

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514521

基于 Stokes 偏振探测的双波段超透镜 结构与性能分析*

祝航威^{1,2}, 杨梦雪², 董 杭², 何彦霖², 祝连庆^{1,2}

(1. 大连交通大学詹天佑学院(中车学院) 大连 116028; 2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

摘 要:针对传统偏振光导航传感器体积大、光学系统复杂及探测波段较窄等问题,开展了面向紫外至可见光的 Stokes 偏振探测超透镜的设计与性能分析研究。受帝王蝶复眼的偏振敏感机制启发,系统分析了该类蝶复眼结构对偏振光的解析特性,在此基础上提出并设计了一种可用于紫外与可见光双波段 Stokes 参数探测的超透镜。该超透镜以介质椭圆纳米柱为基本单元,通过其在紫外与可见光波段引入传播相位调制,仿生再现了蝶类复眼微绒毛阵列的偏振解析功能:每个透镜单元通过调控入射偏振光在两个正交方向上的相位响应,实现了对 Stokes 参数的并行探测与解算。研究利用 FDTD 软件对超透镜结构进行仿真优化,并系统分析了不同偏振入射角度下的线偏振度(DoLP)和偏振角(AoP)的响应特性。仿真结果表明,所设计超透镜在紫外-可见光波段下的平均透射率达 90%,最高聚焦效率可达 84%,在不同偏振入射角下的 DoLP 值介于 0.91~0.98, AoP 整体测量误差<2°。在制备与实验验证方面,采用磁控溅射、电子束曝光及等离子刻蚀等微纳加工工艺成功制备出超透镜样品并对其 Stokes 参数探测性能进行了实测评估测试。测试结果显示,在部分偏振态下 DOLP 平均相对误差最低为 1.7%, AoP 的平均相对误差为 12%。该研究不仅为紫外-可见光双波段偏振探测提供了新型光学器件设计方案,也为实现偏振光导航系统的小型化、集成化发展提供了重要的技术参考。

关键词:超透镜;偏振光导航;紫外-可见光;Stokes 探测

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Design and performance analysis of dual-band metalens structures based on Stokes polarization detection

Zhu Hangwei^{1,2}, Yang Mengxue², Dong Hang², He Yanlin², Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Zhan Tianyou College of Dalian Jiaotong University (CRRC College), Dalian 116028, China; 2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Addressing the issues of large size, complex optical systems, and limited detection bands in traditional polarization navigation sensors, this study conducts the design and performance analysis of a UV-visible dual-band metalens for Stokes polarization detection. Inspired by the polarization-sensitive mechanism of the monarch butterfly's compound eye, we systematically analyze the polarization sensitivity in the dorsal rim area of lepidopteran compound eyes and propose a metalens capable of Stokes detection in the ultraviolet to visible range. By employing dielectric elliptical nanopillars to introduce propagation phase modulation across both UV and visible bands, the device biomimetically replicates the polarization resolution capability of microvillar arrays in compound ommatidia. Each metasurface unit enables parallel detection and resolution of Stokes parameters by independently controlling the phase response of incident polarized light along two orthogonal directions. The metalens design is optimized through FDTD simulations, and its performance is evaluated by analyzing the DoLP and AoP under various incident polarization angles. Simulation results demonstrate that the metalens achieves an average transmittance of 90% across the ultraviolet-visible band, with a maximum focusing efficiency of 84%. The DoLP under varying incident polarization angles ranges from 0.91 to 0.98, while the overall AoP error remains below 2°. In terms of fabrication and experimental validation, this study employs micro-nano fabrication processes such as magnetron sputtering, electron-beam lithography,

收稿日期: 2025-09-21 Received Date: 2025-09-21

* 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0711200)项目资助

and plasma etching to fabricate metalens samples and carries out practical measurement and evaluation of their Stokes-parameter detection performance. Experimental results demonstrate minimum average relative errors of 1.7% for DoLP and 12% for AoP under partially polarized states. This work presents a novel optical-device design strategy for ultraviolet-visible dual-band polarimetric detection, while simultaneously offering a pivotal technical pathway toward the miniaturization and integration of polarization-based navigation systems.

Keywords: metalens; polarized light navigation; ultraviolet-visible; Stokes detection

0 引言

偏振作为光的基本特性之一,表现为光波电矢量的振动方向与光的传播方向的不对称性。偏振光携带丰富的光学信息,在医学^[1-2]、遥感^[3-4]、通信^[5]、导航^[6-7]等领域引起了研究人员的广泛关注。仿生偏振光导航技术通过模仿蝶类复眼对天空偏振光的感知能力,为卫星信号环境下的自主导航提供了新思路。然而,传统的偏振光导航传感器受限于体积大、光学系统复杂及动态范围不足等问题,难以满足微型化与高精度探测的需求^[8-9]。

近年来,超表面因其亚波长尺度下对光场的灵活调控能力,为偏振探测技术的小型化与集成化提供了新途径^[10-11]。尤其在可见光波段,超表面可通过设计纳米结构的各向异性响应,实现 Stokes 参量的单次测量,显著提升探测效率^[12]。然而,在复杂气象条件(如多云、雾霾)下,可见光波段的偏振信息易受大气散射干扰,信噪比急剧下降。相关研究表明,紫外波段(特别是 300~400 nm)的偏振模式受气溶胶影响较小,在恶劣天气中仍能保持较高的偏振度,可作为可见光偏振导航的有效补充^[13]。尽管现有紫外偏振探测器在 250~350 nm 波段下实现了高响应,但仍存在光学结构复杂等问题^[14]。

基于超表面的超透镜是一种由致密平面内的非均匀光学天线阵列组成的透镜^[15-16]。超透镜偏振探测技术为解决上述问题提供了可能。超透镜将超表面的相位调控能力与透镜的聚焦功能相结合,可在单个器件中实现多参量并行探测。2019 年 Guo 等^[17]提出了一种基于超表面的高效全矢量偏振分析仪,最大聚焦效率为 24%。2020 年 Chen 等^[18]设计了一种超薄平面多焦点超透镜用于偏振成像,透射率超 82%,线性偏振度超 98%。2020 年 Miyata 等^[19]提出一种基于复眼超表面偏振成像系统,在可见光波段下最高透射率达 68.4%。但是,以上介质型偏振探测元件均是在单一波长下工作,这也限制了其在复杂环境中的应用。2024 年 Hu 等^[20]提出一种用于可见光全彩偏振成像的消色差全 Stokes 超表面偏振器,在 450~650 nm 波长范围内实现宽带消色差,聚焦效率超 80%。尽管研究人员已利用超透镜实现了宽带消色差聚焦功能,但主要还是针对可见光波段的偏振信息探测,对复杂天气条件下的紫外信息探测仍鲜有研究。

为解决超透镜偏振探测器在波段覆盖范围上的这一关键瓶颈,基于蝶类生物复眼背部边缘区的偏振敏感机制,本文提出并设计了一种紫外-可见光 Stokes 探测超透镜,通过介质椭圆纳米柱在紫外和可见光波段引入传播相位调制,经过仿真数值分析超透镜阵列的线偏振度和偏振角性能,最后采用电子束曝光和等离子体刻蚀等工艺对其进行制备并通过实验进行了偏振性能测试,实现双波段 Stokes 参量的高精度解算。

1 双波段偏振消色差超透镜设计

1.1 仿生偏振探测机理分析

蝶类能够通过其复眼中的小眼阵列感知大气的偏振模式,从而获得偏振信息,结构如图 1(a)所示。小眼结构包括角膜、晶锥、小网膜细胞、感杆束和轴突。小网膜一般是由 8 个感光细胞组成,中央部分为感杆束结构,由细胞膜向中腔伸出大量微绒毛形成,如图 1(b)所示。感杆束的偏振敏感性基于其对偏振光的吸收。具体地,在感杆束组织横截面上,“垂直”细胞(V 细胞;受体 1 和 5 沿眼背-腹侧轴定向)是竖直排列的,而“水平”细胞(H 细胞;受体 3 和 7)是水平排列的,而“对角”细胞(D 细胞;受体 2、4、6 和 8)具有中间朝向^[21]。当天空光的偏振方向($\mathbf{E}$ 矢量)与微绒毛的长轴平行时,光子能最大程度地被吸收。偏振敏感的光感受器将光信号转化成电信号后,输入到偏振敏感(polarization-sensitive, POL)神经元进行进一步的信号处理,如图 1(b)所示,是蝶类 POL 神经元示意图。POL 神经元对 $\mathbf{E}$ 矢量方向的刺激显示正弦函数的响应,每间隔 90° 神经元兴奋或者抑制交替变化。POL 神经元的这种偏振对抗的响应,来自于复眼背部边缘区域(dorsal rim area, DRA)小眼中微绒毛方向正交的两组光感受器的对抗输入,而这些光感受器所调谐的 $\mathbf{E}$ 矢量方向互相垂直。本文研究基于超表面单元结构的相位调控机理,针对不同入射光对应设计四通道的偏振敏感超透镜阵列,模拟蝶类小眼的偏振光感知功能,可同时获取 4 个光矢量方向的偏振信息,实现偏振信息探测功能。

光波的任一偏振态都可以用 Stokes 矢量的 4 个参量表示,即为 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$,其中 S_0 为总光强, S_1, S_2 分别代表两个方向上的线偏振光, S_3 表示圆偏振光,而在自然界中偏振光的圆偏振含量极少, S_3 近似为 0。因此目标偏振参量测量可以转化为 Stokes 矢量元素的测量,其物

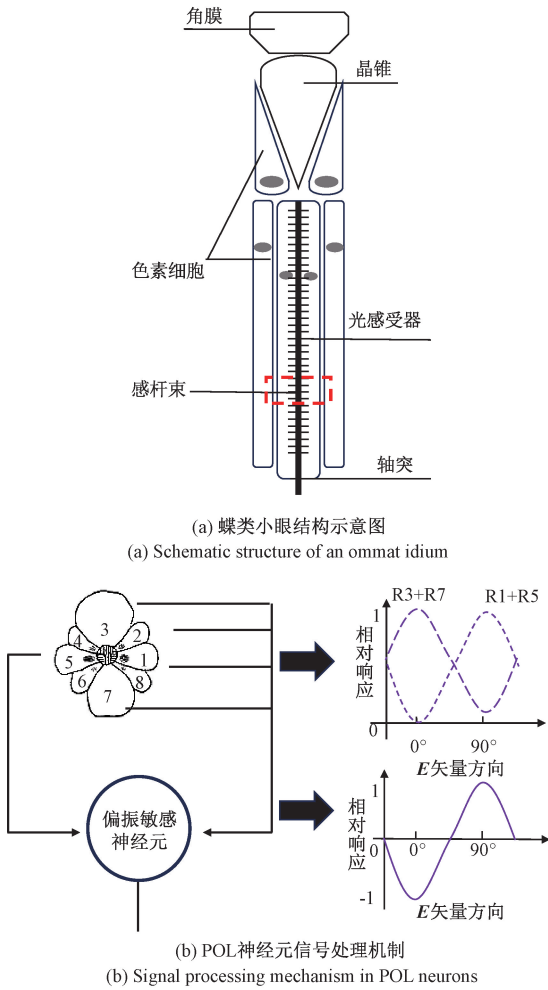


图1 蝶类复眼偏振探测机理

Fig. 1 Polarization detection mechanism in the compound eye of the monarch butterfly

理意义与计算方法可表示^[22]为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_{45^\circ} + I_{135^\circ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 和 I_{135° 对应图 2(a) 中的光强值, 而且 4 个参量可以直接通过电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 所探测到的光强数值计算得到。另外, 偏振的主要参量包括偏振度和偏振化方向。线偏振度 (degree of linear polarization, DoLP) 表示偏振光强度在光强中的比例, 偏振角 (angle of polarization, AoP) 表示偏振光振动方向与参考方向的夹角, 且均可由 Stokes 矢量参数表示为:

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2)$$

$$\text{AoP} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (3)$$

1.2 消色差超透镜阵列设计

基于对生物偏振敏感机理的分析, 仿生偏振光传感器的主要功能结构是滤波单元以及偏振信息检测单元, 它们分别模仿昆虫复眼中的滤波和 POL 神经元信号处理功能。滤波单元这部分在先前的研究中开展过相应工作, 可实现在紫外-可见光波段的高效透射^[23]。本文所设计的仿生紫外-可见光波段偏振消色差超透镜, 本质上是一种可以在紫外-可见光工作波段将对应透射光波段下的偏振信息通过超透镜阵列计算出 Stokes 参量用以求解偏振角以及线偏振度的光学元件。图 2(a) 为仿生偏振光传感器结构示意图, 配合图 2(b) 的 $x-z$ 截面图, 入射光先经过滤波器得到共振光谱, 再通过超透镜在焦距 f 处的焦平面上获取到紫外-可见光下的不同光强信息, 通过计算得到 Stokes 参量。如图 2(c) ~ (e) 所示, 分别表示紫外 (ultraviolet-visible, UV)、蓝光 (blue, B) 和绿光 (green, G) 波段下的四通道 (2×2) 的超透镜阵列, 以图 2(e) 的 UV 波段的入射光为例, 其中 f 为焦距, 焦距设置为 $300 \mu\text{m}$ 。该超透镜能实现对应的 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的光强度信息检测, 强度对应图 2(a) 中的 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 和 I_{135° 。

超透镜的相位公式一般可以表示为:

$$\varphi(r, \lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) \quad (4)$$

式中: r 是图 2(b) 中在 $x-y$ 平面上的单元结构距离衬底中心的长度; λ 是入射波长; f 是焦距。然而考虑到超透镜聚焦效率的稳定, 为减小色差带来的影响, 在对应波段下设计的超透镜相位分布中引入一个常量 φ_c , 通过选择合适尺寸的纳米柱, 用来补偿波长引入时引起的色差变化, 从而实现对应波段区间内的消色差超透镜, 因此式 (4) 表示为:

$$\varphi(r, \lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) + \varphi_c \quad (5)$$

而由于滤波器在实际制备过程中, 会引入工艺误差导致共振峰出现轻微漂移, 因此, 为确保在紫外波段的消色差, 将透镜的输入波段设置在 20 nm 波长范围内, 因此对应的 3 个区间的波长分别控制在 $[\lambda_{355}, \lambda_{375}]$ 、 $[\lambda_{430}, \lambda_{450}]$ 和 $[\lambda_{540}, \lambda_{560}]$ (波长单位为 nm), 而不同的入射波长如果聚焦在相同的焦距, 则会额外引入一个相位差 φ_{shift} 。因此, 需要修改相位分布 (r, λ), 使得其保证在紫外-可见 3 个波段下的入射光聚焦在同一个位置, 此时 3 个波段下的相位差可以表示为:

$$\varphi_{\text{lens}}(r, \lambda_i) = \varphi(r, \lambda_{\text{imax}}) + \Delta\varphi(r, \lambda_i), \quad i = \text{UV, B, G} \quad (6)$$

为此, 对应 3 个波段下的补偿相位可以表示成:

$$\Delta\varphi(r, \lambda_i) = -[2\pi\sqrt{r^2 + f^2} - f] \left(\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{\text{imax}}} \right) \quad (7)$$

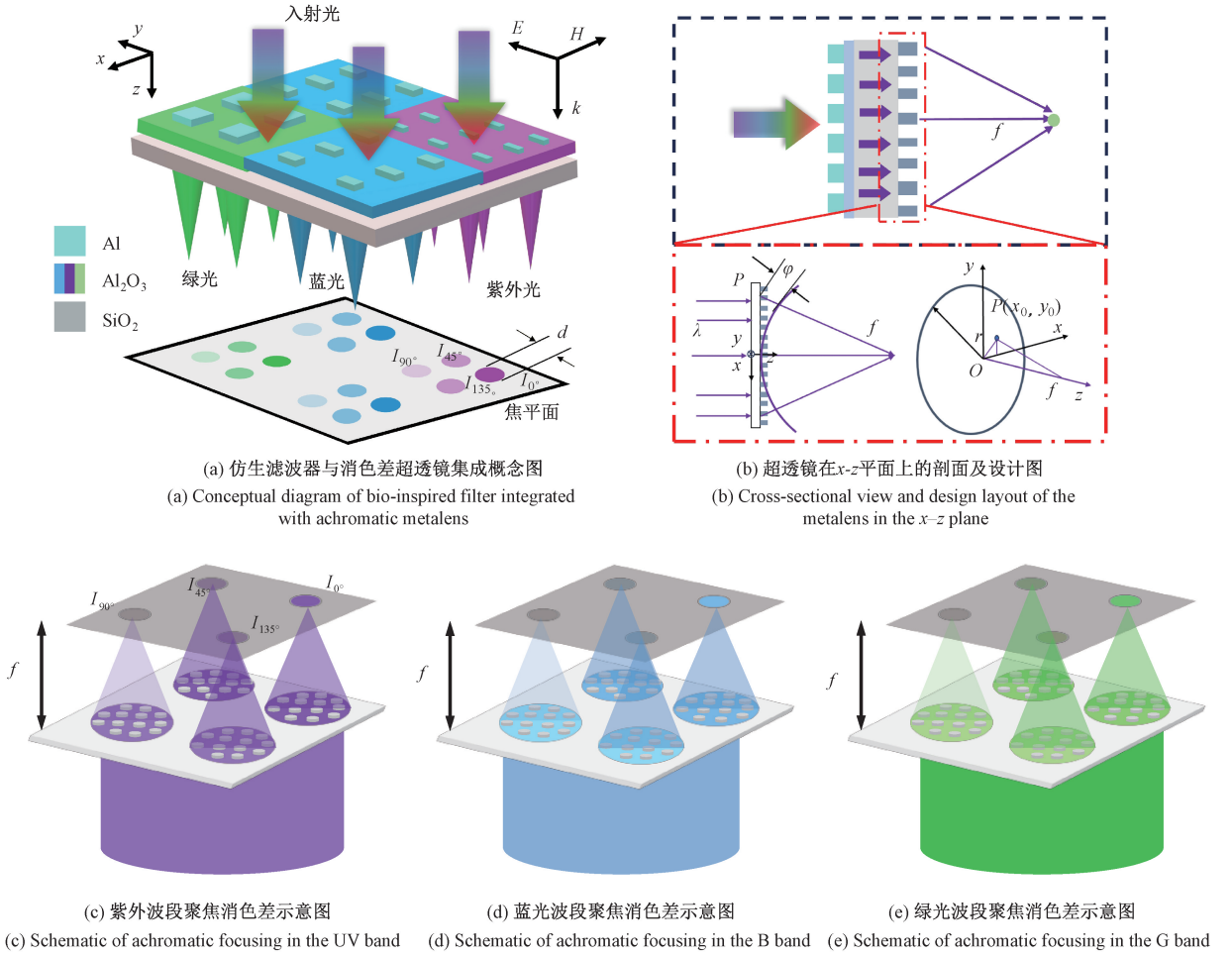


图 2 双波段消色差超透镜设计示意图

Fig. 2 Schematic of dual-band achromatic metalens design

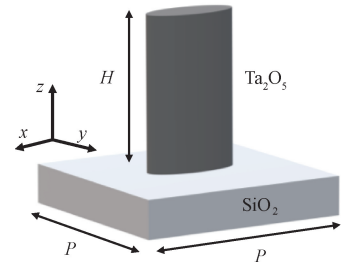
式(6)表明要在给定带宽 $\Delta\lambda_i = \lambda_{i\max} - \lambda_{i\min}$ 范围内实现消色差聚焦,光学元件需要提供的相位分布可分解为两部分:第1部分 $\varphi(r, \lambda_{i\max})$ 作为基础相位分布,其与对应入射波段的最大波长 $\lambda_{i\max}$ 相关;第2部分 $\Delta\varphi(r, \lambda_i)$ 作为工作波长函数与 $1/\lambda$ 近似呈现线性关系,该部分表征了任意波长 λ_i 与 $\lambda_{i\max}$ 之间的相位差,而且 $\Delta\varphi$ 是实现消色差的关键因素。可以将式(6)和(7)修改为:

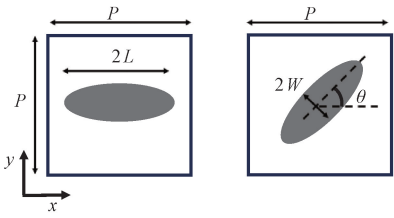
$$\varphi'(r, \lambda_i) = -\frac{1}{\lambda_i} [2\pi \sqrt{r^2 + f^2} - f] + \varphi_c(\lambda_i) \quad (8)$$

式中: $\varphi_c(\lambda_i)$ 是与波长唯一相关的优化因子,为了消除各个波长透镜中产生的色差,单元结构在不同波长下的相位分布应满足式(8),相位的分布根据单元结构的尺寸大小产生的传输相位提供。

本文所设计的消色差超透镜由 SiO_2 衬底上的周期为 P 、高度为 H 的椭圆纳米柱组成,高度 H 统一设置为 600 nm 。而 UV、B、G 这 3 个波段对应的周期分别设置为

200 、 380 和 410 nm 。为保证在紫外-可见光波段下的高效透射率,材料选择 Ta_2O_5 [24]。单元结构如图 3(a) 所示,图 3(b) 为单元结构在 x - y 平面的俯视图,通过改变中椭圆柱的长轴 $2L$ 、短轴 $2W$ 来调节椭圆柱的相位和透射率,转向角 θ 这里设置为 45° 和 135° ,目的为了使超透镜获取 45° 和 135° 的线偏振分量。





(b) 调控0°和45°偏振入射光的结构俯视图

(b) Top view of the structure for modulating 0° and 45° polarized incident light

图3 超透镜单元结构设计示意图

Fig. 3 Schematic of metalens unit cell design

在构建相位数据库之前,通过 FDTD 软件计算各个波段下结构所对应的相位与透过率。首先,将 3 个波段下的 L/W 的扫参半径范围分别设置在 $[20\text{ nm}, 90\text{ nm}]$ 、

$[60\text{ nm}, 160\text{ nm}]$ 、 $[20\text{ nm}, 200\text{ nm}]$,为构建足够的相位和透射数据库,将步进设置为 1 nm ;其次,选取仿生滤波器所对应的 3 处共振波长 366 、 445 、 550 nm ,考虑到消色差的设计,额外增加波长 355 、 375 、 430 、 450 、 540 和 560 nm 对应的相位分布与透射率分布,以构建完整的相位库。另外,列出了部分满足 2π 相位调控,且具有高透射效率的超表面单元在 3 处共振波长下的内部磁场分布,如图 4 所示,其中 L/W 分别取到 $[80\text{ nm}, 58\text{ nm}]$ 、 $[140\text{ nm}, 105\text{ nm}]$ 和 $[160\text{ nm}, 100\text{ nm}]$,从磁场分布图可以看出,它们对应的各个波段具有不同的传输模式,但相同的一点是,都被束缚在椭圆纳米柱下内,这也说明超表面单元在 3 处共振波长下实现波导功能,对应的传输相位均不相同。

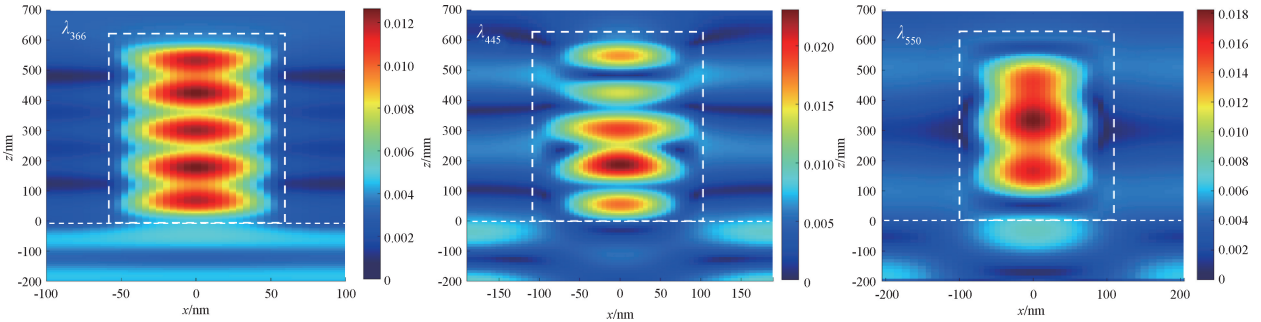


图4 超表面单元结构分别对应 366、445 和 550 nm 这 3 个波段下的内部磁场分布

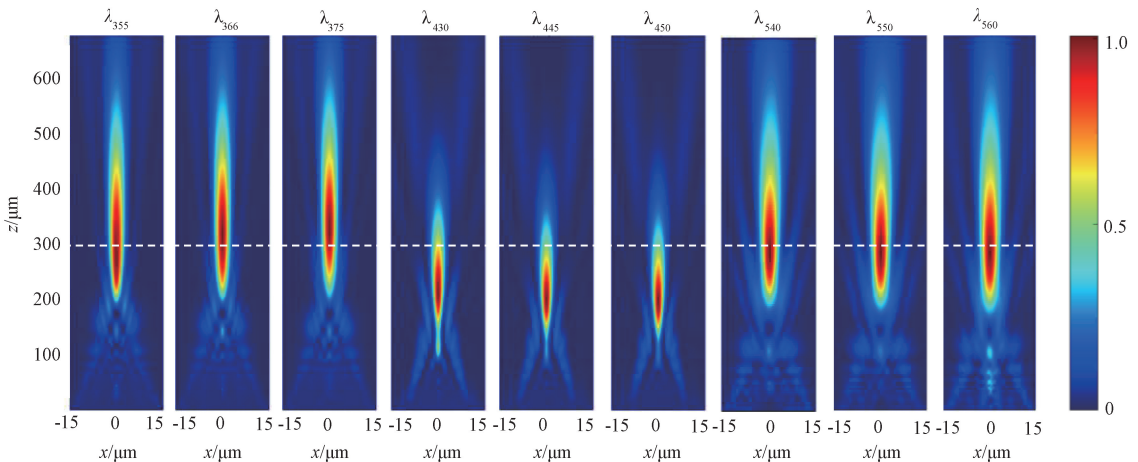
Fig. 4 Internal magnetic field distributions of metasurface unit cells across three spectral band at 366, 445 and 550 nm

2 仿真结果分析

2.1 聚焦效率仿真分析

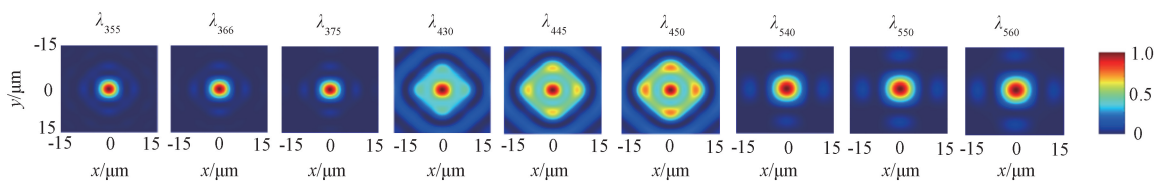
通过 FDTD 的模场计算得到超透镜的传输光场,并对其聚焦性能进行分析,将 9 个离散波长处的 $x-z$ 方向

的归一化光强分布图,如图 5(a)所示。这里以 0° 偏振光入射到对应超透镜的 I_0 区域为例,可以明显看出超透镜对 0° 入射偏振光的调控作用,调控 0° 偏振光的超透镜对于 0° 入射偏振光的响应满足聚焦分布。图中白色虚线表示理论焦距 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的位置,不同波长的焦距值有所变动,对于蓝光波段的焦距差异,这与结构扫参的相位库



(a) 表示在 $x-z$ 平面上的归一化电场分布

(a) Normalized electric field distributions in the $x-z$ planes



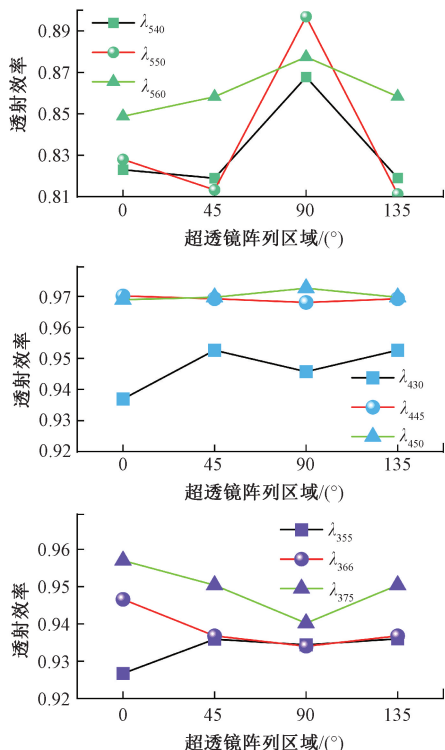
(b) 表示在 x - y 平面上的归一化电场分布
(b) Normalized electric field distributions in the x - y planes

图5 离散波长的归一化电场分布

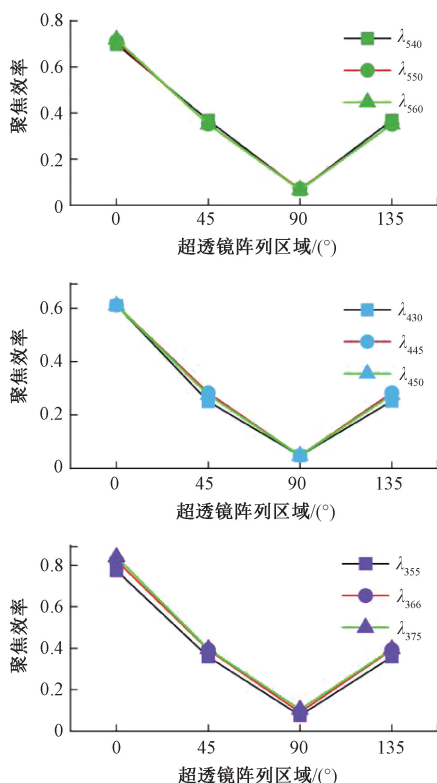
Fig. 5 Normalized electric field distributions at discrete wavelengths

数据少有关,相比较 UV、G 波段的扫参结果,该波段下的整体聚焦能满足在 $300\ \mu\text{m}$ 的焦距,但是整体的仿真结果均在设计焦距附近,蓝光波段下的焦距会偏离多一些。另外,仿真还给出了在 x - y 方向的归一化电场分布图,在图 5(b) 中所展示,表明在焦距 $300\ \mu\text{m}$ 左右时,所设计的超透镜具备聚焦性能,可以实现消色差聚焦的功能,进一步提高偏振探测的准确度。

为了分析超透镜的透射性能,将 0° 的线偏振光分别入射到超透镜对应的 4 个角度上,将透射效率与聚焦效率数据整合到图 6 上。从图 6(a) 中可以看到,该超透镜在紫外-可见光波段下的透射效率最低能实现 81%,在蓝光波段下,当入射波长为 $445\ \text{nm}$,该器件的透射效率能达到 97% 的高效传输,在紫外波段,该器件也能满足 94% 的透射效率,也侧面说明 Ta_2O_5 材料的光学传输性



(a) 紫外-可见光波段下超透镜透射效率与对比
(a) Comparison of metalens transmittance efficiency in the ultraviolet-visible band



(b) 紫外-可见光波段下超透镜聚焦效率对比
(b) Comparison of metalens focusing efficiency in the ultraviolet-visible band

图6 各离散波长下的偏振性能曲线

Fig. 6 Polarization performance curves at discrete wavelengths

能较好。图 6(b) 给出的是超透镜对应 3 个波段 9 个离散波长下的聚焦效率,可以看到 0° 所对应的聚焦效率值最高,且在 UV、B、G 下的最大聚焦效率分别为 84%、61%、72%,说明所设计的超透镜对于 0° 线偏振光有响应,而在 90° 是超透镜的聚焦效率均为最低,同样,所对应的最低值分别为 8%、5%、7%,说明对于 90° 的线偏振光具有抑制作用。对于 45° 和 135° 只是入射的方向不同,但是聚焦效率的数值几乎相同,说明所设计的超透镜具有偏振敏感性。

2.2 不同偏振态入射光下的 DoLP 和 AoP

为进一步获取超透镜的 Stokes 参量,对 3 个共振波长 (λ_{366} 、 λ_{445} 、 λ_{550}) 下的超透镜进行线偏振度 (DoLP) 和

偏振角 (AoP) 两个关键指标进行了计算。具体计算方法,通过将入射光束在 0° 、 45° 、 90° 以及 135° 时获取的光强 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 以及 I_{135° ,再根据式 (2) 和 (3) 即可求出线偏振光入射时的 DoLP 和 AoP,一般的,DoLP 的范围为 $0\sim 1$,如果是完全线偏振光,则 DoLP 为 1。偏振角度设置为 $0^\circ\sim 180^\circ$,考虑到全波仿真计算资源密集,为在合理时间内完成参数扫描,将偏振角的采样间隔设置为 30° ,通过仿真计算将得到的 DoLP 和 AoP 数值分别在图 7(a) 和(b)中展示。

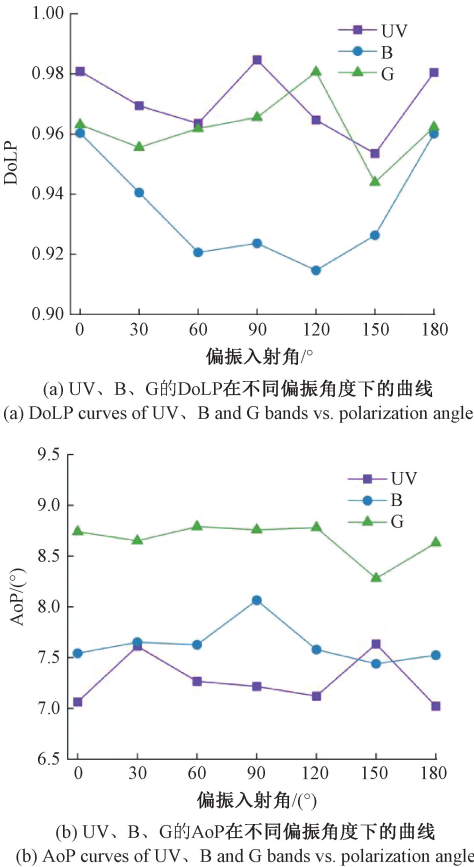
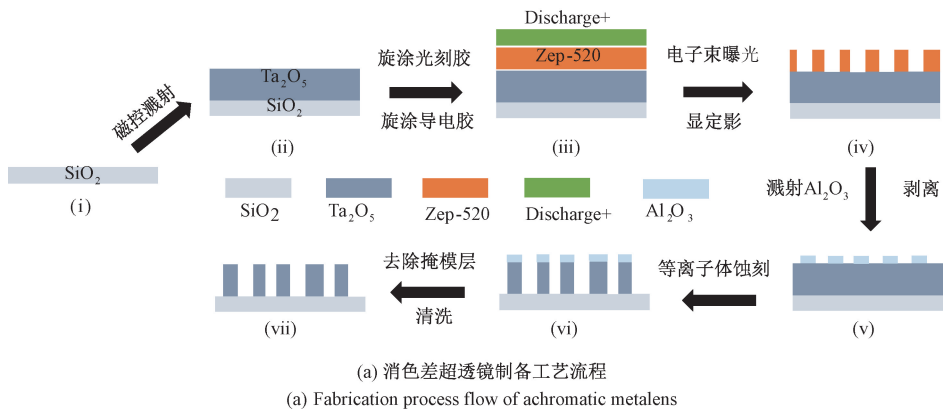


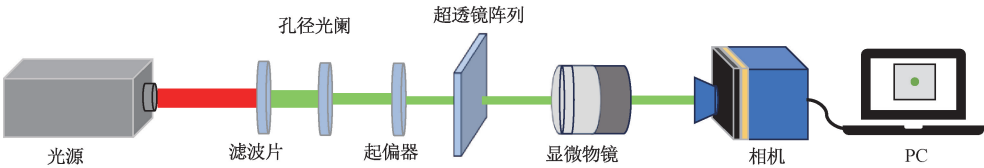
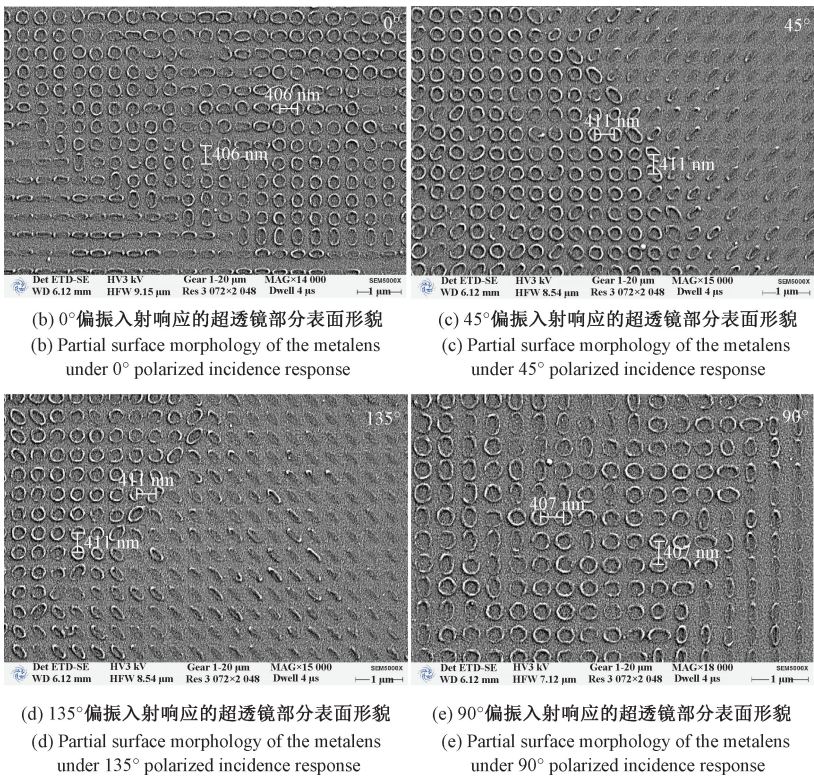
图 7 不同偏振态入射光下的 DoLP 和 AoP 性能曲线
Fig. 7 DoLP and AoP performance curves under incident light with different polarization states

从图 7(a)中可以看出紫外-可见区间的线偏振度范围整体分布在 $0.91\sim 0.98$,而未达到数值 1 的可能由于超透镜的部分结构带有旋转角,产生部分圆偏振光,因此未能达到完全线偏振光。在图 7(b)中超透镜在 UV、B 和 G 波段下的偏振角范围分别在 $7.06^\circ\sim 7.63^\circ$ 、 $7.43^\circ\sim 8.06^\circ$ 和 $8.28^\circ\sim 8.79^\circ$,整体的偏振角度范围误差 $<2^\circ$,这可能是由材料色散或结构共振的波长依赖性引起的。

3 制备与测试分析

为了测试消色差超透镜阵列的偏振特性,对其进行了制备,制备超透镜的流程示意图如图 8(a)所示,首先使用磁控溅射工艺在石英衬底上溅射目标厚度 600 nm 的 Ta_2O_5 (真空度维持在 10^{-5} Pa ,转速速率设置为 10 r/min)。在旋涂光刻胶之前需要对衬底进行增粘处理,将衬底至于 180°C 的加热台上加热 2 min 。然后旋涂 200 nm 厚的 Zep-520 正性抗蚀剂到 Ta_2O_5 表面,并对匀完光刻胶的衬底进行前烘处理,同样温度选择 180°C ,加热 2 min ,因介质 Ta_2O_5 不导电,故旋涂一层导电胶增加薄膜导电性。随后,使用 30 keV 电子束光刻系统曝光纳米图案,曝光的基础剂量设置为 $100\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$,剂量因子为 2.6 ,光刻后用去离子水去除导电胶层,并用 $n\text{-Amyl acetate}$ 试剂进行显影,再将其放入 IPA 试剂中定影。随后在磁控镀膜机中更换溅射靶材,蒸镀 50 nm Al_2O_3 薄膜。接着对样品进行刻蚀,将去胶后的衬底放置在感应耦合等离子体刻蚀 (inductively coupled plasma, ICP) 的样品台上,刻蚀气体选择 CHF_3 和 O_2 ,配比分别为 50 和 5 sccm 。(ICP 功率设定为 800 W ,射频功率 (radio frequency, RF) 功率设置为 15 W ,刻蚀时间设置为 150 s)。最后将刻蚀后的片子放置在 85% 的 H_3PO_4 的溶液中,加热至 80°C ,持续 5 min ,接着用去离子水清洗 50 s ,去除残留磷酸,并用氮气吹干衬底。图 8(b)~(e) 为对应周期 410 nm 超透镜阵列的局部扫描电子显微图像,单元周期实际测量在 407 nm ,符合预期结果。





(f) 超透镜性能测试实验装置示意图

(f) Schematic of the experimental setup for metalens performance testing

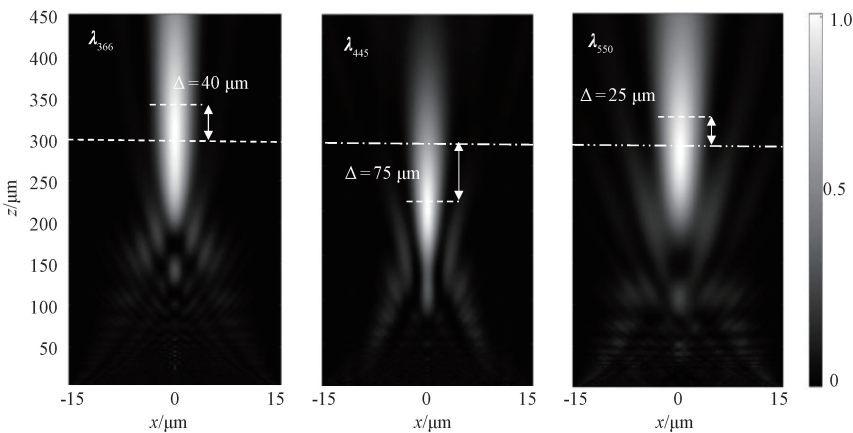
图 8 器件的制备流程与测试系统示意图

Fig. 8 Diagram of device fabrication process and testing system

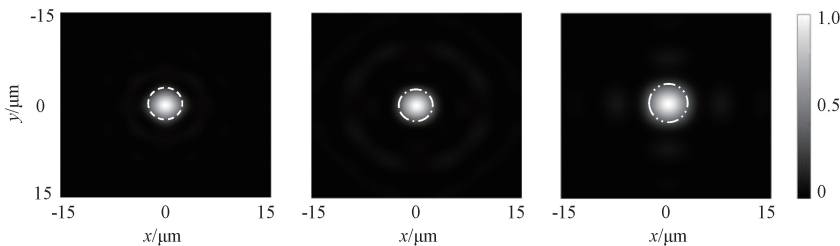
完成制备之后,首先是对紫外-可见光超透镜进行聚焦性测试验证其消色差的属性,实验测试系统示意图如图 8(f)所示。激光器发出的光束经过滤波片得到单一波长的光波,再经过孔径光阑使得光斑面积能被超透镜阵列覆盖,再经过起偏器获得线偏振光,选用的相机型号为 MER3-810-36G3M-P-UV F02,像元尺寸在 $2.74\text{ }\mu\text{m}\times 2.74\text{ }\mu\text{m}$,在 $300\sim 650\text{ nm}$ 的波段区间有超 70% 的高敏感响应,最后通过传感器探测到聚焦光斑并在上位机上进行处理。

为表征所设计的紫外-可见光超透镜对入射线偏振光的消色差性能,在实验中测量了在 0° 入射偏振光在不同入射波长下的 $x-z$ 平面和焦平面的光场强度分布。图 9 为调控两组正交偏振态在 366、445 和 550 nm 下的消色差聚焦实验结果与仿真的计算结果对比。图 9(a) 为 3 处共振峰下消色差超透镜的聚焦光场图,其中虚线

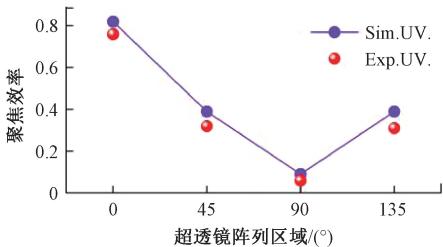
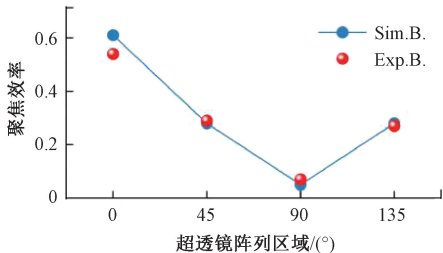
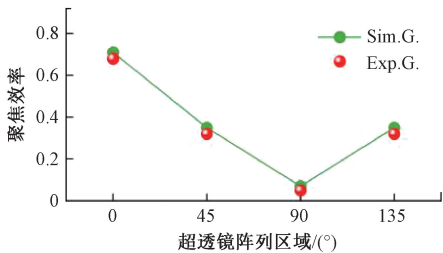
为理论焦距在 $300\text{ }\mu\text{m}$ 处的空间位置,测试所得的焦距值与理论值分别相差 40、75 和 $25\text{ }\mu\text{m}$,证明器件在紫外-可见光波段下具备消色差功能。图 9(b) 为各个聚焦光斑在 $x-y$ 平面上的光场分布。另外,还测量了超透镜阵列的聚焦效率,并将测试结果与仿真结果进行对比分析,如图 9(c) 所示,这里的聚焦效率定义为焦平面位置处的光强与入射光能量的比值,图中分别以 Sim. UV、Sim. B. 和 Sim. G. 表示仿真值,对应的实验值以 Exp. 形式表示。分别在 366、445、550 nm 波长处测量得到对应 0° 、 45° 、 90° 和 135° 这 4 种偏振态在 0° 偏振光入射下的聚焦效率分别为 76%、54% 和 68%,计算得到对应 3 个波段下的相对误差分别为 7.89%、12.9% 和 4.41%,略低于仿真下的聚焦效率。其中在蓝色波段下的相对误差最大,原因一方面是在设计相位库时,满足调控相位的结构参数量较小,导致透镜的聚焦效率不高;另一方面是在加工过程



(a) 超透镜在 x - z 平面上的聚焦光场
(a) Focusing light field diagram of the metalens in the x - z plane



(b) 超透镜在 x - y 平面上的聚焦光斑
(b) Focusing spot diagram of the metalens in the x - y plane



(c) 仿真与实际测试的聚焦效率对比曲线
(c) Comparison curve of simulated and experimentally tested focusing efficiency

图 9 紫外-可见光消色差超透镜聚焦性能表征结果

Fig. 9 Characterization of focusing performance for ultraviolet-visible achromatic metalens

中图形结构曝光所引入的误差,使得超透镜的透射率下降从而影响器件的聚焦性能。

为深入分析器件的偏振性能,在实验测试中,分别测量了 3 个共振波长在两组相互正交的线偏振光下的参量并进行了探测分析,其中一组为 0°与 90°相互正交,另一组为 45°与 135°相互正交。根据相机在焦平面处所测得的光斑强度计算出 Stokes 参数,需要对测试光路中的起偏器进行绕光路旋转以改变入射光的偏振态,经过起偏器后的入射光源为线偏振光,旋转角度至 45°、90°以及 135°来调整输出光的偏振态,之后由超透镜阵列聚焦并通过物镜聚焦在后端的相机焦平面上。在实验过程中,存在工艺制备以及环境光等因素的干扰,对 Stokes 参量进行分析发现,器件的透射光具有高度的偏振特性,其偏振度(DoLP)普遍高于 0.99。这表明透射光近似于完全偏振光,即其 Stokes 参量近似满足关系式 $S_0^2 \approx S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ 。通过式(2)和(3)求解 DoLP 以及 AoP,由于仿真的线偏振度步进为 30°,因此选用 0°与 90°进行验证。将紫外-可见光波段下测得的 Stokes 参数代入公式,得到的 DoLP 结果列在表 1 中,将 AoP 的结果列在表 2 中。

表 1 3 个波长部分偏振态下测量的 DoLP 与理论值对比
Table 1 Comparison of measured and theoretical DoLP values under partial polarization states at three wavelengths

λ_{in}/nm	入射偏振态/(°)	仿真值	实验值	相对误差/%
366	0	0.980 8	0.999 8	1.9
	90	0.984 7	0.999 9	1.5
445	0	0.960 3	0.999 7	4.1
	90	0.923 7	0.999 2	8.2
550	0	0.963 1	0.999 9	3.8
	90	0.965 5	0.999 1	3.5

表 2 3 波长部分偏振态下测量的 AoP 与理论值对比
Table 2 Comparison of measured and theoretical AoP values under partial polarization states at three wavelengths

λ_{in}/nm	偏振态/(°)	仿真值/(°)	实验值/(°)	差值 /(°)	补偿后的 相对误差/%
366	0	7.06	2.72	4.34	21.0
	90	6.22	1.52	4.70	18.0
445	0	7.54	1.55	5.99	2.7
	90	8.07	2.50	5.57	2.7
550	0	8.74	2.18	6.56	8.8
	90	8.76	1.20	7.56	20.0

从表 1 可得线偏振度的实验结果与理论值接近,在各个波长下的相对误差较小。在 0°和 90°偏振态下对应

366、445 和 550 nm 的测试误差分别为 1.9%、1.5%、4.1%、8.2%、3.8%和 3.5%,偏振度测量 3 处波长下的平均相对误差分别为 1.7%、6.1%和 3.6%,紫外-可见光波段下的平均误差为 3.8%,这也证明超透镜整列具有较好的偏振探测能力,但对应的偏振角误差较大。由于数据量较小,故使用平均偏差方法,通过对其 6 组数据进行误差补偿,计算得到平均偏差在 5.787,对真实值进行补偿后,得到的补偿后相对误差列在表 2 中,平均相对误差为 12%。这一差异主要源于 AoP 对测量系统误差的极高敏感性。深入分析其误差来源,主要包括:1)偏振器角度校准误差:偏振片透光轴的机械校准存在约±1°的系统偏差,该偏差会线性传递至 AoP 计算结果;2)器件非理想性:加工样品的结构偏差引入了额外的相位误差。为提升 AoP 测量精度,未来工作将采用高精度电控旋转台进行自动校准并对光学器件的色散进行标定补偿。尽管实测结果与理论值之间存在一定差距,但所制备的超透镜器件在紫外-可见光波段下所探测到的 Stokes 参数是可以直接通过各光斑的强度计算得出,这在小型化探测设备中具有重要的应用价值。

4 结 论

面向双波段超透镜偏振探测器的应用需求,本文提出并设计了一种在紫外-可见光下 Stokes 探测的超透镜阵列。受启于帝王蝶复眼的偏振敏感机制,通过介质椭圆纳米柱在紫外和可见光波段下引入传播相位调制,设计满足 2π 相位调控的结构单元,经过 FDTD 仿真软件实现透镜阵列设计,仿真并分析了超透镜阵列的线偏振度和偏振角性能。利用磁控溅射和电子束曝光等工艺制备了超透镜阵列并测试了器件偏振性能,实现了在紫外-可见光波段的部分偏振态下 DOLP 平均相对误差最小为 1.7%,AoP 平均相对误差为 12%。本文设计的双波段消色差超透镜能够获取紫外和可见光偏振信息,为偏振导航系统提供更可靠的 Stokes 参数解算方案。另外,微型化的尺寸设计易于仿生超表面滤波器集成,为仿生偏振光传感器的集成提供硬件基础,推进新一代集成式仿生导航系统在复杂环境下的实用化进程。

参考文献

[1] YAROSLAVSKY A N, FENG X, YU S H, et al. Dual-wavelength optical polarization imaging for detecting skin cancer margins[J]. Journal of Investigative Dermatology, 2020, 140(10): 1994-2000.

[2] YORK T, POWELL S B, GAO SH K, et al. Bioinspired polarization imaging sensors: From circuits and optics to signal processing algorithms and biomedical applicat-

- ions[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(10): 1450-1469.
- [3] GOUDAIL F, TYO J S. When is polarimetric imaging preferable to intensity imaging for target detection? [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 28(1): 46-53.
- [4] ZENG X W, CHU J K, CAO W D, et al. Visible-IR transmission enhancement through fog using circularly polarized light [J]. Applied Optics, 2018, 57(23): 6817-6822.
- [5] 邓思珩, 石磊东, 陈洋, 等. 基于 GaAs/Sb₂Se₃ 相变可调谐线性偏振器[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 161-169.
- DENG S H, SHI L D, CHEN Y, et al. A tunable linear polarizer based on phase-change material using GaAs/Sb₂Se₃[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 161-169.
- [6] WANG ZH W, CHU J K, WANG Q Y, et al. Single-layer nanowire polarizer integrated with photodetector and its application for polarization navigation [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6579-6585.
- [7] 鲍昌皓, 高欣健, 王文莉, 等. 结合高频感知的大气偏振模式生成方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 18-26.
- BAO CH H, GAO X J, WANG W L, et al. Atmospheric polarization mode generation method based on high-frequency perception[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 18-26.
- [8] LI SH Z, KONG F, XU H, et al. Biomimetic polarized light navigation sensor: A review [J]. Sensors, 2023, 23(13): 5848.
- [9] 郝飞, 焦云东, 孙佳浩, 等. 正交远心机器视觉测量方法及其系统与应用[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(9): 125-133.
- HAO F, JIAO Y D, SUN J H, et al. Orthogonal telecentric machine vision measurement method and its system and application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(9): 125-133.
- [10] KIM J, RANA A S, KIM Y, et al. Chiroptical metasurfaces: Principles, classification, and applications [J]. Sensors, 2021, 21(13): 4381.
- [11] TSILIPAKOS O, TASOLAMPROU A C, PITILAKIS A, et al. Toward intelligent metasurfaces: The progress from globally tunable metasurfaces to software-defined metasurfaces with an embedded network of controllers [J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(17): 2000783.
- [12] 欧凯, 郁菲茏, 陈金, 等. 宽带消色差红外光学超构透镜研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(1): 24-32.
- OU K, YU F L, CHEN J, et al. Research progress of broadband achromatic infrared metalens (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(1): 24-32.
- [13] RUBIN N A, D'AVERSA G, CHEVALIER P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera [J]. Science, 2019, 365(6448): eaax1839.
- [14] 高隽, 范之国. 仿生偏振光导航方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- GAO J, FANG ZH G. Bionic polarized light navigation method[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [15] LI Y, SHI ZH F, WANG L T, et al. Solution-processed one-dimensional CsCu₂I₃ nanowires for polarization-sensitive and flexible ultraviolet photodetectors [J]. Materials Horizons, 2020, 7(6): 1613-1622.
- [16] 杨青元, 王维, 田祥. 聚焦强度可调的高数值孔径的双焦点超透镜[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 366-373.
- YANG Q Y, WANG W, TIAN X. High numerical aperture bifocal metalens with regulatory focusing intensity [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 366-373.
- [17] GUO K, XU H SH, PENG ZH Y, et al. High-efficiency full-vector polarization analyzer based on GaN metasurface[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(10): 3654-3659.
- [18] CHEN CH, WANG Y Q, JIANG M W, et al. Parallel polarization illumination with a multifocal axicon metalens for improved polarization imaging [J]. Nano Letters, 2020, 20(7): 5428-5434.
- [19] MIYATA M, NAKAJIMA M, HASHIMOTO T. Compound-eye metasurface optics enabling a high-sensitivity, ultra-thin polarization camera [J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9996-10014.
- [20] HU Y Q, JIANG Y T, ZHANG Y, et al. Achromatic full Stokes polarimetry metasurface for full-color polarization imaging in the visible range [J]. Nano Letters, 2024, 24(41): 13018-13026.
- [21] LABHART T, BAUMANN F, BERNARD G D. Specialized ommatidia of the polarization-sensitive dorsal rim area in the eye of monarch butterflies have non-functional reflecting tapeta[J]. Cell and Tissue Research, 2009, 338(3): 391-400.
- [22] 李智渊, 翟爱平, 冀莹泽, 等. 光学偏振成像技术的研究、应用与进展[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 298-313.

LI ZH Y, ZHAI A P, JI Y Z, et al. Research, application and progress of optical polarization imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(9): 298-313.

[23] 祝航威, 董杭, 王静, 等. 高性能仿生紫外-可见光超表面滤波器研究[J]. 光学学报, 2025, 45(21): 242-250.

ZHU H W, DONG H, WANG J, et al. Research on Bio-inspired dual-band UV-visible metasurface filters with high performance [J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(21): 242-250.

[24] ZHANG CH, CHEN L, LIN ZH L, et al. Tantalum pentoxide: A new material platform for high-performance dielectric metasurface optics in the ultraviolet and visible region [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 23.

作者简介



祝航威,2017 年于南昌理工学院获得学士学位,2021 年于北京信息科技大学获得硕士学位,现为大连交通大学博士研究生。主要研究方向为超表面偏振探测。

E-mail:hangweizhu@126.com

Zhu Hangwei received his B.Sc. degree from Nanchang Institute of Technology in 2017, his M.Sc. degree from Beijing Information Science & Technology University in 2021. He is currently a Ph. D. candidate at Dalian Jiaotong University. His main research interest includes metasurface-based polarization detection.



杨梦雪,2020 年于石家庄学院获得学士学位,现为北京信息科技大学博士研究生,主要研究方向为中波红外超表面。

E-mail:13180192780@163.com

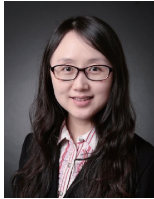
Yang Mengxue received her B.Sc. degree from Shijiazhuang University in 2020. She is currently a Ph. D. candidate at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interest includes mid-wave infrared metasurfaces.



董杭,2023 年于内蒙古工业大学获学士学位,现于北京信息科技大学硕士在读,主要研究方向为超表面红外偏振探测技术。

E-mail:dawn010923@163.com

Dong Hang received his B.Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2023. He is currently pursuing his master's degree at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes metasurface infrared polarization detection technology.



何彦霖,2011 年于兰州交通大学获工学学士学位和文学学士学位(双学位),2018 年于北京理工大学获得博士学位,主要从事光纤传感与机器人智能导航技术、红外探测与超表面增强技术。

E-mail:heyianlin@bistu.edu.cn

He Yanlin received her B.Eng. and B.A. degrees (double major) from Lanzhou Jiaotong University in 2011, and her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2018. Her main research interests include optical fiber sensing and robotic intelligent navigation technology, as well as infrared detection and metasurface enhancement technology.



祝连庆(通信作者),1982 年于合肥工业大学获得学士学位,1989 年于合肥工业大学获得硕士学位,2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位。主要从事光纤传感与系统、红外探测与集成光电子系统等方面的研究。

E-mail:lqzhu_bistu@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 1982, his M.Sc. degree from Hefei University of Technology in 1989, and his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. His main research interests include optical fiber sensing and systems, infrared detection and integrated optoelectronic systems.