

基于几何相位的聚焦和涡旋纵向偏振演化超构表面

张 腾

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月12日; 录用日期: 2025年5月4日; 发布日期: 2025年5月13日

摘 要

超构表面在纵向方向上的调控为控制偏振状态引入了新的维度, 为了实现偏振态随传播方向的演化, 文章提出了一种基于几何相位调制的超构表面, 可以同时实现纵向聚焦、涡旋及偏振态的演化。该设计基于复振幅的叠加方法来构建结构, 并通过时域有限差分方法(FDTD)进行了数值仿真验证。仿真的结果表明, 所设计的超构表面在纵向上从焦点演化到涡旋的过程中, 可以同时实现正交线偏振态的演化; 进一步设计了双涡旋的纵向偏振演化, 同时也实现了涡旋拓扑荷的演化。这种沿传播方向动态调控偏振态的方法, 为开发光控可切换器件及推动光-物质相互作用的研究开辟了新的应用前景。

关键词

超构表面, 几何相位, 聚焦, 涡旋, 偏振演化

Geometric Phase-Based Metasurfaces for Focusing and Vortex Longitudinal Polarization Evolution

Teng Zhang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 12th, 2025; accepted: May 4th, 2025; published: May 13th, 2025

Abstract

Metasurfaces with longitudinal modulation capabilities introduce a new dimension for polarization state control. To achieve polarization evolution along the propagation direction, this article proposes

a geometric-phase-modulated metasurface that simultaneously enables longitudinal focusing, vortex generation, and polarization evolution. The design employs a complex-amplitude superposition method for structural configuration, validated through finite-difference time-domain (FDTD) numerical simulations. Results demonstrate that the metasurface facilitates orthogonal linear polarization evolution during the longitudinal transition from focused spots to vortex beams. Furthermore, we implement dual-vortex configurations exhibiting longitudinal polarization evolution while enabling dynamic modulation of vortex topological charges. This approach to dynamically manipulate polarization states along the propagation axis opens new prospects for developing optically controlled switchable devices and advancing light-matter interactions.

Keywords

Metasurface, Geometric Phase, Focusing, Vortex, Polarization Evolution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

偏振是电磁波的基本性质之一，操纵电磁波的偏振状态已经在光学领域得到了多个方向的研究。偏振作为光与物质相互作用的重要载体，在各个领域内都发挥出了重要的作用，值得注意的是，对偏振进行多功能的调控在实际应用中更具有研究意义。传统的偏振调控通常局限于平面内的调制，且需要多个不同的光学元件叠加来组成复杂系统，不利于集成且效率低。

基于人工二维材料的超构表面应运而生，它的出现彻底改变了电磁波的操控方式。通过设计具有各种形状的二维超原子，按照特定的取向角进行排列，构建的超表面可以精确调控电磁波的振幅、相位和偏振，为具有高度集成化的光学元件提供了超紧凑且高灵活的设计平台。超构表面具有体积小、厚度薄等独特优势，已经被应用在了多种具有高效功能的器件中，其中包括光束聚焦[1]-[5]、涡旋光生成器[6]-[11]、全息再现[12]-[17]和衍射神经网络[18]-[23]等。基于超构表面的偏振调制，目前的主要研究都是集中在：在横向上操纵偏振态，将不同偏振态的聚焦或者涡旋光束调制在不同的位置处，在纵向上的调制包括沿光路的涡旋拓扑荷数的演化[24]、标量场到矢量场的纵向操控[25]。但在沿传播方向的聚焦和涡旋及偏振态的同步演化还未被开发。

在这里，本文提出了一种基于几何相位的聚焦和涡旋纵向偏振演化超构建表面。通过设计面内具有不同旋转角度的各向异性结构，满足准二分之一波片的功能，构建出超构表面阵列。利用几何相位的调制方式打破了自旋锁定的约束，入射 x 偏振时可以实现具有偏振的焦点演化到具有正交偏振的涡旋，此外，我们还通过仿真验证了沿传播方向同偏振的涡旋演化到正交偏振态的涡旋，同时会伴随着拓扑荷数的动态变化。我们所设计的超表面为三维结构光场的调控和多自由度操纵电磁波的高性能器件开辟了一个新的途径。该设计有望应用于以下领域：在光学信息处理方面，基于所提出的偏振演化的光开关设计，可以利用纵向偏振态的切换实现多通道的空间复用；在量子通信领域，所提出的结构具有高度集成的优势，可以与探测器阵列耦合实现动态偏振态的解调。

2. 设计原理

2.1. 太赫兹超构表面示意图

如图 1 所示，所设计的超表面可以实现伴随着偏振态的聚焦到涡旋的演化，当 x 偏振太赫兹波入射

时, 在 $f = 5.4 \text{ mm}$ 处生成了具有 x 偏振态的焦点, 在 $f = 7.2 \text{ mm}$ 处产生了具有偏振旋转的涡旋光; 进一步, 也可以实现涡旋到涡旋的偏振演化, 且涡旋的拓扑荷数(m)也随之变化, 同样是 x 偏振入射, 在 $f = 5.7 \text{ mm}$ 的位置生成了具有同偏振态的涡旋光($m = +1$), 在 $f = 7.0 \text{ mm}$ 处产生了具有正交偏振态的涡旋光束($m = -1$)。

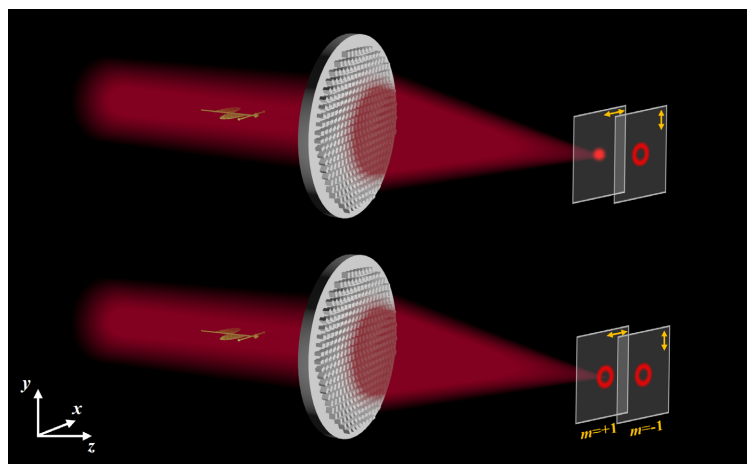


Figure 1. Schematic diagram of a geometric phase metasurface for polarization evolution combining focusing and vortex effects

图 1. 聚焦和涡旋的偏振演化几何相位超表面示意图

2.2. 原理分析

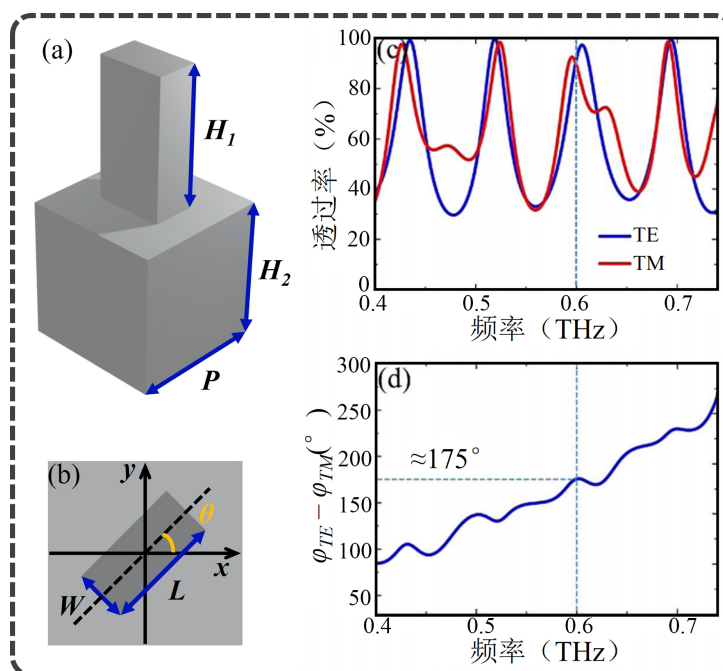


Figure 2. Schematic diagrams of unit cell design, transmittance, and phase difference: (a) Schematic of the unit cell structure; (b) Top view of the unit cell structure; (c) Transmission spectra of the structure under TE and TM terahertz wave illumination; (d) Phase difference between TE and TM terahertz waves

图 2. 单元结构设计、透过率和相位差示意图: (a) 单元结构示意图; (b) 单元结构俯视图; (c) TE 和 TM 太赫兹波照射下结构的透射光谱; (d) TE 和 TM 太赫兹波之间的相位差

所设计超表面的单元结构如图 2(a)所示, 由各项异性的矩形纳米柱构成, 所用材质为硅, 纳米柱的高度 $H_1 = 500 \mu\text{m}$, 衬底的厚度 $H_2 = 500 \mu\text{m}$, 周期 $P = 120 \mu\text{m}$, 图 2(b)展示了俯视图, 其中纳米柱的长(L)和宽(W)分别为 $99 \mu\text{m}$ 和 $35 \mu\text{m}$, 沿垂直方向的旋转角度表示为 θ 。为了实现所提出的功能, 我们设计并利用 CST 进行优化, 从图 2(c)中可以看出, 当入射的太赫兹波在 0.6 THz 频点时, TE 和 TM 的透过率较高且几乎相等, 通过计算相位差得到 TE 和 TM 的相位差约等于 π (图 2(d)), 因此所设计的单元尺寸可以被认为是一个准半波片, 且可以通过控制旋转角度 θ 来产生相位突变($\varphi = \pm 2\theta$), 即几何相位, 它可以任意地操纵偏振的旋转角度或聚焦, 并且相位突变的正负号由入射的圆偏振光束的旋性来决定。

具有线偏振的焦点或者涡旋可以认为是由左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)两个分量的叠加, 因此, 实现这种正交线偏振态焦点到涡旋的演化关键就是如何控制单个超表面使得同时具有聚焦和产生涡旋光的能力, 同时逐渐改变光的偏振态。当 x 偏振的太赫兹波入射时, 为了实现具有同偏振状态的聚焦逐渐演化到具有正交偏振状态的涡旋光, 将不同的聚焦相位和初始相位添加到入射的 LCP 和 RCP 光中, 所需同偏振的聚焦相位分布为:

$$\varphi_{\text{LCP}}^1(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f_1^2} - f_1 \right) \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{RCP}}^1(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f_1^2} - f_1 \right) \quad (2)$$

其中, λ 表示入射波长, 焦距 $f_1 = 5500 \mu\text{m}$ 。所需正交偏振的涡旋相位分布为:

$$\varphi_{\text{LCP}}^2(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f_2^2} - f_2 \right) + m\varphi \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{RCP}}^2(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f_2^2} - f_2 \right) + m\varphi \quad (4)$$

其中, m 表示涡旋的拓扑荷数, 是涡旋光的重要参数之一, φ 为平面内的取向角, 可以将相位进行旋转, 将上述公式利用光波叠加的原理, 就可以得到最终的超表面相位分布:

$$\phi = \arg \left\{ \exp(i\varphi_{\text{LCP}}^1) + \exp(i\varphi_{\text{RCP}}^1) + \exp[i(\alpha + \varphi_{\text{LCP}}^2)] + \exp[i(\alpha + \varphi_{\text{RCP}}^2)] \right\} \quad (5)$$

上述公式中的目标相位由凸透镜和凹透镜叠加组成, 即可以仅通过几何相位实现自旋解耦, 故当所设计的相位在 LCP 光的照射下时, 只有一半的透射波会被转换为 RCP 光。 α 表示附加的相位延迟, 为了使涡旋光实现偏振旋转的功能, 这里的 $\alpha = \pi/2$ 。涡旋光的焦距设置为 $f_2 = 7500 \mu\text{m}$, 这样一来就可以出现中间偏振态过渡部分。此时, 当入射 x 偏振光时, 产生涡旋光的相位分量 φ_{LCP}^2 和 φ_{RCP}^2 将会由于分别携带了 $+\alpha$ 和 $-\alpha$ 的相位延迟, 使 x 偏振光转换为 y 偏振光。

同理, 为了满足同偏振态涡旋($m = +1$)到正交偏振态涡旋($m = -1$)的演化, 所需的相位分布可以写为:

$$\phi = \arg \left\{ \exp(i\varphi_{\text{LCP}}^2) + \exp(i\varphi_{\text{RCP}}^2) + \exp[i(\alpha + \varphi_{\text{LCP}}^2)] + \exp[i(\alpha + \varphi_{\text{RCP}}^2)] \right\} \quad (6)$$

其中, 第一项中的 φ_{LCP}^2 和 φ_{RCP}^2 中的焦距 $f = 5500 \mu\text{m}$, 所携带涡旋相位的拓扑荷数 $m = +1$; 第二项中的 φ_{LCP}^2 和 φ_{RCP}^2 中的焦距 $f = 7000 \mu\text{m}$, 所携带涡旋相位的拓扑荷数 $m = -1$, 且相位延迟 $\alpha = \pi/2$ 。为了确保两个涡旋光束有足够的叠加部分, 这里的焦距相比之前的距离更靠近, 这样就可以实现具有 $+1$ 拓扑荷数的 x 偏振涡旋光演化到具有 -1 拓扑荷数的 y 偏振涡旋光。

3. 仿真结果分析

图 3 展示了焦点到涡旋偏振演化超表面的仿真结果。其中所设计的超表面由 100² 个纳米柱组成, 在

FDTD 软件中, 入射的频率设置为 0.6 THz, 边界条件设置为完美匹配层, 其中仿真边界的 x 、 y 、 z 方向的范围分别设置为 $12120\ \mu\text{m}$ 、 $12120\ \mu\text{m}$ 、 $-1500\ \mu\text{m}\sim 9000\ \mu\text{m}$, 且设置 mesh 网格参数分别为 $15\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 。最终得到的仿真结果以电场强度和相位分布的形式展现。如图 3 所示, 展示了在 x 偏振光的照射下得到的 E_x 和 E_y 分量电场强度的分布图, 从图中的 E_x 分量电场可以看出, 在 $z = 5.4\ \text{mm}$ 平面内汇聚了焦点(图 3(a₁)), 通过归一化处理, E_y 分量电场在其平面内没有出现强度分布(图 3(b₁)), 提取两个分量电场的振幅和相位信息, 再利用 MATLAB 计算偏振态, 可以得到焦点区域的偏振态分布图(图 3(c₁)), 在 $z = 5.4\ \text{mm}$ 平面处明显可以看出偏振的状态为 x 偏振态。沿光场的传播方向, 在 $z = 6.2\ \text{mm}$ 处设置了监视器, 结果表明此距离下的偏振状态大部分为 45 度线偏振(图 3(c₂)), 由于焦点和涡旋光振幅重叠区域不一致, 且能量有差异, 所以图中计算出的偏振分布并不是完美的 45 度线偏振态。图 3(a₃)和图 3(b₃)展示了在 $z = 7.2\ \text{mm}$ 处 E_x 分量和 E_y 分量的电场强度分布, 可以看出在 E_y 分量场中实现了涡旋光的聚焦, 而 E_x 分量经过归一化处理后没有场强分布, 计算得到的偏振状态分布更直观地说明了在其平面内产生的涡旋光的偏振态为 y 偏振光(图 3(c₃))。

进一步观察 x - z 平面内的电场强度分布图, 如图 3(d₁)~(d₃)所示, 展示了该设计的超表面沿 z 方向总场和 E_x 、 E_y 分量的电场强度分布图, 从图中可以更清晰地观察到具有 x 偏振状态的焦点演化到具有 y 偏振状态的涡旋。图 3 中的仿真结果充分展示了在焦点和涡旋演化的同时实现了正交线偏振态的演化, 验证了所设计的超表面结构的功能。除此之外, 还设计了具有共轭拓扑荷数的涡旋正交线偏振态的演化, 如图 4 所示。

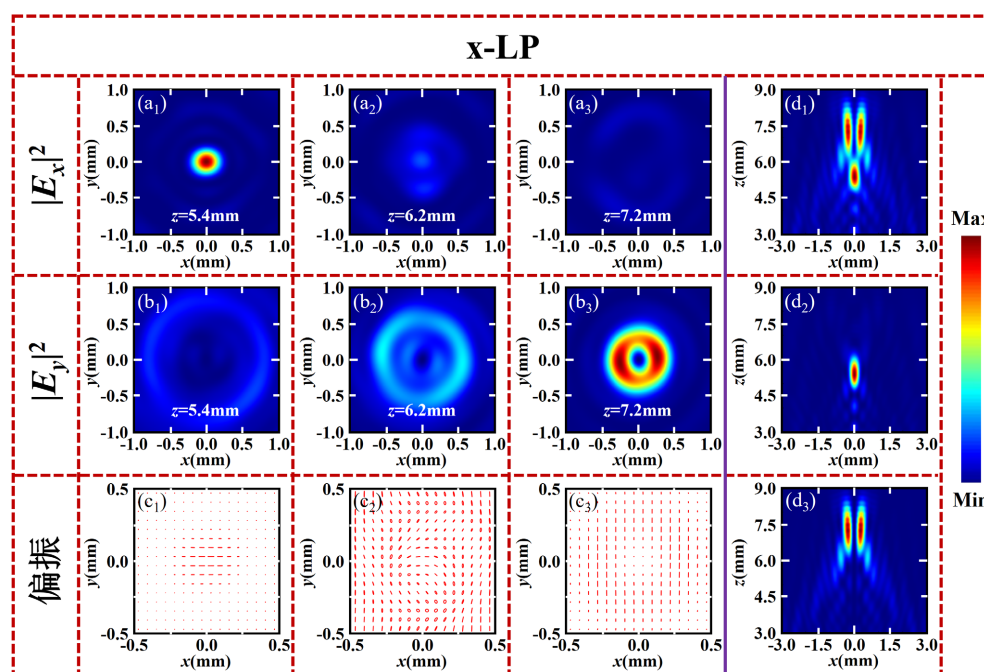


Figure 3. Simulation results of the geometric phase metasurface for polarization evolution with focusing and vortex effects: (a₁)~(a₃) Intensity distributions of the focal E_x electric field observed in three distinct x - y planes under x -polarized illumination; (b₁)~(b₃) Intensity distributions of the vortex E_y electric field observed in three distinct x - y planes under x -polarized illumination; (c₁)~(c₃) Calculated polarization distribution maps in three distinct x - y planes under x -polarized illumination; (d₁)~(d₃) Electric field intensity distributions of the total electric field and E_x / E_y electric fields in the x - z plane under x -polarized illumination

图 3. 基于几何相位聚焦和涡旋的偏振演化超表面仿真结果: (a₁)~(a₃) x 偏振光入射时在三个不同的 x - y 平面内观察到的焦点 E_x 场的强度分布; (b₁)~(b₃) x 偏振光入射时在三个不同的 x - y 平面内观察到的涡旋 E_y 场的强度分布; (c₁)~(c₃) x 偏振光入射时在三个不同的 x - y 平面内通过计算得到的偏振分布图; (d₁)~(d₃) x 偏振光入射时在 x - z 平面内分别得到的总场和 E_x 、 E_y 场的电场强度分布图

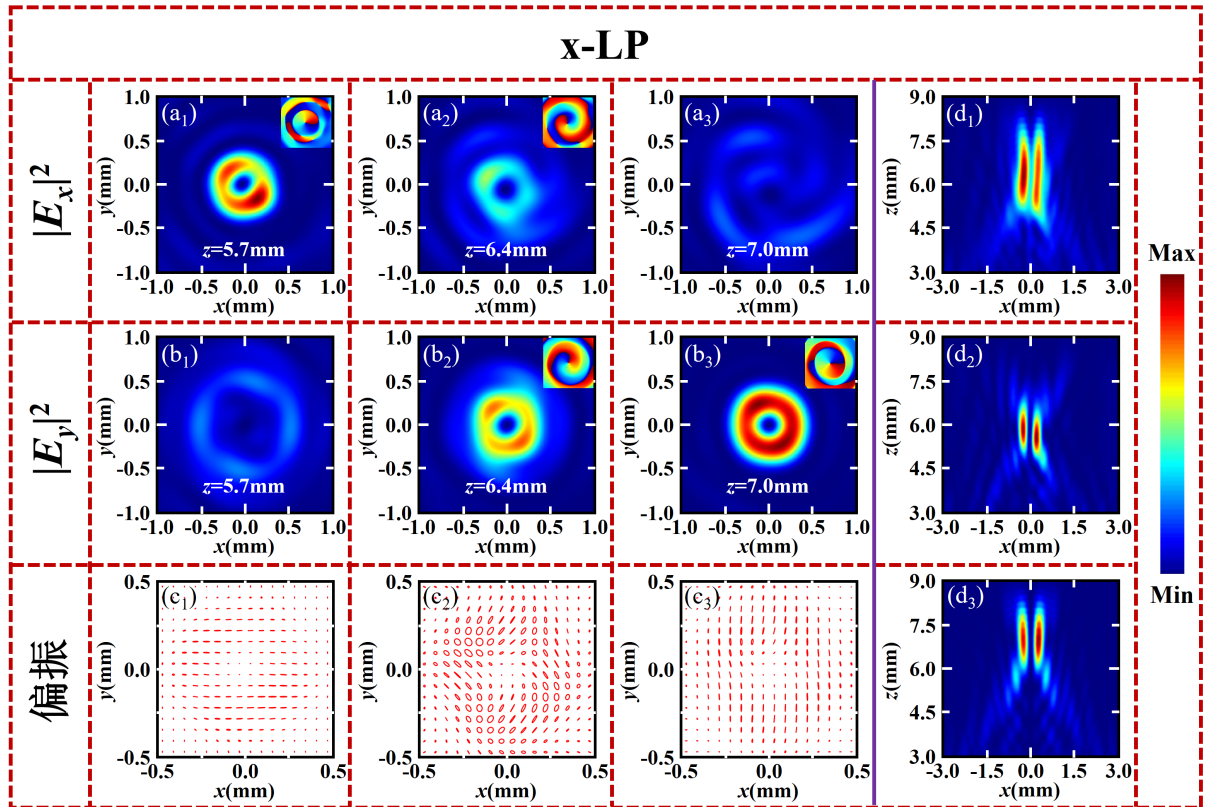


Figure 4. Simulation results of the geometric phase metasurface for orthogonal linear polarization evolution with varying topological charges: (a₁)~(a₃) Electric field intensity and phase distributions of the Ex-component observed in three distinct planes under x-polarized illumination; (b₁)~(b₃) Electric field intensity and phase distributions of the Ey-component observed in three distinct x-y planes under x-polarized illumination; (c₁)~(c₃) Calculated polarization distribution maps in three distinct x-y planes under x-polarized illumination; (d₁)~(d₃) Electric field intensity distributions of the vortex total field and Ex/Ey components in the x-z plane under x-polarized illumination

图 4. 基于几何相位的不同拓扑荷数的正交线偏振演化超表面仿真结果: (a₁)~(a₃) x 偏振光入射下在三个不同的 x-y 平面内观察到的 Ex 分量电场强度分布图和相位分布图; (b₁)~(b₃) x 偏振光入射下在三个不同的 x-y 平面内观察到的 Ey 分量电场强度分布图和相位分布图; (c₁)~(c₃) x 偏振光入射下在三个不同的 x-y 平面内通过计算得到的偏振分布图; (d₁)~(d₃) x 偏振光入射下在 x-z 平面内分别得到的涡旋总场和 Ex、Ey 分量场的电场强度分布图

图 4 展示了具有相反拓扑荷数的涡旋光沿传播方向的正交线偏振态演化仿真结果。与上述的仿真过程一致，最终展示的结果为电场强度分布和相位分布图。在图 4(a₁)~(a₃)中，提取了 Ex 分量电场的强度分布，结合每个场图右上角对应的相位分布图，通过观察可以发现，在 $z = 5.7 \text{ mm}$ 处，生成了一束拓扑荷数为 +1 的涡旋光，经过一段距离的传播，在 $z = 6.4 \text{ mm}$ 处可以看出涡旋的形状产生了变形，这是由于 Ex 分量场的强度逐渐下降且向拓扑荷数为 -1 的涡旋逐渐过渡导致的，但是从相位部分还可以明显看出此时的涡旋拓扑荷数依然为 +1，紧接着沿传播方向观察， $z = 7.0 \text{ mm}$ 处的 Ex 分量电场强度分布图已经几乎消失。现在来分析 Ey 分量电场的强度分布状态，如图 4(b₁)~(b₃)所示，在 $z = 5.7 \text{ mm}$ 处经过电场强度的归一化处理，同样得到几乎为零的电场强度，经过逐渐传播，在 $z = 6.4 \text{ mm}$ 平面内观察到了涡旋的产生，此时涡旋的拓扑荷数为 -1，与 Ex 分量场拓扑荷数为 +1 的涡旋相互叠加，形成了演化的中间态，最终在 $z = 7.0 \text{ mm}$ 处观察到仅有 Ey 分量电场的涡旋强度分布图，且拓扑荷数为 -1，至此完成了 x 偏振状态涡旋 ($m = +1$) 到 y 偏振状态涡旋 ($m = -1$) 的演化。由于纳米柱的长宽比直接影响偏振转换的效率，所选择的长宽度在 0.6 THz 的相位差接近于 π ，故本文所设计的结构并不是非常理想状态下的参数设置，对仿真的结果有一定的影响，后续可以对精度进行更为细小的扫描来优化结构参数。

图 4(c₁)~(c₃)展示了三个不同平面的场图经 MATLAB 计算后的偏振状态分布情况, 其中, 由于所设计的超表面结构数量上的限制, 产生涡旋的强度分布不是非常的均匀, 导致中间态出现了一些非 45 度线偏振的状态, 但其中的一部分也证实了中间态涡旋的偏振状态。为了更清晰地展示演化的过程, 图 4(d₁)~(d₃)给出了 x - z 平面内的总场和 E_x 分量、 E_y 分量场的强度分布图。

4. 结论

综上所述, 本文提出了一种基于几何相位超构表面的设计, 实现了电磁波在纵向传播过程中同步调控聚焦、涡旋产生及其偏振态动态演化的功能。值得注意的是, 该设计仅利用几何相位调制打破了自旋锁定的限制, 通过复振幅叠加的方法, 实现了正交线偏振演化的调控。进一步分析 FDTD 的仿真结果发现, 在 x 偏振太赫兹波入射时, 超表面可沿传播方向实现正交线偏振态演化(x 偏振焦点逐渐过渡为 y 偏振涡旋), 同时设计并验证了具有共轭拓扑荷数($m = \pm 1$)的涡旋正交线偏振态演化的调控功能。与现有的调控技术相比, 该设计仅利用几何相位实现了偏振解耦, 并突破了传统超表面在纵向偏振操控上的限制, 与纵向标量场的调控相比, 该设计可以同时操纵振幅、相位、偏振及拓扑荷的多维能力, 为三维结构光场调控、多自由度光场编码及可切换光控器件(如动态全息、量子通信)的发展提供了新思路, 同时为深入探索光-物质相互作用中的偏振动力学开辟了新的实验平台。

参考文献

- [1] Chen, X., Chen, M., Mehmood, M.Q., Wen, D., Yue, F., Qiu, C., *et al.* (2015) Longitudinal Multifoci Metalens for Circularly Polarized Light. *Advanced Optical Materials*, **3**, 1201-1206. <https://doi.org/10.1002/adom.201500110>
- [2] Li, S., Li, X., Wang, G., Liu, S., Zhang, L., Zeng, C., *et al.* (2018) Multidimensional Manipulation of Photonic Spin Hall Effect with a Single-Layer Dielectric Metasurface. *Advanced Optical Materials*, **7**, Article ID: 1801365. <https://doi.org/10.1002/adom.201801365>
- [3] Zhang, Z., Wen, D., Zhang, C., Chen, M., Wang, W., Chen, S., *et al.* (2018) Multifunctional Light Sword Metasurface Lens. *ACS Photonics*, **5**, 1794-1799. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b01536>
- [4] Zang, X., Ding, H., Intaravanne, Y., Chen, L., Peng, Y., Xie, J., *et al.* (2019) A Multi-Foci Metalens with Polarization-Rotated Focal Points. *Laser & Photonics Reviews*, **13**, Article ID: 1900182. <https://doi.org/10.1002/lpor.201900182>
- [5] Yao, B., Zang, X., Li, Z., Chen, L., Xie, J., Zhu, Y., *et al.* (2020) Dual-Layered Metasurfaces for Asymmetric Focusing. *Photonics Research*, **8**, 830-843. <https://doi.org/10.1364/prj.387672>
- [6] Yue, F., Wen, D., Zhang, C., Gerardot, B.D., Wang, W., Zhang, S., *et al.* (2017) Multichannel Polarization-Controllable Superpositions of Orbital Angular Momentum States. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1603838. <https://doi.org/10.1002/adma.201603838>
- [7] Devlin, R.C., Ambrosio, A., Rubin, N.A., Mueller, J.P.B. and Capasso, F. (2017) Arbitrary Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion of Light. *Science*, **358**, 896-901. <https://doi.org/10.1126/science.aao5392>
- [8] Zhang, K., Yuan, Y., Ding, X., Li, H., Ratni, B., Wu, Q., *et al.* (2020) Polarization-Engineered Noninterleaved Metasurface for Integer and Fractional Orbital Angular Momentum Multiplexing. *Laser & Photonics Reviews*, **15**, Article ID: 2000351. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000351>
- [9] Zhu, Y., Lu, B., Fan, Z., Yue, F., Zang, X., Balakin, A.V., *et al.* (2022) Geometric Metasurface for Polarization Synthesis and Multidimensional Multiplexing of Terahertz Converged Vortices. *Photonics Research*, **10**, Article No. 1517. <https://doi.org/10.1364/prj.455459>
- [10] Cheng, K., Liu, Z., Hu, Z., Cao, G., Wu, J. and Wang, J. (2022) Generation of Integer and Fractional Perfect Vortex Beams Using All-Dielectric Geometrical Phase Metasurfaces. *Applied Physics Letters*, **120**, Article ID: 201701. <https://doi.org/10.1063/5.0094549>
- [11] Sun, B., Zang, X., Lu, B., Chi, H., Zhou, Y., Zhu, Y., *et al.* (2023) Generalized Terahertz Perfect Vortices with Transmutable Intensity Profiles Based on Spin-decoupled Geometric Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article ID: 2301048. <https://doi.org/10.1002/adom.202301048>
- [12] Wen, D., Yue, F., Li, G., Zheng, G., Chan, K., Chen, S., *et al.* (2015) Helicity Multiplexed Broadband Metasurface Holograms. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8241. <https://doi.org/10.1038/ncomms9241>
- [13] Zhao, R., Sain, B., Wei, Q., Tang, C., Li, X., Weiss, T., *et al.* (2018) Multichannel Vectorial Holographic Display and

- Encryption. *Light: Science & Applications*, **7**, Article No. 95. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0091-0>
- [14] Zhao, H., Zhang, C., Guo, J., Liu, S., Chen, X. and Zhang, Y. (2019) Metasurface Hologram for Multi-Image Hiding and Seeking. *Physical Review Applied*, **12**, Article ID: 054011. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.12.054011>
- [15] So, S., Kim, J., Badloe, T., Lee, C., Yang, Y., Kang, H., *et al.* (2023) Multicolor and 3D Holography Generated by Inverse-Designed Single-Cell Metasurfaces. *Advanced Materials*, **35**, Article ID: 2208520. <https://doi.org/10.1002/adma.202208520>
- [16] Yang, H., He, P., Ou, K., Hu, Y., Jiang, Y., Ou, X., *et al.* (2023) Angular Momentum Holography via a Minimalist Metasurface for Optical Nested Encryption. *Light: Science & Applications*, **12**, Article No. 79. <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01125-2>
- [17] Yin, Y., Jiang, Q., Wang, H., Liu, J., Xie, Y., Wang, Q., *et al.* (2024) Multi-Dimensional Multiplexed Metasurface Holography by Inverse Design. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2312303. <https://doi.org/10.1002/adma.202312303>
- [18] Lin, X., Rivenson, Y., Yardimci, N.T., Veli, M., Luo, Y., Jarrahi, M., *et al.* (2018) All-Optical Machine Learning Using Diffractive Deep Neural Networks. *Science*, **361**, 1004-1008. <https://doi.org/10.1126/science.aat8084>
- [19] Qian, C., Lin, X., Lin, X., Xu, J., Sun, Y., Li, E., *et al.* (2020) Performing Optical Logic Operations by a Diffractive Neural Network. *Light: Science & Applications*, **9**, Article No. 59. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0303-2>
- [20] Luo, X., Hu, Y., Ou, X., Li, X., Lai, J., Liu, N., *et al.* (2022) Metasurface-Enabled On-Chip Multiplexed Diffractive Neural Networks in the Visible. *Light: Science & Applications*, **11**, Article No. 158. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00844-2>
- [21] Zhu, Y., Zang, X., Chi, H., Zhou, Y., Zhu, Y. and Zhuang, S. (2023) Metasurfaces Designed by a Bidirectional Deep Neural Network and Iterative Algorithm for Generating Quantitative Field Distributions. *Light: Advanced Manufacturing*, **4**, 104-114. <https://doi.org/10.37188/lam.2023.009>
- [22] He, C., Zhao, D., Fan, F., Zhou, H., Li, X., Li, Y., *et al.* (2024) Pluggable Multitask Diffractive Neural Networks Based on Cascaded Metasurfaces. *Opto-Electronic Advances*, **7**, Article ID: 230005. <https://doi.org/10.29026/oea.2024.230005>
- [23] Chi, H., Zang, X., Zhang, T., Wang, G., Fan, Z., Zhu, Y., *et al.* (2024) Metasurface Enabled Multi-Target and Multi-Wavelength Diffraction Neural Networks. *Laser & Photonics Reviews*, **19**, Article ID: 2401178. <https://doi.org/10.1002/lpor.202401178>
- [24] Zheng, C., Li, J., Liu, J., Li, J., Yue, Z., Li, H., *et al.* (2022) Creating Longitudinally Varying Vector Vortex Beams with an All-Dielectric Metasurface. *Laser & Photonics Reviews*, **16**, Article ID: 2200236. <https://doi.org/10.1002/lpor.202200236>
- [25] Li, H., Duan, S., Zheng, C., Li, J., Xu, H., Song, C., *et al.* (2023) Longitudinal Manipulation of Scalar to Vector Vortex Beams Evolution Empowered by All-Silicon Metasurfaces (Advanced Optical Materials 22/2023). *Advanced Optical Materials*, **11**, Article ID: 2301368. <https://doi.org/10.1002/adom.202370091>