

# 基于双焦点聚焦的偏振无关可变焦光纤超表面

陶文豪

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1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月8日

## 摘要

传统光纤在引导光方面具有优异的性能, 已广泛应用于长距离光通信。虽然光纤可以有效地传输光, 但其功能受到铁芯和包层材料(如锗掺杂硅和硅玻璃)介电性能的限制。光纤通过在光纤尖端集成超表面, 正在成为纳米光子学和光纤领域的重要光耦合平台。为了提高对自旋电磁波的控制, 本研究设计了一种可直接在光纤端面集成的超表面。在1550 nm波长的入射光照射下, 可实现偏振无关的双焦点聚焦, 焦距为10  $\mu\text{m}$ 。同时, 通过改变超表面周围的介质折射率还可以实现连续变焦功能, 使得空间光场的连续调制成为可能。随着通信能力的提高, 具有多自旋光束的独立操控光纤超表面能够在多目标探测雷达系统和多目标多输入多输出(MIMO)通信中得到实际应用。

## 关键词

光纤超表面, 传输相位, 双焦点变焦, 动态调控, 偏振无关

# Polarization-Independent Varifocal Metafiber Based on Bifocal Focusing

Wenhao Tao

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

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2025; accepted: May 1<sup>st</sup>, 2025; published: May 8<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Conventional optical fiber has excellent performance in guiding light and has been widely employed for long-distance optical communication. Although the optical fiber is efficient for transmitting light, its functionality is limited by the dielectric properties of the core's and cladding's materials (e.g., germanium-doped silicon and silica glasses). Metafibers, by integrating metasurface at the optical fiber tip, are emerging as significant optical coupling platforms for nanophotonics and fiber-optic communities. To enhance the control over spin electromagnetic waves, here we have designed a metasurface that

can be directly integrated into the end face of an optical fiber. Under the illumination of incident light with a wavelength of 1550 nm, polarization-independent bifocal focusing can be achieved with a focal length of 10  $\mu\text{m}$ . Meanwhile, by changing the refractive index of the medium surrounding the metasurface, the continuous zoom function can also be realized, making it possible to continuously modulate the spatial light field. With the improvement of communication capabilities, the metafiber with independent manipulation of multi-spin beams can find practical applications in multi-target detection radar systems and multi-target multiple-input multiple-output (MIMO) communication.

## Keywords

Metafiber Metasurface, Propagation Phase, Bifocal Zooming, Dynamic Control, Polarization-Independent

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

光纤是一种成熟的高效平台,可用于引导光并允许高带宽的光传输,常用于低衰减的长距离通信[1]。此外,传统的光纤也被广泛应用于光纤激光器[2]、光纤成像和内窥镜[3],以及光纤激光手术[4]。然而,光纤波导的光学特性,如相位、振幅、偏振状态和模态分布,在光纤拉伸制作后不能改变。此外,透射光的光斑尺寸是发散的,并受到介电铁芯衍射极限的限制。

超表面通过调整元原子的形状、大小和空间排列参数,可以在亚波长尺度上操纵光场的相位、振幅和偏振[5]。在过去的十年中,大量基于超表面的新器件和功能被证明可以调制空间和/或时间域的光场,包括全息显示[6]、异常折射/反射超表面[7]-[9]、超透镜[10]-[12]、偏振器[13]-[15]等。超表面具有一个重要的优势,它可以利用单一的平面结构来实现多功能,这大大降低了结构的复杂性,有利于光学系统的小型化和集成化。除了开发新功能和增强动态可调性外,目前,将超表面与传统光电器件和系统集成,正成为推动超表面工程化和工业应用的重要动力。在越来越先进的微/纳米制造技术的帮助下,超表面已经可以直接在光纤尖端[16]、半导体激光器[17]和 CMOS 相机[18]上制造。其中超光纤,即集成在光纤尖端的超表面,由于在“光纤上的实验室”方向的巨大潜力,近年来引起了大家的强烈关注[19]。

在这里,我们提出并验证了通过同时操作入射光的相位、偏振来实现面向光纤的双焦点变焦器件。这种器件由传输超表面构成,不同于由相同结构单元组成的几何超表面,传输超表面由不同大小的微棒组成,并且通过对微棒的合适排列来实现相位、偏振和能量通量的操纵。我们设计的面向光纤的双焦点变焦超表面可以在通信波长为 1550 nm 的频点下工作,并且对于入射光偏振态的响应不敏感。与单焦点聚焦相比,通过调节双焦点的间距、强度比和相对相位,可实时控制微粒间相互作用力(如排斥/吸引),适用于微流控分选、细胞相互作用研究等复杂场景。同时,通过改变超表面周围介质的折射率还可以实现变焦功能。在实际应用中,活性材料,如液晶和相变材料等,可以作为周围介质对光场进行调控,使未来实现连续可调光纤超表面成为可能。

## 2. 设计原理

### 2.1. 光纤超表面示意图

设计的光纤超表面如图 1 所示,基于传输超表面的双焦点变焦,光纤超表面能够在不同偏振状态下

产生双焦点聚焦现象。我们所设计的结构具有与光纤端面兼容的特性, 得益于微纳加工技术的发展, 可以通过多种方式在光纤端面加工超表面, 如聚焦离子束刻蚀、双光子打印和紫外固化粘合等。其中对于紫外固化粘合技术关键的挑战可能是对齐问题。事实上, 利用成熟的显微镜和运动控制技术, 对准可以很好地进行。当线偏振(左/右旋圆偏振)光正向入射时, 可以产生两个焦距都为 10  $\mu\text{m}$  的焦点, 坐标分别为(-5, 0, 10)和(5, 0, 10)。同时, 通过改变超表面周围的介质折射率, 还能实现连续变焦功能。

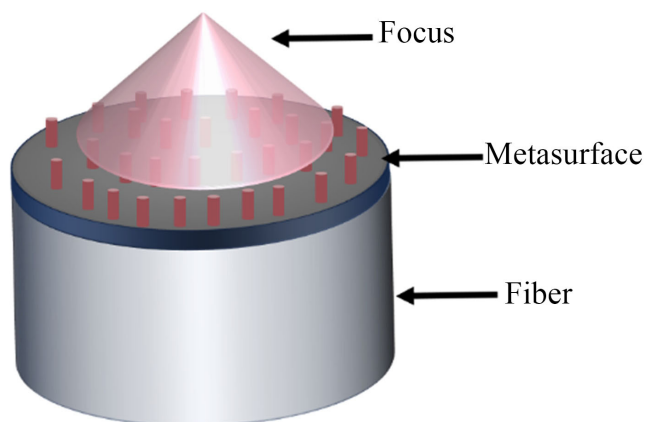


Figure 1. Schematic diagram of metafiber  
图 1. 光纤超表面示意图

## 2.2. 设计原理

在传输模式下, 超表面将准直入射光束聚焦到一个点, 即焦点。为了实现这一功能, 超表面需遵循下列公式对入射光的相位进行调控:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-x_L)^2 + (y-y_L)^2 + f_L^2} - f_L \quad (1)$$

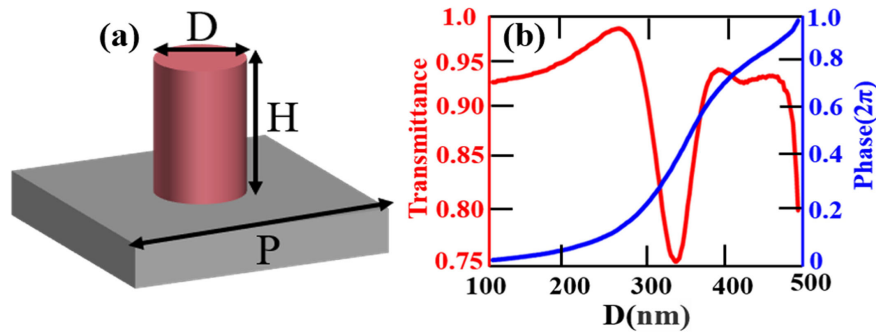
其中  $\lambda$  是工作波长,  $f_L$  为焦距。生成的焦点理论上位于  $(x_L, y_L, f_L)$ , 而  $(x_L, y_L)$  是  $x-y$  平面上的任意坐标。

如果一个超表面可以将入射的电磁波聚焦到多个焦点上, 则所需的传输相位可以写为:

$$\varphi^n = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + f_i^2} - f_i \right] \quad (2)$$

入射电磁波聚焦成  $n$  个焦点, 第  $i$  个焦点分布在  $(x_i, y_i, f_i)$  处。

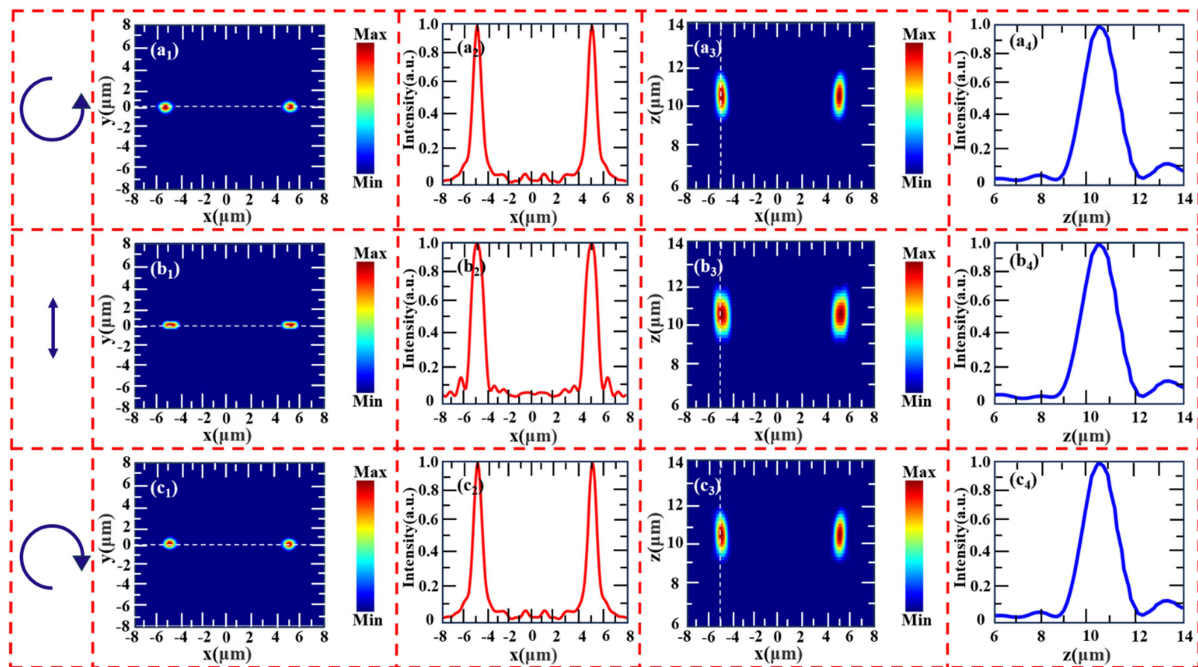
图 2(a)为单元格的结构示意图, 其中基底由二氧化硅材料组成, 纳米圆柱的构成材料为硅。为了构建产生偏振无关的聚焦光束的超表面器件, 我们使用了一组纳米柱来实现完整的  $2\pi$  相移和适当的高透射率(图 2(b))。根据传输相位公式, 为确保单元结构占空比取值范围严格限定在 0 到 1 之间, 并且实现精确的相位差调控( $\Delta\varphi = 2\pi$ ), 必须对纳米柱的高度参数进行严格约束和优化。同时, 还需考虑到过高的纳米柱会提高加工难度和成本, 过低的高度又会使纳米圆柱直径在周期范围内无法满足  $2\pi$  的相位覆盖。FDTD 方法计算的相应相位延迟和透射率强烈依赖于纳米柱宽度, 经过 FDTD 扫参优化后, 这些纳米柱的周期高度  $H$  固定为 750 nm, 直径  $D$  变化范围为 100~500 nm。为确保单元结构只激发 0 级衍射模式降低高阶衍射对聚焦效率的影响, 纳米圆柱的周期  $P$  设定为 700 nm。在 1550 nm 入射光照射下, 可以实现  $2\pi$  的相位覆盖, 并且在直径范围内都具有较高的透射率。



**Figure 2.** Schematic diagrams of unit structure design, transmittance and phase: (a) Structure diagram of metasurface unit; (b) Variations of phase and transmittance with the diameter of nanorods

**图 2.** 单元结构设计及透过率及相位示意图: (a) 超表面单元结构图; (b) 相位和透射率随纳米柱直径的变化

### 3. 仿真结果分析



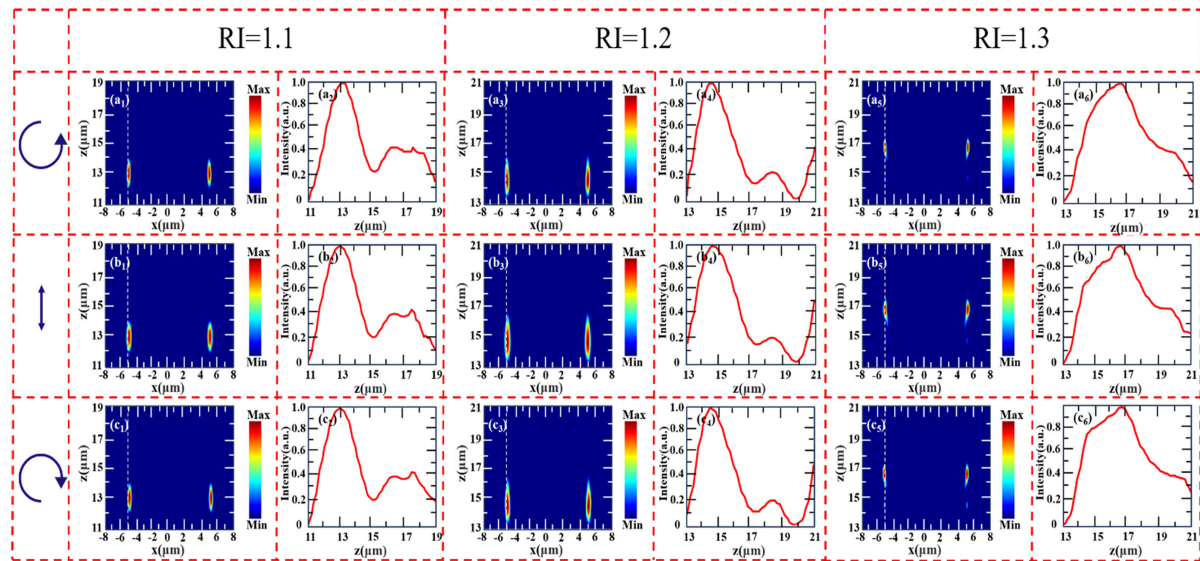
**Figure 3.** Electric-field intensity distributions for the polarization-independent metasurface that can generate transversely distributed two focal points: (a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>), (c<sub>1</sub>) are the corresponding electric-field intensity distributions at the x-y plane ( $z = 10 \mu\text{m}$ ) for the incidence of LP, LCP and RCP waves, respectively; (a<sub>2</sub>), (b<sub>2</sub>), (c<sub>2</sub>) are the corresponding normalized electric-field intensity distributions at line  $y = 0$  for the incidence of LP, LCP and RCP waves, respectively; (a<sub>3</sub>), (b<sub>3</sub>), (c<sub>3</sub>) are the corresponding electric-field intensity distributions at the x-z plane for the incidence of LP, LCP and RCP waves, respectively; (a<sub>4</sub>), (b<sub>4</sub>), (c<sub>4</sub>) are the corresponding normalized electric-field intensity distributions at line  $x = -5 \mu\text{m}$  for the incidence of LP, LCP and RCP waves, respectively

**图 3.** 能产生横向分布的双焦点的偏振无关超表面的电场强度分布: (a<sub>1</sub>)、(b<sub>1</sub>)、(c<sub>1</sub>)分别为左旋圆偏振、线偏振和右旋圆偏振光入射时在  $x$ - $y$  ( $z = 10 \mu\text{m}$ )平面上对应的电场强度分布; (a<sub>2</sub>)、(b<sub>2</sub>)、(c<sub>2</sub>)分别为左旋圆偏振、线偏振和右旋圆偏振光入射时沿  $y = 0$  处的归一化电场强度分布; (a<sub>3</sub>)、(b<sub>3</sub>)、(c<sub>3</sub>)分别为左旋圆偏振、线偏振和右旋圆偏振光入射时在  $x$ - $z$  平面上对应的电场强度分布; (a<sub>4</sub>)、(b<sub>4</sub>)、(c<sub>4</sub>)分别为左旋圆偏振、线偏振和右旋圆偏振光入射时沿  $x = -5 \mu\text{m}$  处的归一化电场强度分布

作为可行性研究,我们首先讨论可以产生偏振无关双焦点的传输超表面。图 3 显示了双焦点聚焦的数值仿真结果。为了验证我们提出的方法,设计了一种由  $50 \times 50$  纳米柱(具有不同大小的直径)组成的超

表面来生成所需的相位分布,工作频率为 1550 nm。基于时域有限差分(FDTD)方法, FDTD 在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上空间网格分别设置为 100 nm、100 nm、150 nm,边界条件设置为完美匹配层。为了保证结果的收敛性,时间步长和模拟时间分别设置为 0.204759 fs 和 1000 fs。偏振无关的双焦点聚焦参数预先设计如下:  $x_1 = -x_2 = 5 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $y_1 = y_2 = 0$ 、 $f_1 = f_2 = 10 \text{ } \mu\text{m}$ 。理论上,设计的偏振无关的超表面可以在线偏振(左旋圆偏振、右旋圆偏振)波的照射下在  $(-5, 0, 10)$  和  $(5, 0, 10)$  位置处生成两个聚焦焦点。图 3(a<sub>1</sub>)显示了我们设计的超表面在左旋圆偏振波入射时  $x$ - $y$  平面( $z = 10 \text{ } \mu\text{m}$ )上的模拟电场强度分布,两个焦点分别位于  $(-5, 0, 10)$  和  $(5, 0, 10)$  处。从仿真结果来看聚焦的效果较好,且都分布在理想的设计位置。图 3(a<sub>2</sub>)显示了沿  $y = 0$  计算的归一化电场强度分布,分别在  $x = -5 \text{ } \mu\text{m}$  和  $x = 5 \text{ } \mu\text{m}$  处观察到归一化强度的峰值,进一步证实了双焦点的生成。图 3(a<sub>3</sub>)显示了  $x$ - $z$  平面上的模拟电场强度分布,图中可以看到两个焦点很好地分布在预设的位置处。从沿  $x = -5 \text{ } \mu\text{m}$  计算的归一化电场强度(见图(a<sub>4</sub>))可以看到两个焦点聚焦在了  $z = 10.5 \text{ } \mu\text{m}$  附近处。这里理论设计和数值模拟之间的微小焦距差异可以归因于每个微棒并非完美半波片。仿真结果验证了我们所设计的结构具有双焦点聚焦功能,并且焦点位置与预设的位置几乎一致。

为了进一步验证我们设计的结构具有偏振无关的特性,对入射光的偏振态进行调整,确认是否仍然能够产生双焦点。如图 3(b<sub>1</sub>)所示,当入射光切换为线偏振时,传输超表面仍然可以生成两个焦点,并且聚焦位置在  $(-5, 0)$  和  $(5, 0)$ ,符合预期设定。同样地,为了验证当入射光偏振态发生变化时焦距是否随之发生改变,我们在  $x$ - $z$  面上设置监视器查看电场强度分布。从图 3(b<sub>3</sub>)~(b<sub>4</sub>)中可以看到偏振态的变化没有改变焦距,两个焦点聚焦在  $10 \text{ } \mu\text{m}$  附近处。图 3(c<sub>1</sub>)~(c<sub>4</sub>)为右旋圆偏振光入射的仿真结果,从图中可以看到仿真结果与理论一致。上述仿真结果很好地证明了我们设计的传输超表面能够实现偏振无关的双焦点聚焦。



**Figure 4.** Simulation results of the electric field intensity distribution of the varifocal metasurface based on polarization-independent bifocal focusing: (a<sub>1</sub>)~(a<sub>6</sub>) are the electric field intensity distributions when left-handed circularly polarized (LCP) light is incident with the refractive index around the metasurface being 1.1, 1.2, and 1.3, respectively; (b<sub>1</sub>)~(b<sub>6</sub>) are the electric field intensity distributions when linearly polarized (LP) light is incident with the refractive index around the metasurface being 1.1, 1.2, and 1.3, respectively; (c<sub>1</sub>)~(c<sub>6</sub>) are the electric field intensity distributions when right-handed circularly polarized (RCP) light is incident with the refractive index around the metasurface being 1.1, 1.2, and 1.3, respectively

**图 4.** 基于偏振无关双焦点聚焦的可变焦超表面的电场强度分布仿真结果: (a<sub>1</sub>)~(a<sub>6</sub>) 超表面周围折射率分别为 1.1、1.2、1.3 时左旋圆偏振光入射时的电场强度分布; (b<sub>1</sub>)~(b<sub>6</sub>) 超表面周围折射率分别为 1.1、1.2、1.3 时线偏振光入射时的电场强度分布; (c<sub>1</sub>)~(c<sub>6</sub>) 超表面周围折射率分别为 1.1、1.2、1.3 时右旋圆偏振光入射时的电场强度分布

迄今为止,大多数功能介质超表面都是基于静态设计,通过几何参数来定义如纳米柱的形状、大小和阵列布局。然而,在许多实际应用中设备的动态可调性是至关重要的。这里,我们提出一种动态调控的方法,通过改变超表面周围介质折射率来实现动态变焦功能。仿真起始设置依旧采取上述参数,即聚焦在 $(-5, 0, 10)$ 和 $(5, 0, 10)$ 位置处。图 4(a<sub>1</sub>)显示了左旋圆偏振光入射,超表面周围介质折射率变为 1.1 时的  $x$ - $z$  平面电场强度分布。从图中可以看到折射率的改变并不影响双焦点的生成,并且在  $x$  方向上的聚焦位置仍然为 $-5\text{ }\mu\text{m}$  和  $5\text{ }\mu\text{m}$ 。但是从沿  $x = -5\text{ }\mu\text{m}$  的归一化电场强度分布(图 4(a<sub>2</sub>))中可以看到电场强度峰值位置发生明显变化,位于  $z = -13.5\text{ }\mu\text{m}$  处。同样地,图 4(a<sub>3</sub>)~(a<sub>6</sub>)显示了当周围折射率变为 1.2 和 1.3 时聚焦位置的变化,可以看到随着折射率的增加焦距在不断增大。在这里焦距变化的机理可以理解:超表面通过精心设计的纳米结构对入射光的相位(公式(1))进行调制,当周围折射率发生改变时,光在超表面附近的传播速度也会相应改变,从而使得相位的进一步变化,最终导致焦距的改变。上述仿真结果验证了我们提出的动态调控超表面方法的可行性。为了进一步验证动态调控方法具有偏振无关特性,我们改变入射光的偏振态,然后再对其进行仿真研究。当线偏振光入射到超表面上时,在  $x$ - $z$  平面的  $x = -5\text{ }\mu\text{m}$  和  $x = 5\text{ }\mu\text{m}$  处显示出明显的双焦点聚焦分布。同时从  $x = -5\text{ }\mu\text{m}$  的归一化电场强度分布(图 4(b<sub>2</sub>))中可以看到强度峰值的位置与左旋圆偏振光入射时几乎一致,证明了双焦点变焦效果具有偏振无关的性质。图 4(b<sub>3</sub>)~(b<sub>6</sub>)显示了线偏振光入射时超表面周围折射率进一步变化对焦点的影响,从图中可以看到变焦效果的普遍性。最后,我们对右旋圆偏振光入射时的电场分布进行仿真分析,从图 4(c<sub>1</sub>)~(c<sub>6</sub>)中可以看到仿真结果较好,双焦点聚焦位置符合预期设定且焦距随着折射率改变不断变化。上述结果证明了我们提出的动态调控超表面方法的可行性,同时调控方法还具有偏振无关特性。

#### 4. 结语

总之,我们提出了一种基于传输相位调控的全介质超表面设计方案,成功实现了偏振无关的双焦点聚焦及动态变焦功能。通过系统的数值仿真证实,在  $1550\text{ nm}$  通信波段,该结构能够在线偏振光(包括左旋和右旋圆偏振光)照射下,同时在预设位置产生两个清晰的聚焦光斑,且通过调控超表面周围介质的折射率可以实现焦点位置的连续可调,展现出优异的动态调控特性。所提出的光纤超表面是一种强大的工具,不仅可以灵活地控制电磁波前进,而且可以为操纵电磁波的传播方向打开一个新的窗口。这种设计方法为超表面调控光纤中电磁波的位置和方向提供了新的思路,这种超表面和光纤的集成将为光通信和光传感应用铺平道路,并在具有先进多功能的光纤器件的小型化方面具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] Yang, J., Ghimire, I., Wu, P.C., Gurung, S., Arndt, C., Tsai, D.P., *et al.* (2019) Photonic Crystal Fiber Metalens. *Nanophotonics*, **8**, 443-449. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0204>
- [2] Chong, A., Buckley, J.R., Renninger, W.H. and Wise, F.W. (2006) All-Normal-Dispersion Femtosecond Fiber Laser. *Frontiers in Optics*, **14**, 10095-10100. [https://doi.org/10.1364/Is.2006.pdp\\_fa1](https://doi.org/10.1364/Is.2006.pdp_fa1)
- [3] Papadopoulos, I.N., Farahi, S., Moser, C. and Psaltis, D. (2013) High-Resolution, Lensless Endoscope Based on Digital Scanning through a Multimode Optical Fiber. *Biomedical Optics Express*, **4**, 260-270. <https://doi.org/10.1364/boe.4.000260>
- [4] Fried, N.M. and Murray, K.E. (2005) High-Power Thulium Fiber Laser Ablation of Urinary Tissues at  $1.94\text{ }\mu\text{m}$ . *Journal of Endourology*, **19**, 25-31. <https://doi.org/10.1089/end.2005.19.25>
- [5] Yu, N., Genevet, P., Kats, M.A., Aieta, F., Tetienne, J., Capasso, F., *et al.* (2011) Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science*, **334**, 333-337. <https://doi.org/10.1126/science.1210713>
- [6] Genevet, P. and Capasso, F. (2015) Holographic Optical Metasurfaces: A Review of Current Progress. *Reports on Progress in Physics*, **78**, Article 024401. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/2/024401>
- [7] Zhao, Y. and Alù, A. (2011) Manipulating Light Polarization with Ultrathin Plasmonic Metasurfaces. *Physical Review*

- B, **84**, Article 205428. <https://doi.org/10.1103/physrevb.84.205428>
- [8] Wan, W., Gao, J. and Yang, X. (2016) Full-Color Plasmonic Metasurface Holograms. *ACS Nano*, **10**, 10671-10680. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05453>
  - [9] West, P.R., Stewart, J.L., Kildishev, A.V., Shalaev, V.M., Shkunov, V.V., Strohkendl, F., *et al.* (2014) All-Dielectric Subwavelength Metasurface Focusing Lens. *Optics Express*, **22**, 26212-26221. <https://doi.org/10.1364/oe.22.026212>
  - [10] Li, Z., Palacios, E., Butun, S. and Aydin, K. (2015) Visible-Frequency Metasurfaces for Broadband Anomalous Reflection and High-Efficiency Spectrum Splitting. *Nano Letters*, **15**, 1615-1621. <https://doi.org/10.1021/nl5041572>
  - [11] Yu, N., Aieta, F., Genevet, P., Kats, M.A., Gaburro, Z. and Capasso, F. (2012) A Broadband, Background-Free Quarter-Wave Plate Based on Plasmonic Metasurfaces. *Nano Letters*, **12**, 6328-6333. <https://doi.org/10.1021/nl303445u>
  - [12] Zheng, J., Ye, Z., Sun, N., Zhang, R., Sheng, Z., Shieh, H.D., *et al.* (2014) Highly Anisotropic Metasurface: A Polarized Beam Splitter and Hologram. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 6491. <https://doi.org/10.1038/srep06491>
  - [13] Allen, L., Beijersbergen, M.W., Spreeuw, R.J.C. and Woerdman, J.P. (1992) Orbital Angular Momentum of Light and the Transformation of Laguerre-Gaussian Laser Modes. *Physical Review A*, **45**, 8185-8189. <https://doi.org/10.1103/physreva.45.8185>
  - [14] Koenig, S., Lopez-Diaz, D., Antes, J., Boes, F., Henneberger, R., Leuther, A., *et al.* (2013) Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate. *Nature Photonics*, **7**, 977-981. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.275>
  - [15] Lin, J., Genevet, P., Kats, M.A., Antoniou, N. and Capasso, F. (2013) Nanostructured Holograms for Broadband Manipulation of Vector Beams. *Nano Letters*, **13**, 4269-4274. <https://doi.org/10.1021/nl402039y>
  - [16] Principe, M., Consales, M., Micco, A., Crescitelli, A., Castaldi, G., Esposito, E., *et al.* (2016) Optical Fiber Meta-Tips. *Light: Science & Applications*, **6**, e16226-e16226. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.226>
  - [17] Koshelev, A., Calafiore, G., Piña-Hernandez, C., Allen, F.I., Dhuey, S., Sassolini, S., *et al.* (2016) High Refractive Index Fresnel Lens on a Fiber Fabricated by Nanoimprint Lithography for Immersion Applications. *Optics Letters*, **41**, 3423-3426. <https://doi.org/10.1364/ol.41.003423>
  - [18] Yuan, G.H., Rogers, E.T. and Zheludev, N.I. (2017) Achromatic Super-Oscillatory Lenses with Sub-Wavelength Focusing. *Light: Science & Applications*, **6**, e17036-e17036. <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.36>
  - [19] Mei, A., Li, X., Liu, L., Ku, Z., Liu, T., Rong, Y., *et al.* (2014) A Hole-Conductor-Free, Fully Printable Mesoscopic Perovskite Solar Cell with High Stability. *Science*, **345**, 295-298. <https://doi.org/10.1126/science.1254763>