博士, 2020 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事高光谱、成像光学等方面研究。E-mail: gaorq@sibet.ac.cn