

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250305.

专题:纪念创刊50周年

房俊锋,高鹏,陈聪,等. 基于相变材料的多焦点自旋解耦超透镜[J]. 光通信研究, 2025(6): 250305.

Fang J F, Gao P, Chen C, et al. Multifocal Spin-Decoupling Metalens based on Phase-Change Material [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250305.

基于相变材料的多焦点自旋解耦超透镜

房俊锋,高鹏,陈聪,戴耀威,崔鸿忠,黄涛,冯星宇,刘海

(中国矿业大学 信息与控制工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:【目的】偏振光自旋解耦在手性分子检测、偏振全息成像与偏振复用通信等领域具有重要应用前景。文章提出了两种基于相变材料 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST)、工作波长为 $4.7\ \mu\text{m}$ 的中红外 (MIR) 多焦点超透镜。利用 GSST 材料在相变前后光学常数的显著差异,实现了入射圆偏振光中相反旋性圆偏振光分离与多焦点动态聚焦。【方法】文章设计主要采用传播相位与几何相位相结合的方式,完成了多焦点自旋解耦超透镜表面相位分布设计。通过在单元库中选取 8 阶等效半波片微结构以覆盖 $0\sim 2\pi$ 相位,并将其排列在 CaF_2 基底上形成超透镜阵列。【结果】首先设计了基于 GSST 材料的双焦点超透镜,其可以将入射圆偏振光转化为旋性相反的圆偏振光,并聚焦在沿透镜轴向的左旋圆偏振 (LCP) 与右旋圆偏振 (RCP) 双焦点位置;通过外部激励调控 GSST 的结晶水平,可实现聚焦强度的连续可调。在此基础上,进一步构建了可实现多焦点独立调控的 4 焦点超透镜结构,以扩展聚焦功能的灵活性。其被设计成一种同心双环的结构,内、外双环的相位分布各对应两个焦点,因此独特的双环结构可将圆偏振光聚焦于 4 个不同焦点。通过联合调控入射光的偏振态以及同心双环结构中微单元 GSST 的结晶状态,可实现 4 焦点不同位置间的动态聚焦。【结论】目前基于相变材料的超透镜研究多集中于双焦点和光开关设计,主要关注焦距切换和波前重构等方向。而在多焦点动态聚焦与偏振自旋解耦的联合调控方面仍缺乏系统性研究。上述两类超透镜均实现了可调谐的自旋解耦并聚焦圆偏振光功能,在三维显微层析成像、手性分子检测以及通信系统的偏振光复用等领域具有较强的潜在应用价值。

关键词:超透镜;自旋解耦;相变材料;多焦点;偏振成像

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Multifocal Spin-Decoupling Metalens based on Phase-Change Material

FANG Junfeng, GAO Peng, CHEN Cong, DAI Yaowei, CUI Hongzhong, HUANG Tao, FENG Xingyu, LIU Hai

(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: 【Objective】 Polarization spin decoupling holds broad application prospects in polarization-sensitive fields such as chiral molecule detection, polarization holographic imaging, and multiplexed optical communication. In this work, we propose two types of Mid-Infrared (MIR) multifocal metalenses operating at a wavelength of $4.7\ \mu\text{m}$, based on the phase-change material $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST). By exploiting the pronounced contrast in optical constants between the amorphous and crystalline states of GSST, the designs enable separation of incident circularly polarized light with opposite handedness and dynamic multifocal focusing. 【Methods】 The phase distribution of the multifocal spin-decoupled metalenses is achieved through a combination of propagation and geometric phases. A library of microstructures with equivalent half-wave plate functionality is constructed to cover a continuous $0\sim 2\pi$ phase range, from which eight discrete phase levels are selected. These microstructures are then arranged on a CaF_2 substrate to form the metasurface array. 【Results】 The first design is a bifocal metalens that converts incident circular polarization light into the opposite helicity and focuses it at two axial focal points corresponding to Left-handed Circular Polarization (LCP) and Right-handed Circular Polarization (RCP). By externally tuning the crystallization level of GSST, the focal intensity at these positions can be continuously adjusted. On this basis, a four-focal metalens structure capable of independent multi-focal point control was further constructed to expand the flexibility of the focusing function. It is designed as a concentric double-ring structure, with the phase distribution of the inner and outer double rings each corresponding to two focal points. This unique double-ring structure can focus circularly polarized light at four different focal points. By jointly controlling the polarization state of the incident light and the crystallization state of the micro-unit GSST in the concentric double-ring structure, dynamic focusing among the four focal points can be achieved. 【Conclusion】 Currently, research on metalenses based on phase-change materials focuses on the design of bifocal and optical switch functions, with a primary focus on focal length switching and wavefront reconstruction. However, systematic research on the combined control of multi-focus dynamic focusing and polarization spin decoupling is still lacking. Both of these metalenses achieve tunable spin decoupling and focus circularly polarized light, offering promising applications in three-dimensional microtomography, chiral molecule detection, and polarization multiplexing in communication systems.

Key words: metalens; spin-decoupling; phase-change material; multi-focal; polarization imaging

收稿日期:2025-09-15; 修回日期:2025-10-20; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874301);中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2025-00022)

作者简介:房俊锋(2001-),男,山东济宁人。硕士,主要研究方向为可调谐超透镜。

通信作者:刘海,教授。E-mail: lhai_hust@hotmail.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

由亚波长单元组成的超表面结构,因其表现出卓越的操纵电磁波振幅、相位以及偏振的能力逐渐衍生出许多新的应用^[1-5],超透镜就是一个典型代表。与传统透镜相比,超透镜的超小尺寸结合精确调控出射光的振幅与相位的设计优势大大增加了光学设计的自由度^[6-7]。自然界中,光的自旋轨道耦合现象在光与物质相互作用中几乎无处不在,利用人工设计的亚波长结构可以实现显著和高效的光子自旋霍尔效应(Photon-Spin-Hall-Effect, PSHE),使左、右旋在动量空间完全分离^[8-10]。

可重构超表面因可以动态改变超表面的光学功能,目前已成为一个深入研究的领域^[11-15]。Ge₂Sb₂Se₄Te₁(GSST)作为一种热相变材料,通过在晶格中掺杂一定浓度的Se,改善了锗-锑-碲合金(GST)材料在中红外(Mid-Infrared, MIR)波长范围下材料由于虚部过高导致能量损耗较大、透射率低下弊端^[16]。Zhang等人^[17]通过施加一定振幅和持续时间的热激励实现了GSST非晶态与晶态之间的可逆切换;Pan等人^[18]设计了一种基于GSST的可重构全介质超表面,通过设计相位分布实现了GSST相变前后双焦点转换,但未涉及多焦点以及自旋解耦成像等更复杂功能;Tan等人^[19]提出了基于GSST的反射式可变焦金属透镜,实现了多点聚焦思路,但以反射结构与区域性二值切换为主。与以往设计相比,本文设计的多焦点自旋解耦超透镜在结构创新与功能集成方面具有显著差异。首先,本文提出的内/外双环区域化布局可实现器件内独立相变调控,从而在同一器件上实现了透射4焦点的独立开关与切换,这在现有研究中尚未见报道;其次,通过在单元结构外首次引入高熔点CaF₂包覆层,有效抑制了相变过程中的热形变问题,显著提升了器件的热稳定性与长期可行性;再次,利用GSST结晶程度的连续可调特性,本文实现了聚焦强度的连续调节,而非仅限于二值开关模式;最后,本文将圆偏振光的自旋解耦与多焦点聚焦功能结合,展示了更高维度的光场调控能力,为MIR偏振成像与通信偏振复用提供了新的实现方案。

1 理论分析与结构设计

超透镜的相位调控原理主要包括传播相位和几何相位两大类,本文通过研究传播相位与几何相位的机理提出了设计方案。在微纳光学中,高度(H)

与波长(λ)相当的纳米柱可被视为截断波导^[20],通过光在具有较高纵深比微结构中的传播来实现传播相位累积。几何相位(又称为Pancharatnam-Berry(PB)相位)^[21],可通过旋转各向异性微单元角度来控制相位。几何与传播相位这两种独立的相位调控方式为圆极化波自旋解耦提供了两个独立的自由度。如果引入的单元结构可等效为半波片,就可以消除透射光中的共极化分量,仅保留交叉极化分量,传输矩阵 T^{tr} 可表示为

$$T^{\text{tr}} = \begin{bmatrix} 0 & Ae^{i(\varphi_s - 2\alpha)} \\ Ae^{i(\varphi_s + 2\alpha)} & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:上标l和r分别为偏振光中的左旋圆偏振(Left-handed Circular Polarization, LCP)光和右旋圆偏振(Right-handed Circular Polarization, RCP)光,LCP光为入射圆偏振态,RCP光为透射圆偏振态; A 为极化转化效率; i 为虚数单位; φ_u 为传播相位, α 为几何相位,相移由 φ_u 和 α 共同决定。根据几何相位调控机理,将单元旋转 $0 \sim 180^\circ$ 就可实现 $0 \sim 2\pi$ 的几何相位分布。传播相位由单元的尺寸决定,因此需设计一组不同尺寸的单元,涉及周期和长宽高等结构参数。对目标波前的相位延迟,本文设定RCP转LCP的目标相位为 $\varphi_{\text{rl}}(x, y)$,LCP转RCP的目标相位为 $\varphi_{\text{lr}}(x, y)$ 。由式(1)可推导出各点的传播相位与几何相位分别如下:

$$\Phi_u(x, y) = \frac{\varphi_{\text{rl}}(x, y) + \varphi_{\text{lr}}(x, y)}{2}, \quad (2)$$

$$\theta(x, y) = \frac{\varphi_{\text{rl}}(x, y) - \varphi_{\text{lr}}(x, y)}{4}, \quad (3)$$

$$\Phi_v(x, y) = \Phi_u(x, y) + \pi, \quad (4)$$

式中: $\Phi_u(x, y)$ 和 $\Phi_v(x, y)$ 分别为X和Y线偏振光入射下单元的传播相位; $\theta(x, y)$ 为单元的旋转角度,几何相位值为 θ 的2倍。

利用以上相位设计的超透镜可用于偏振光自旋解耦功能。图1所示为超透镜及其单元模型图。图1(a)所示为超透镜解耦聚焦圆偏振光的示意图,其可以将入射光中的LCP与RCP分量的解耦并聚焦到不同焦点,其焦点分别位于沿透镜轴向 $f_{\text{L}}=80 \mu\text{m}$, $f_{\text{R}}=120 \mu\text{m}$ 处, f_{L} 和 f_{R} 分别为左旋和右旋圆焦距。本设计在 $2 \mu\text{m}$ 厚的CaF₂衬底上排布微单元阵列,该单元结构如图1(b)~图1(d)所示。当入射波长 $\lambda_0=4.7 \mu\text{m}$ 时,非晶态GSST折射率($n_{\text{g}} \approx 3.19$)^[17]与CaF₂折射率($n_{\text{c}} \approx 1.47$)的高折射率差使单元可被视为截断波导。因相变需高温激励,该设计使用高熔点CaF₂包覆GSST,以在可逆相变中保持纳米柱

形状。该单元周期 $P=3\ \mu\text{m}$ ，高度 $h=3.2\ \mu\text{m}$ ，矩形纳米柱长 a 、宽 b 在范围 $0.6\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 内变化实现 2π 传播相位覆盖，包裹 GSST 的 CaF_2 边缘厚度与顶部厚度 d 均为 $300\ \text{nm}$ 。本文使用仿真软件 Lumerical 有限差分时域法 (Finite-Difference Time-Domain Method, FDTD) 对设计单元进行仿真，在 x 和 y 方向上满足周期边界条件 (Periodic)，在 z 方向

满足完全匹配层 (Perfectly-Matched-Layer, PML) 边界条件。参考文献 [16] 的实验数据，GSST 材料的光学常数表现出波长敏感特性，在 $4.7\ \mu\text{m}$ 波长下非晶态 GSST (a-GSST) 的折射率实部 $n=3.19$ ，虚部 $k=0$ ，晶态 GSST (c-GSST) 的 $n=4.7$ ， $k=0$ 。图 1(e)~图 1(g) 分别为 $4.7\ \mu\text{m}$ 波长入射下单元透射率 T 、相位 Φ_u 和 Φ_v 在 a 、 b 长度变化下的分布结果。

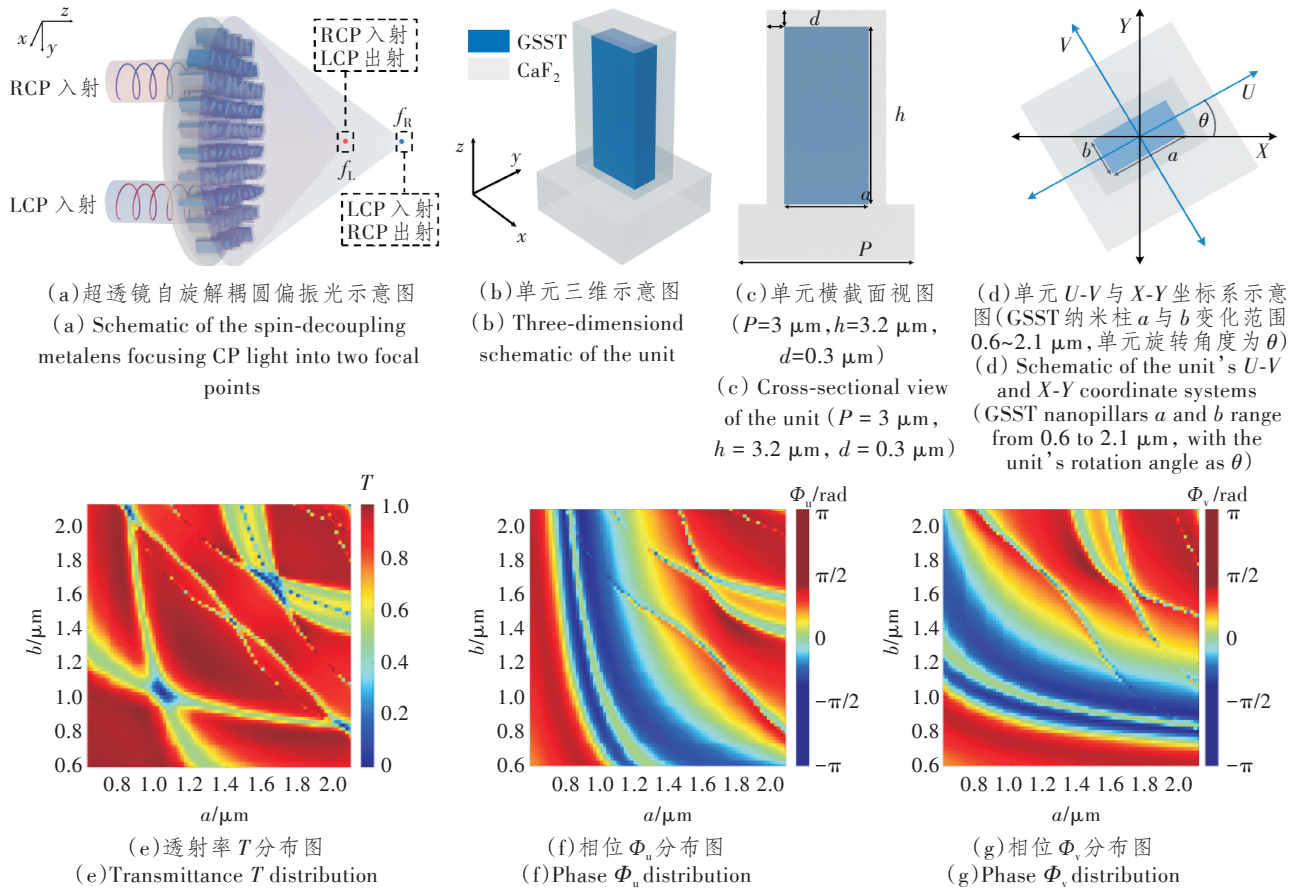
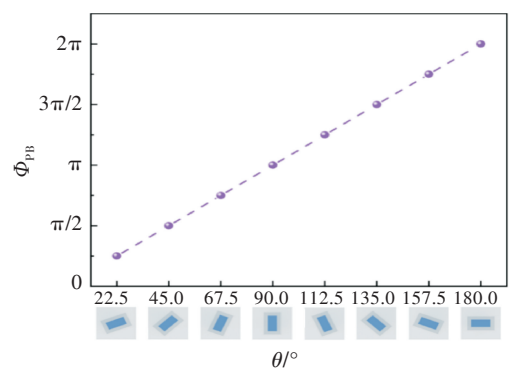
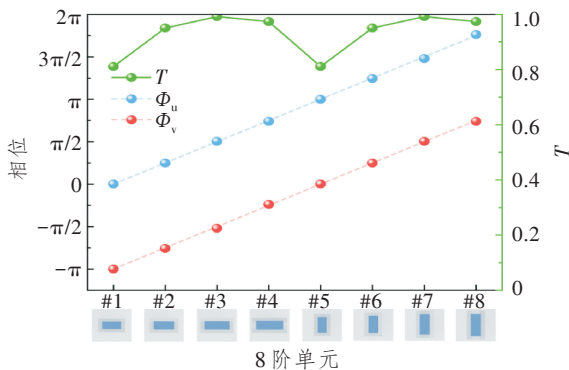


图 1 超透镜及其单元模型

Figure 1 Metalens and its unit cell model

基于仿真结果选取了 8 类单元以覆盖 $0\sim 2\pi$ 传播相位。这些单元均可等效为半波片，其透射相位

与透射率 T 的关系如图 2(a) 所示，几何相位 Φ_{PB} 与旋转角度 θ 的关系如图 2(b) 所示。图 2(a) 中， Φ_u 和



(a) 8 阶单元 (#1~#8) 的透射相位 Φ_u 和 Φ_v 与透射率 T 分布

(b) 单元旋转角度 θ 对应几何相位 Φ_{PB} 关系图

图 2 单元的相位和透射率分布图

Figure 2 Phase and transmittance distributions of the unit cell

Φ_v 分别为 X 和 Y 线偏振光入射下单元的透射相位, 同一结构在交叉极化电磁波入射下的透射相位差为 π , 可等效为半波片。另外, 由图可知, 所有单元都能达到超过 80% 的透射率, 具有能量低损耗特性。

2 结果与讨论

2.1 具有自旋解耦功能的双焦点超透镜

偏振光自旋解耦在偏振相关生物传感^[22-23]、光束分裂^[24-25]以及偏振相关全息成像^[26-29]领域具有深远意义。根据上一小节所阐述的自旋解耦超透镜理论机制, 即通过单元的传播相位与几何相位协同调控来实现对不同自旋态光场的独立控制, 该双焦点超透镜计划将 LCP 和 RCP 光聚焦在沿透镜光轴的不同位置, 双焦点分别位于 $(0, 0, f_L)$ 和 $(0, 0, f_R)$ 处, 这里 $f_L \neq f_R$ 。已知焦点位置, 通过预测入射光透过超透镜的聚焦波前, 可计算超透镜表面任意位置

处的相位延迟。RCP 转 LCP 的目标相位 $\varphi_{rl}(x, y)$ 和 LCP 转 RCP 的目标相位 $\varphi_{lr}(x, y)$ 分别可表示为

$$\varphi_{rl}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{x^2 + y^2 + f_L^2} - f_L), \quad (5)$$

$$\varphi_{lr}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{x^2 + y^2 + f_R^2} - f_R). \quad (6)$$

本文将左旋圆焦距 f_L 设计为 $80 \mu\text{m}$, 右旋圆焦距 f_R 设计为 $120 \mu\text{m}$, 入射波长 λ_0 为 $4.7 \mu\text{m}$, 圆形超透镜直径为 $150 \mu\text{m}$ 。

由式(5)和式(6)计算得到的双曲相位 (φ_{rl} 和 φ_{lr}) 结果如图 3 所示。按照相位分布, 利用 8 阶单元构建超透镜进行 FDTD 仿真, 在基底附近设置不同偏振态的入射光源, 光源与基底之间设置理想导体 (Perfect-Electric-Conductor, PEC) 通孔材料作为光阑, 3 轴边界条件均为 PML, 设置 $x-z$ 平面监视器记录出射光场的电场和能量信息。

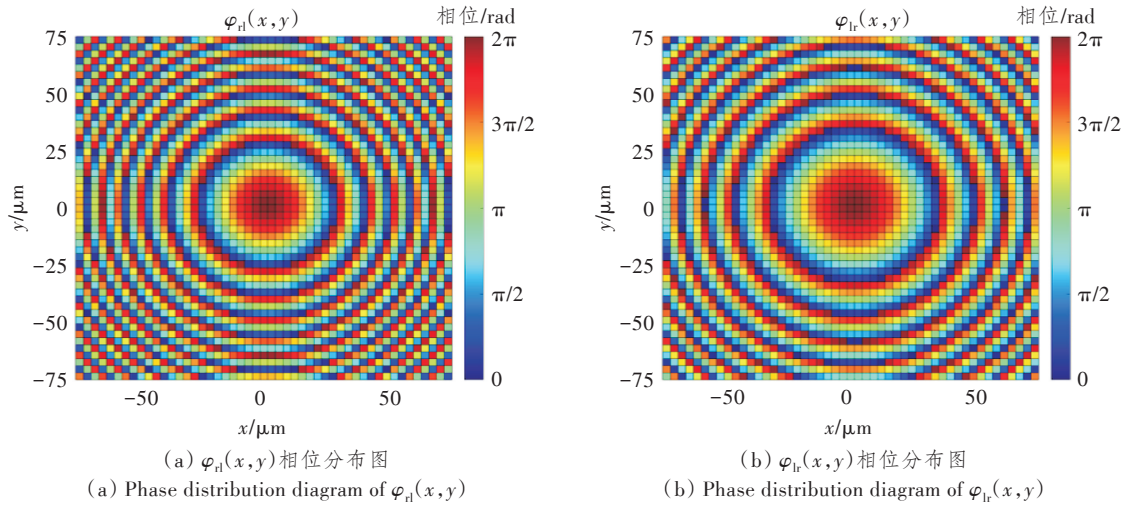


图 3 自旋解耦双焦点超透镜相位分布

Figure 3 Phase distribution of the spin-decoupled bifocal metalens

图 4(a) 所示为超透镜聚焦示意图, GSST 材料为非晶态 (a-GSST), 圆偏振光透过超透镜转化为相反旋性的圆偏振光, 并聚焦到沿 z 轴不同焦距处。图 4(c) 从左至右分别为 GSST 非晶态时 LCP、RCP 和 X 线偏振 (X-Linear Polarization, X-LP) 光入射下出射光 $x-z$ 平面电场分布图。与预先设计的一致, 入射圆偏振光转化为旋性相反的 LCP 和 RCP 光并汇聚在设计焦点 f_L 与 f_R 附近。由于线偏振光可视为 LCP 与 RCP 光的叠加, 因此如图 4(c) 右图所示, 在 X-LP 光入射下, 双焦点位置附近均有明亮的焦斑。图 4(d) 为 GSST 受到热激励相变为晶体相 (c-GSST) 时, 不同圆偏振光入射下 $x-z$ 平面输出的电场图, 从左至右分别为 GSST 为晶态时 LCP、RCP 和 X-LP 光入射下 $x-z$ 平面电场分布

图。由电场分布可知, 在 GSST 相变为晶态后, 原焦点处明亮的焦斑接近消失, 正如图 4(b) 所示, 此时超透镜为 OFF 状态, 不再具备圆偏振光分离聚焦功能。

为了更直观地获取超透镜双焦点的具体位置, 本文仿真了焦点光斑分别沿 x 与 z 轴的电场强度分布曲线。如图 5(a) 所示, 当 GSST 为 a 态时, LCP 焦点电场强度最大值对应 z 轴 $78.6 \mu\text{m}$ 处, RCP 焦点对应 z 轴 $116.3 \mu\text{m}$ 处, 与设计值 80 和 $120 \mu\text{m}$ 非常接近。实际焦点位置与理论设计值存在轻微偏差, 主要是由有限孔径衍射和相位离散化误差引起。有限尺寸的超透镜导致边缘衍射效应, 使聚焦点相对设计焦距略有前移, 随着菲涅尔数 $N_F = a^2/(\lambda f)$ (λ 为入射波长) 的增大, 即扩大孔径 a 或缩短焦距

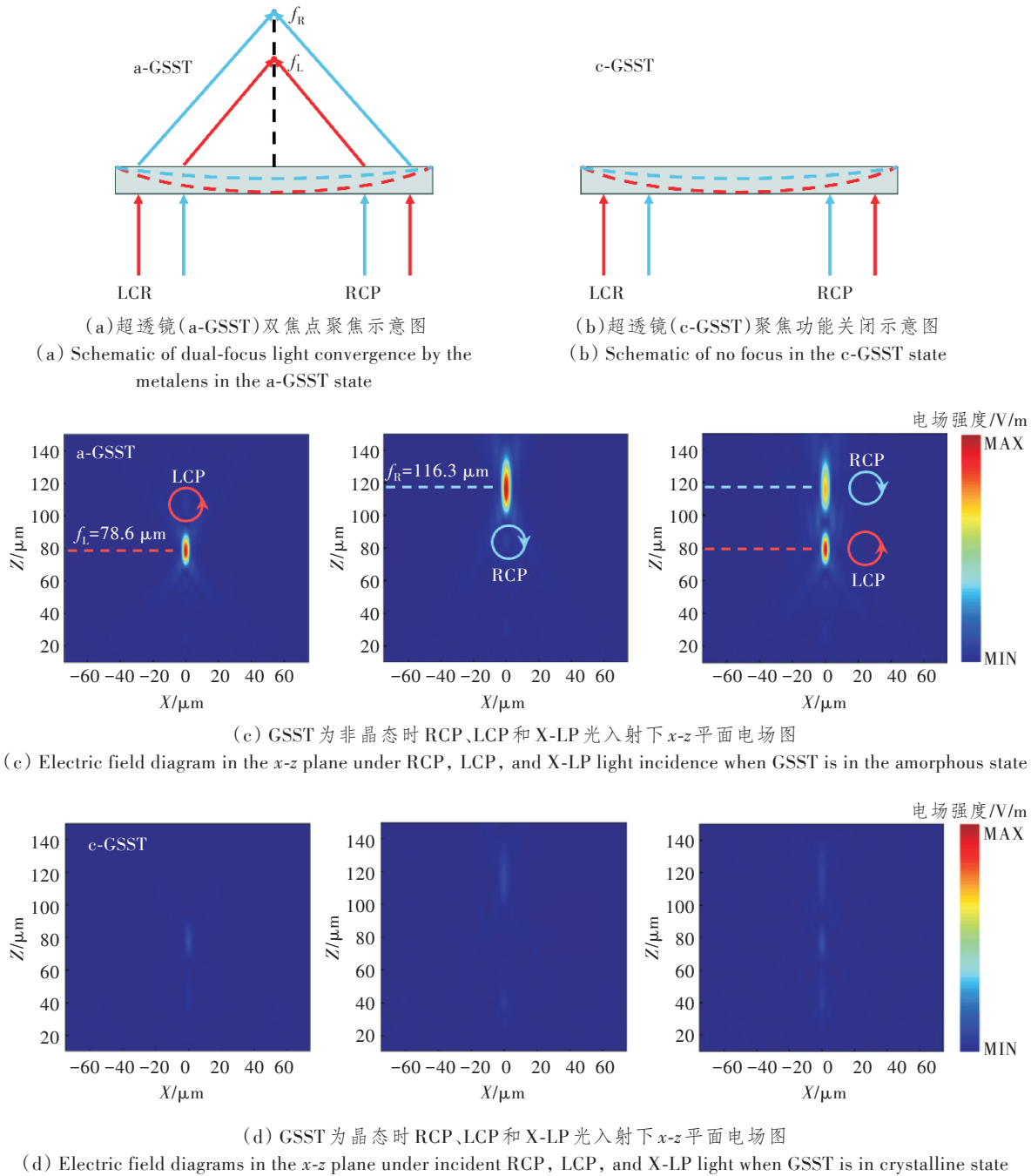


图4 超透镜聚焦效果演示

Figure 4 Demonstration of the metalens focusing results

f ,该偏差可显著减小;同时,离散单元取样造成的相位量化误差亦会影响聚焦精度。该偏差幅度约为2%~3%,属于合理设计误差范围,可通过增大孔径或提高相位分辨率进一步改善。

焦点电场强度平面沿 x 轴分布的曲线如图5(b)所示,峰值强度对应的 x 轴坐标为0,这与设计焦点位于超透镜中心轴上一致。另外本文还计算了LCP与RCP焦点位置处的半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM),LCP焦点处FWHM为

$3.52 \mu\text{m}$,其理论衍射极限为 $3.40 \mu\text{m}$;RCP焦点处FWHM为 $4.39 \mu\text{m}$,其理论衍射极限为 $4.34 \mu\text{m}$,二者均接近衍射极限聚焦。此外,本文以入射光为RCP为例,仿真了c-GSST下LCP焦点位置沿 z 轴的电场强度分布,结果如图5(a)中绿色曲线所示,当GSST为晶态时,在实际焦点位置处的电场强度值很小,与非晶态相差10倍左右,这与 $x-z$ 平面中原LCP焦点位置处明亮的焦斑消失相对应,表明该超透镜具有光开关功能。

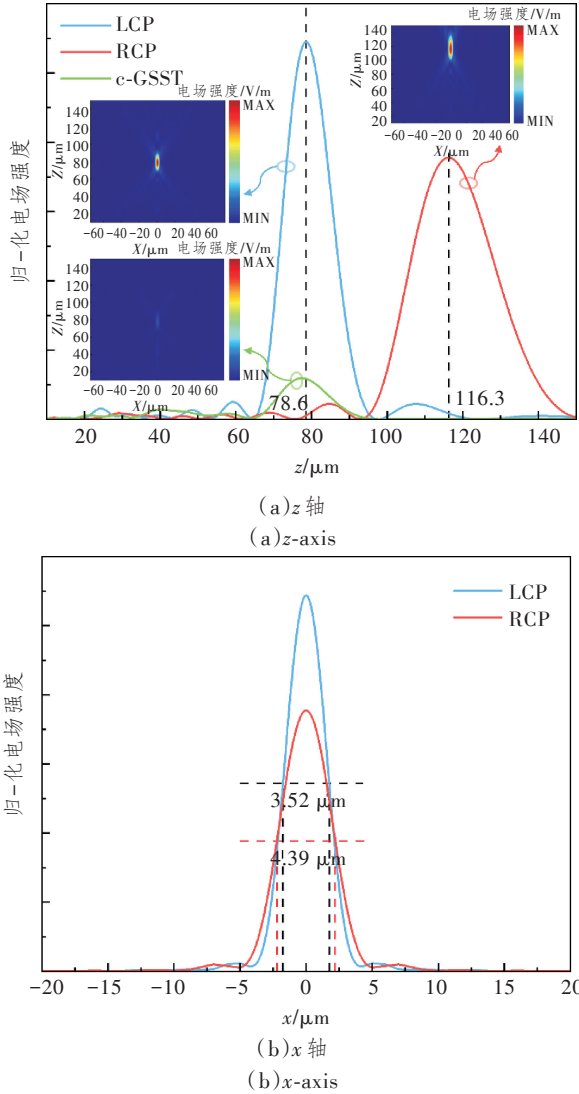


图5 不同圆极化波入射下焦斑沿 x 与 z 轴的电场强度分布

Figure 5 Distribution of electric field intensity at the focal spot along the x and z axis under different circularly polarized incidence

2.2 具有自旋解耦功能的4焦点超透镜

上一小节所设计结构经仿真验证实现了偏振光自旋解耦,旋性相反的圆偏振光沿透镜光轴纵向分离聚焦,通过激励 GSST 相变状态实现聚焦效果的打开与关闭。既然可以通过调控 GSST 材料相变特性实现聚焦功能的打开或关闭,进而可以根据这一特性设计一种双环结构,通过激发内、外环 GSST 的相变特性,实现内、外环对应焦点的独立调控。该双环结构如图 6(a)所示,包括直径为 D_1 的圆形子孔径以及内径为 D_1 、外径为 D_2 的环形子孔径,超透镜内环相位分布对应两个沿 x 轴横向双焦点,外环相位分布对应两个沿 z 轴纵向双焦点。通过改变内、外环 GSST 相变特性,同时调整入射光偏振态,

就能实现 4 个焦点聚焦效果的动态调控,示意图如图 6(b)所示。为了实现 GSST 内、外环相变状态的独立切换,可以采用局部光热调谐技术,通过组合空间分离的微加热器或施加聚焦激光辐照,对每个区域进行选择性的热激发,可以诱导 GSST 在非晶态和晶态之间的可逆相变。这种方法已在相变光子学领域得到了广泛应用,既保证了超透镜的实用可编程性,同时又不会显著增加制造复杂性^[30-33]。

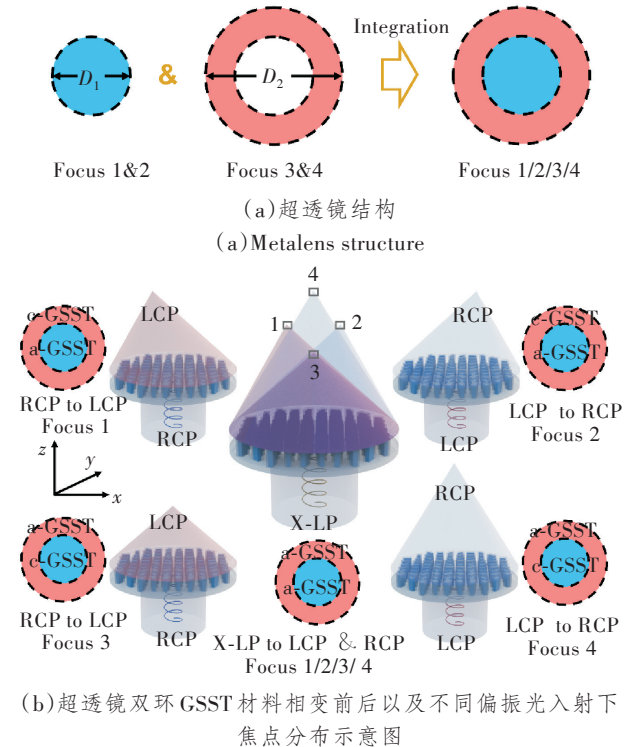


图6 4焦点超透镜设计和工作原理示意图

Figure 6 Schematic of the design and operating principle of the quadrifocal metalens

超透镜内圈 ON、外圈 OFF 状态下可将入射圆偏振光自旋解耦,其出射 LCP 和 RCP 光分别聚焦于 $(-x_0, 0, F_0)$ 和 $(x_0, 0, F_0)$ 的焦点 1、2 处, x_0 为沿 x 轴横向偏移的绝对值, F_0 为横向焦点 1、2 的 z 轴坐标。超透镜内圈 OFF、外圈 ON 状态下可将入射圆偏振光自旋解耦,其出射 LCP 和 RCP 光分别聚焦于 $(0, 0, F_L)$ 和 $(0, 0, F_R)$ 的焦点 3、4 处, F_L 与 F_R 为纵向焦点 3、4 的 z 轴坐标。已知目标 4 焦点位置,通过预测超透镜的聚焦波前可计算超透镜表面各位置处的相位延迟,可表示为

$$\varphi_{rl(\text{inside})}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + F_0^2} - F_0), \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{rl(inside)}}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{(x+x_0)^2 + y^2 + F_0^2} - F_0), \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{rl(outside)}}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{x^2 + y^2 + F_L^2} - F_L), \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{lr(outside)}}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{x^2 + y^2 + F_R^2} - F_R), \quad (10)$$

式中： $\varphi_{\text{rl(inside)}}(x, y)$ 与 $\varphi_{\text{lr(inside)}}(x, y)$ 分别为超透镜内圈各点到焦点1、2的相位延迟； $\varphi_{\text{rl(outside)}}(x, y)$ 与

$\varphi_{\text{lr(outside)}}(x, y)$ 分别为超透镜外圈各点到焦点3、4的相位延迟。由式(7)~式(10)可以计算超透镜各点处的传输相位 $\Phi_u(x, y)$ 和几何相位 $\Phi_{\text{PB}}(x, y)$ 。设计该透镜 $x_0=25 \mu\text{m}$, $F_0=100 \mu\text{m}$, $F_L=75 \mu\text{m}$, $F_R=125 \mu\text{m}$, 入射波长 $\lambda_0=4.7 \mu\text{m}$, 单元周期 $P=3 \mu\text{m}$, 圆形超透镜内圈直径 $D_1=110 \mu\text{m}$, 外圈直径 $D_2=180 \mu\text{m}$ 。由式(7)~式(10)计算得到的超透镜表面相位延迟分布如图7所示。

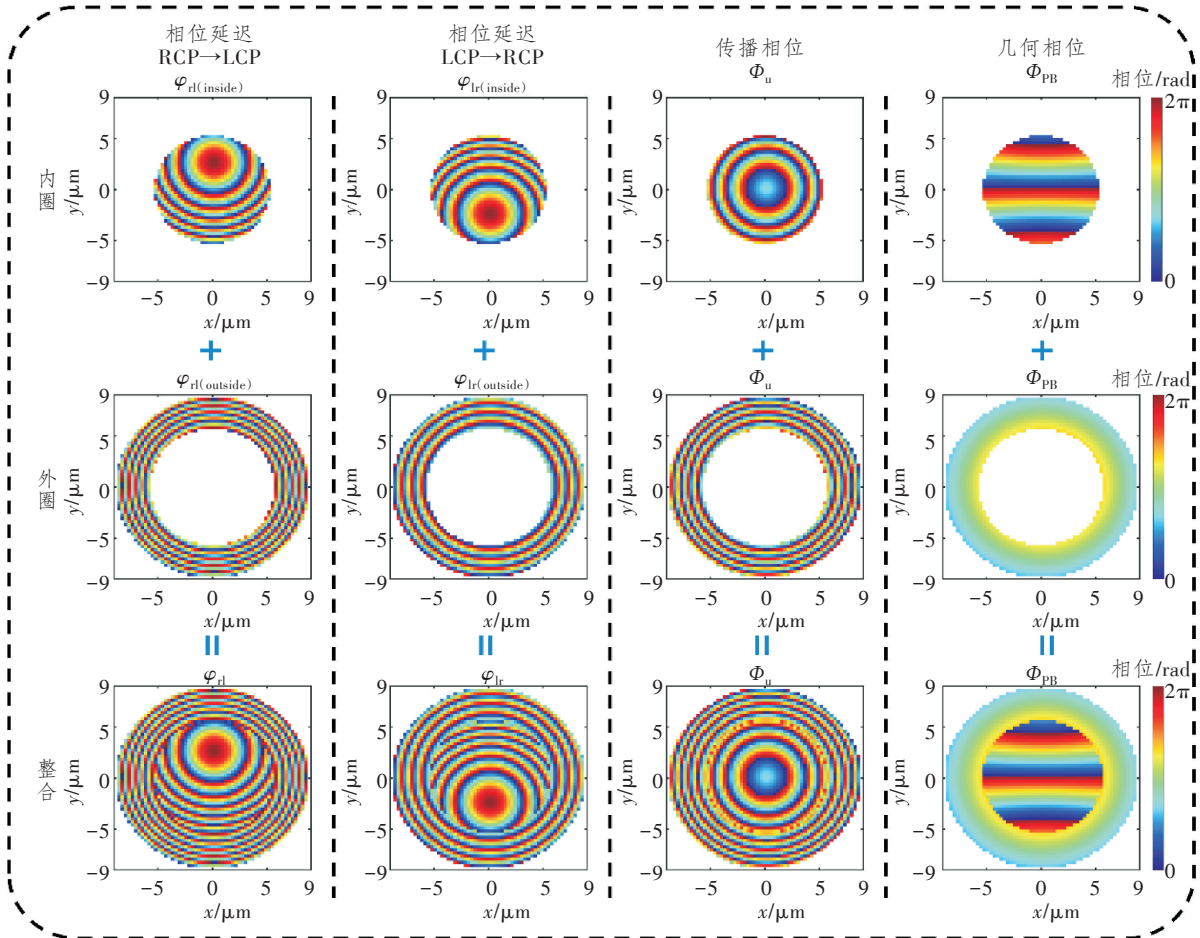


图7 超透镜表面相位延迟分布

Figure 7 Phase delay distribution across the surface of the metalens

根据相位分布利用8阶单元在基底上构建超透镜,利用FDTD仿真超透镜获取输出信息。图8所示为超透镜内、外环不同GSST相变状态以及不同偏振光入射下 x - z 平面电场分布图。图8中(a)所示为入射光为RCP、超透镜内圈为a-GSST、外圈为c-GSST时透射光的电场分布图。此时超透镜外圈为OFF,内圈为ON,入射RCP光透过超透镜内圈转化为旋性相反的LCP光。与预先设计的基本一致,在 x - z 平面电场能量汇聚在坐标为 $(-25 \mu\text{m}, 0, 99 \mu\text{m})$ 的焦点1附近。图8中(b)所示为入射光为LCP、超透镜内圈为a-GSST、外圈为

c-GSST时透射光的电场分布图。此时出射RCP光能量汇聚在坐标为 $(25 \mu\text{m}, 0, 100 \mu\text{m})$ 的焦点2附近。图8中(c)所示为入射光为RCP、超透镜内圈为c-GSST、外圈为a-GSST时透射光的电场分布图。此时超透镜外圈为ON,内圈为OFF,入射RCP光转化为旋性相反的LCP光,在 x - z 平面电场能量汇聚在坐标为 $(0, 0, 75 \mu\text{m})$ 的焦点3附近。图8中(d)所示为入射光为LCP、超透镜内圈为c-GSST、外圈为a-GSST时透射光的电场分布图。此时出射RCP光能量汇聚在坐标为 $(0, 0, 122 \mu\text{m})$ 的焦点4附近。图8中(e)所示为X-LP光入射下,

超透镜内、外圈均为 a-GSST 时的电场强度分布图,此时超透镜内、外圈均为 ON 状态。由于 X-LP 光可以视为 LCP 与 RCP 光的叠加,因此在 4 个焦

点位置附近均有明亮的焦斑,这证实了超透镜独立解耦和聚焦圆偏振光的能力,从而验证了本文所提 4 焦点设计的功能。

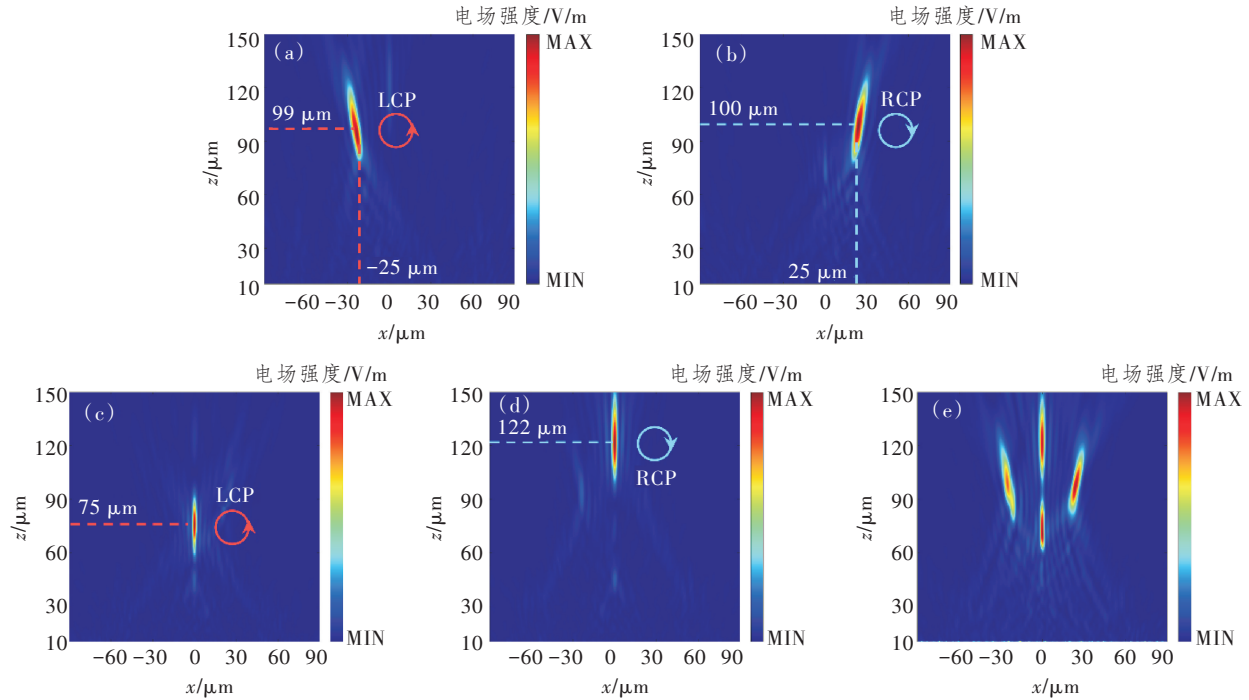


图 8 超透镜在不同 GSST 状态以及不同偏振光入射下 x - z 平面电场分布图

Figure 8 x - z plane electric field distributions of the metalens under various GSST states and incident polarization conditions

为评估所提多焦点超透镜的实际可行性,本文对器件的材料实现与制备工艺进行了分析。GSST 薄膜可通过磁控溅射或脉冲激光沉积在 CaF_2 基底上制备,并结合电子束光刻与反应离子刻蚀形成纳米结构。随后在低温条件下电子束蒸镀 CaF_2 覆层,可有效提高结构在相变过程中的热稳定性并防止形变。GSST 在 MIR 波段具有较小折射率变化和极低吸收率,使设计具备良好的透射性与抗色散性能。尽管本文尚未开展实物验证,但所采用的材料与工艺均成熟可行,具有明确的实验实现潜力,后续将开展样品制备与聚焦性能测试以进一步验证设计的实际性能。

3 结束语

本文使用 GSST 相变材料提出了两种偏振相关的自旋解耦超透镜,实现了 LCP 与 RCP 光沿纵向和横向多焦点聚焦。选取具有半波片特性的 8 个微单元按照几何相位与传播相位相结合的方式协同实现超透镜表面相位分布。对于双焦点超透镜,本文实现了 $4.7 \mu\text{m}$ MIR 光入射下,LCP 与 RCP 光分别聚焦在距超透镜中心 78.6 和 $116.3 \mu\text{m}$ 处,通过控制 GSST 相变水平实现聚焦强度的连续调控。

对于 4 焦点透镜,本文开创性的独立双环 GSST 结构可以实现不同区域主动相变控制,实现内、外环分区自旋解耦,从而在 x - z 平面内产生 4 个离散焦点。通过切换入射光的偏振态并选择性地调节内外环 GSST 材料的相变特性,实现可编程地激活或抑制 4 个独立焦点的聚焦效应。

本文结果主要基于数值进行仿真,未涉及实物器件的制备与测试。由于仿真模型未考虑材料折射率的温度漂移、相变不完全性以及加工误差等因素,实际器件性能可能与理论结果存在一定偏差。未来工作将重点开展器件制备与实验测试,包括 GSST 薄膜制备与相变可逆性验证、 CaF_2 包覆层对热稳定性的影响分析以及多焦点聚焦性能测试等,以进一步验证设计的实际可行性。本文所设计的超透镜极具创新地展示了一个用于 MIR 偏振光自旋解耦和光束聚焦的多功能平台,在弱辐射偏振态分析、三维显微成像、手性分子检测和偏振复用通信系统等领域具有巨大的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴冕,武霖,陶金. 双光子 3D 打印超表面光器件研究进展[J]. 光通信研究, 2023(6): 11-31.

- Wu M, Wu L, Tao J. Recent Progress and Comment on Metasurface Devices based on Two - Photon 3D Printing[J]. Study on Optical Communications, 2023(6): 11-31.
- [2] 梁茂伟, 卢德宙, 马耀光. 超表面的矢量光场调控[J]. 光电工程, 2024, 51(8): 8-31.
- Liang M W, Lu D Z, Ma Y G. Vectorial Optical Fields Manipulation via Metasurfaces[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(8): 8-31.
- [3] 夏睿星, 赵东, 李子勤, 等. 大视场角、等衍射角间隔的矢量超构表面分束器[J]. 光电工程, 2024, 51(8): 146-155.
- Xia R X, Zhao D, Li Z Q, et al. Metasurface Beam-splitter with Large Field of View and Equal Diffraction Angle Interval [J]. Opto - Electronic Engineering, 2024, 51(8): 146-155.
- [4] 张寿俊, 曹曦, 田震. 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展[J]. 光电工程, 2023, 50(9): 3-17.
- Zhang S J, Cao T, Tian Z. Progress on Reconfigurable Terahertz Metasurface Devices based on Sulfide Phase Change Materials [J]. Opto - Electronic Engineering, 2023, 50(9): 3-17.
- [5] Ma H, Dai Y, Feng X, et al. An Optically Controlled Programmable Metasurface based on Complex Amplitude Modulation for Dynamic Generation of Airy and Vortex Beams [J]. Optics Communications, 2025, 592: 132254.
- [6] 付博妍, 毕千惠, 郑诗雨, 等. 基于多维光场调控的超构表面先进成像与显示(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 9-31.
- Fu B Y, Bi Q H, Zheng S Y, et al. Advanced Metasurface Imaging and Display based on Multidimensional Light Field Manipulation(Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(14): 9-31.
- [7] 魏鹤鸣, 胡文琛, 庞拂飞. 高性能近红外聚合物超透镜的逆向设计[J]. 光学学报, 2024, 44(8): 207-215.
- Wei H M, Hu W C, Pang F F. Inverse Design of High-Performance Near-Infrared Polymer Metalens[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(8): 207-215.
- [8] 杨清秀, 席科磊, 周韶东, 等. 光子自旋解耦的人工表面等离激元双功能波前调控[J]. 光学学报, 2024, 44(9): 248-254.
- Yang Q X, Xi K L, Zhou S D, et al. Engineering Bi-Functional Wavefronts of Spoof Surface Plasmon Polaritons via Photonic Spin Decoupling[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(9): 248-254.
- [9] 冯娟, 王波, 陈险峰. 微纳光学中的光子自旋霍尔效应[J]. 光学学报, 2023, 43(16): 44-59.
- Feng J, Wang B, Chen X F. Photonic Spin Hall Effect in Micro - and Nano - Optics [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(16): 44-59.
- [10] He S, Shou Y, Xu D, et al. High-Order Photonic Spin Hall Effect and Its Application in High-Contrast Imaging[J]. Physical Review Applied, 2024, 21(3): 034045.
- [11] 戴耀威, 陈聪, 高鹏, 等. 基于空间编码结构光源的2 bit光控可编程太赫兹超表面[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 247-256.
- Dai Y W, Chen C, Gao P, et al. 2 bit Optically Controlled Programmable Terahertz Metasurface based on Spatially Encoded Structured Light[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 247-256.
- [12] 史卓琳, 贺景琳, 王金金, 等. 基于相变材料GST的圆二色性可调谐外在手征超表面设计[J]. 光电工程, 2022, 49(10): 99-108.
- Shi Z L, He J L, Wang J J, et al. Design of Tunable Circular Dichroism Extrinsic Chiral Metasurface based on Phase Change Material GST [J]. Opto - Electronic Engineering, 2022, 49(10): 99-108.
- [13] 王家伟, 李珂, 成茗, 等. 动态可调谐超表面的研究进展与应用[J]. 光电工程, 2023, 50(8): 64-85.
- Wang J W, Li K, Cheng M, et al. Research Progress and Applications of Dynamically Tunable Metasurfaces [J]. Opto - Electronic Engineering, 2023, 50(8): 64-85.
- [14] Dai Y, Wang X, Chen C, et al. Digitally Coded Resistor Arrays: The Unification Control Method of Amplitude, Phase, and Polarization in Metasurface [J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(26): e01721.
- [15] Liu H, Gao Z, Chen C, et al. Tunable Full - Space Metasurfaces for Multiple Terahertz Wavefront Manipulation and Holographic Imaging[J]. Optics Communications, 2025, 574: 131063.
- [16] Zhang Y, Chou J B, Li J, et al. Broadband Transparent Optical Phase Change Materials for High - Performance Nonvolatile Photonics [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4279.
- [17] Zhang Y, Fowler C, Liang J, et al. Electrically Reconfigurable Non - Volatile Metasurface Using Low - Loss Optical Phase - Change Material [J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(6): 661-666.
- [18] Pan M, Fu Y, Zang Y, et al. Reversibly Reconfigurable GSST Metasurface for Broadband Beam Steering and Achromatic Focusing in the Long - Wave Infrared [J]. Optics Express, 2023, 31(14): 22554-22568.
- [19] Tan J, Zhao Z, Chen R, et al. Polarization - Controlled

- Varifocal Metalens with a Phase Change Material GSST in Mid-Infrared [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32501–32508.
- [20] Li J, Chen S, Yang H, et al. Simultaneous Control of Light Polarization and Phase Distributions Using Plasmonic Metasurfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(5): 704–710.
- [21] Berry M V. Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes [J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45–57.
- [22] 李继武, 王春, 邴丕彬, 等. 手性等离激元超表面圆二向色性光谱传感特性研究 [J]. *量子电子学报*, 2020, 37(3): 257–265.
- Li J W, Wang C, Bing P B, et al. Study on Circular Dichroism Spectral Sensing Properties of Chiral Plasmonic Metasurface [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(3): 257–265.
- [23] Bai Q, Huang X, Du S, et al. Multiple-Polarization-Sensitive Photodetector based on a Plasmonic Metasurface [J]. *Nanoscale*, 2024, 16(18): 8907–8914.
- [24] Tian S, Li Y, Xu J. Dual-Channel Multifunctional Coding Metasurface with Integrated Focusing and Four-Beam Vortex Beams [J]. *Physics Letters A*, 2025, 532: 130186.
- [25] Dai Y, Chen C, Gao P, et al. Optically Controlled Chiral Metasurface: Towards Controllable Bessel Beams and Holographic Logic Operation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 174: 107989.
- [26] 吴泽晖, 滕智琳, 许可, 等. 超表面全息术: 动态显示、加密、成像及其他 [J]. *中国激光*, 2024, 51(17): 45–71.
- Wu Z H, Teng Z L, Xu K, et al. Meta-Holography: Dynamic Display, Encryption, Imaging, and Others [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(17): 45–71.
- [27] 万希智, 孙雪平, 王望, 等. 基于介质超表面的圆偏振复用全息 [J]. *应用光学*, 2024, 45(3): 630–636.
- Wan X Z, Sun X P, Wang W, et al. Circular Polarization Multiplexing Holography based on Dielectric Metasurface [J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 630–636.
- [28] 李瑞琛, 邹毅军, 陈天航, 等. 宽频消色散超表面全息成像 [J]. *光电工程*, 2023, 50(8): 99–108.
- Li R C, Zou Y J, Chen T H, et al. Broadband Achromatic Metasurface Holography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(8): 99–108.
- [29] 张育铭, 范文慧, 吴奇, 等. 基于全介质超表面的太赫兹波段偏振复用计算全息成像 [J]. *光子学报*, 2023, 52(8): 236–248.
- Zhang Y M, Fan W H, Wu Q, et al. Terahertz Polarization Multiplexing Computer-Generated Holography based on All-Dielectric Metasurface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(8): 236–248.
- [30] Prabhathan P, Sreekanth K V, Teng J, et al. Roadmap for Phase Change Materials in Photonics and Beyond [J]. *iScience*, 2023, 26(10): 107946.
- [31] Yuan W, Lu Y, Lu L, et al. Electrode Area Dependent Switching Behavior of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ Phase Change Material Driven by Narrow Voltage Pulse [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(24): 244102.
- [32] Wiedeman D, Sharma R, Bissell E, et al. Solution-based Processing of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ Optical Phase Change Materials [J]. *Optical Materials Express*, 2024, 14(12): 2874.
- [33] 连晓娟, 蒋纪元, 万相, 等. 二氧化硅/氟化镁基超低能耗相变集成光子器件 [J]. *电子学报*, 2024, 52(11): 3886–3898.
- Lian X J, Jiang J Y, Wan X, et al. Ultralow Energy Phase-Change Integrated Photonics Devices with the Silicon Dioxide/Magnesium Fluoride Platform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(11): 3886–3898.