

文章编号:1001-5078(2023)12-1897-06

· 光纤传感及光通信技术 ·

基于拓扑优化的光纤束端面超构透镜研究

焦通^{1,2}, 林雨¹, 王承邈¹, 韩业明¹, 邓永波^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:超构透镜作为目前纳米光学领域的研究热点,与光纤束集成可充分体现其轻薄的特点,二者的结合有利于推动成像系统的小型化。本文利用拓扑优化方法设计了一种新型的同心环结构超构透镜,并利用纳米3D打印技术完成超构透镜与光纤传像束的集成。该超构透镜直径为30.47 μm,数值孔径(NA)为0.8,使用白光LED光源进行成像实验,结果表明该超构透镜具有良好的成像性能。本文提出的超构透镜与光纤束集成的小型化成像系统可应用于医疗、工业、军事等多个领域。

关键词:超构透镜;光纤束;拓扑优化;纳米3D打印;成像

中图分类号:TN253;TN29 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.12.015

Topology optimization-based research of metalens at endface of fiber bundle

JIAO Tong^{1,2}, LIN Yu¹, WANG Cheng-miao¹, HAN Ye-ming¹, DENG Yong-bo^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:As a research hotspot in the field of nano-optics, metalens can be integrated with optical fiber bundles to fully reflect their light and thin characteristics. The combination of the two is conducive to promoting the miniaturization of imaging systems. In this paper, a novel of concentric ring structure metalens is designed using topology optimization method, and the integration of metalens and optical fiber image transmission bundle is accomplished using nano-3D printing technology. The diameter of the metalens is 30.47 μm, and the numerical aperture (NA) is 0.8. Imaging experiments are carried out using a white LED light source and the results show that the metalens has good imaging performance. The miniaturized imaging system integrated with the metalens and fiber bundle proposed in this paper can be applied in various fields such as medical treatment, industry, and military applications.

Keywords: metalens; optical fiber bundles; topology optimization; nano-3D printing; imaging

1 引言

光纤作为一种传光载体,具有材质柔、体积小、透过率高、光损耗低等优点,并且具有传光、传像和

传递其他不同种类光信息的功能^[1]。在军事国防^[2-3]、工业^[4-5]、医疗检测^[6]、探测系统等领域有着广泛的应用。光纤传像束是将多根一定长度的光

基金项目:中国科学院长春光机所所创新面上项目;中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划项目(No. YSBR-066)资助。

作者简介:焦通(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为纳米光学。E-mail:jt1972771861@163.com

通讯作者:邓永波(1985-),男,博士,博士生导师,主要研究领域为微光机电系统,纳米光学,微纳功能结构拓扑优化。

E-mail:dengyb@ciomp.ac.cn

收稿日期:2023-01-17

纤按点对点相关排列集束成束从而实现图像传递功能的光学元件^[7]。随着光纤传像束制造工艺的发展,其可制造直径可以小至百微米量级。然而,与光纤束结合的成像系统多采用传统透镜组实现,存在元件较多、体积较大,难以深入生物体的微小组织以及工业设备的极窄狭缝等狭小空间、或不便于旋转调整可视角度的问题^[7]。随着纳米加工技术的发展,超构表面特别是超构透镜^[8]的出现为上述难题提供了有效的解决方案。

2011年,哈佛大学 Capasso 等^[9]首次提出了超构表面的概念,并由超构表面相位梯度的引入提出广义斯涅耳定律为:

$$\sin(\theta_t)n_t - \sin(\theta_i)n_i = \frac{1}{k_0} \frac{d\phi}{dx} \quad (1)$$

其中, n_i 和 n_t 分别表示入射一侧和折射一侧材料的折射率; θ_i 和 θ_t 分别表示入射角和折射角; dx 表示表面上两个无限接近点位的距离; $d\phi$ 表示表面两个无限接近点位的相位差。由广义斯涅耳折射定律可知光在发生折射时,折射方向不仅与入射方向和折射界面两侧折射率有关,还与材料界面相位变化 $d\phi/dx$ 有关。超构表面正是通过相位变化调控实现光束调控的。超构表面是由人工设计亚波长散射单元按照一定相位梯度要求排列而成的平面阵列。这些平面阵列的空间排列序与所产生的光学特性密切相关。依据光学调制的目标函数优化空间排列序,能够实现出射光调控。超构透镜是一种典型的超构表面,一般是由一系列亚波长金属或电介质单元按照成像光场相位需求排布,构成具有衍射极限分辨的平面成像器件。该类器件的超薄、轻量化、易集成特征使其在集成光电子器件方面具有较大的优势。光纤束的端面是一种将光纤与平面微纳结构相结合的新兴光场调控微平台。将超构透镜与光纤束结合有望提升光纤成像器件的性能。

在上述背景下,国内外的许多研究机构及人员都对超构透镜展开了系列研究。其中,密歇根州立大学 Qiu 等^[10]证明了基于超构透镜光纤成像系统实现激光共聚焦显微镜的可行性,该系统工作波长为 660 nm,光斑半峰全宽(FWHM)为 4.29 μm ,超构透镜焦距为 4 mm;在生物医学应用方面,天津医科大学 Liu 等^[11-12]模拟和设计了超构透镜与光纤束结合的生物成像设备,可适用于生物组织环境,提高荧光采集效率。纳米 3D 打印技术作为一种具有

微纳尺度的制造技术,在器件小型化方面具有显著优势,已经发展成为微纳器件加工的主流技术之一,是国内外许多研究机构、高校和公司研究开发的热点技术,包括光纤束端面上的各种微结构加工等^[13-15]。2003年,Bianchi 等^[12]首次利用双光子聚合制备了光纤端面微抛物面反射器;2016年,Gissibl 等^[14]利用双光子聚合在光纤端面集成的自由曲面微光学系统,包括在单模光纤端面上集成的光纤准直器、环形透镜、自由曲面透镜、手性光子晶体。这种打印技术不受限于特定的衬底,基本上可以在任意的表面上加工,直接形成具有亚微米分辨率的自由形式光学器件。以上这些研究都证明了超构透镜在器件小型化方面具有巨大优势,但使用纳米 3D 打印技术完成超构透镜在光纤束上的集成方面的研究仍鲜有报道。这些研究中大多数超构透镜结构都是排列于基底表面的离散纳米结构阵列,这类结构几何数据量大,需要通过大量的仿真优化以寻求最佳结构排布方式,这种设计方法亟需改善。

本文采用纳米 3D 打印技术将超构透镜与光纤束有机结合,利用纳米 3D 打印技术将超构透镜打印在光纤束端面上,并将之构成微小、轻便的成像系统。本系统将超构透镜与光纤一体化作为成像输入端,光纤二分束实现照明和传像功能,在光纤另一端连接图像传感器实现对物体的成像。同时,使用拓扑优化方法设计超构透镜。不同于大多数设计纳米阵列结构排布的方法,该方法在预设透镜直径和数值孔径后,通过最大化焦点处的聚焦能量确定超构透镜结构。所得的超构透镜直径与光纤束端面直径基本一致,能够有效的实现灵活便捷的成像,为未来光纤成像器件的小型化提供了有效的实现途径。

2 超构透镜与成像系统设计

2.1 超构透镜设计

超构透镜可以通过设计超构表面完成对出射光场偏振、波长和振幅等的多种维度操控,从而实现聚焦和成像功能,为小型化和便携式光学系统的发展提供了新的技术路线。为简化超构透镜的设计过程,我们采用拓扑优化方法设计超构透镜,在入射波为圆偏振或线偏振的情况下,以入射波波矢为轴的旋转对称性能够有效的保证纳米结构的光子调控效率,因而超构透镜的拓扑优化设计可转化为确定旋转对称面内结构构型的问题。超透镜旋转对称面内

的结构构型为准二维几何,与之对应的准三维构型则具有同心环拓扑。因此,超构透镜拓扑优化可简化为确定其同心环拓扑中纳米环结构及宽度的问题,然后在玻璃或聚合物基片上,预设 NA 为 0.8、直径为 24 μm 、厚度为 1.2 μm ,结构的几何对称性适用于多种偏振入射,本设计采用 633 nm 波长的光正入射,以极大化焦点处光波电场能量密度为目标:

$$J(E) = \int_{\Omega_f} |E|^2 \delta(P - P_f) dV \quad (2)$$

其中, E 为电场; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; P 为空间坐标; $P_f \in \Omega_f$ 为设计超构透镜焦点的位置由超构透镜的直径与 NA 所决定; Ω_f 为光通过超构透镜后出射的自由空间。整体设计区域如图 1 所示。图 1(a) 为三维设计区域;图 1(b) 为截面设计区域,其中 $\Omega_b, \Omega_c, \Omega_l, \Omega_r, \Omega_i$ 为设计边界区域,设计完美匹配层,当光传播到边界上时,将其完全吸收不产生反射光避免产生仿真误差; Ω_f 为光通过超构透镜后出射的自由空间区域,用以验证电场能量汇聚性; Ω_d 为设计超构透镜结构区域; Ω_g 为设计入射光线区域。

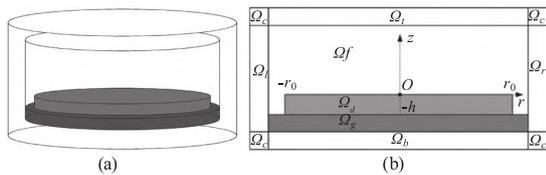


图 1 超构透镜整体设计区域
Fig.1 The overall design area of the metalens

在二维横磁波波动方程的约束下,建立同心环拓扑超透镜的拓扑优化变分模型;通过移动渐近线法迭代求解所建立的变分模型,获得超构透镜的旋转对称面构型;然后,以入射波波矢为轴旋转对称面构型,获得同心环拓扑超构透镜。设计过程如图 2 所示。

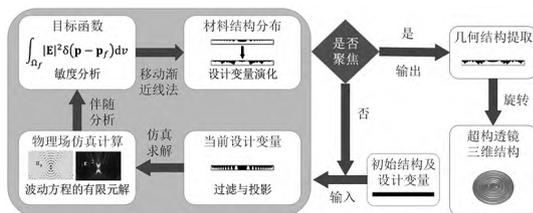


图 2 超构透镜的拓扑优化设计流程图
Fig.2 Topology optimization design process for metalens

这种设计方法将电场能量集中在指定的位置,从而实现聚焦成像功能。将超构透镜运用在光纤束成像系统中,充分发挥超构透镜的优势,具有稳定性

好并且具有小型化的优点,利用纳米 3D 打印制作速度快且便捷。拓扑优化设计后的超构透镜结构如图 3 所示。图 3(a) 为拓扑优化设计后 Ω_d 区域的对称超构透镜二维结构,黑色区域为超构透镜结构区域。比例尺为 5 μm ;图 3(b) 为以二维结构对称轴为旋转轴三维旋转后的超构透镜示意图。比例尺为 5 μm ;图 3(c) 为通过纳米 3D 打印加工后由光学数码显微镜成像的超构透镜示意图。比例尺为 5 μm 。

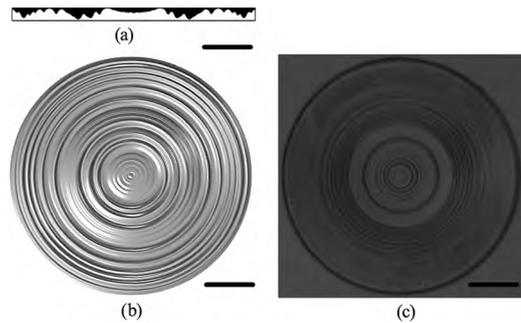


图 3 超构透镜结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of the structure of the metalens
2.2 成像系统设计

针对小型化光纤束成像系统的设备需求,本设计采用了超构透镜配合传像光纤束的布局。光纤束成像系统对物体的基本成像探测需要成像端、显像端和光源三个部分,本系统使用光纤二分束连接这三个部分。光纤二分束是一种特殊的光纤传像束,可将光纤束分为两个功能部分,其中一部分可用来传输光源,另一部分作为传像元件,实现光在空间二维分布上的传输和变换。由此光纤二分束可使光学系统兼顾照明和成像。在光纤二分束的末端分别连接光源与显像和图像采集设备。超构透镜结合光纤束端面的微结构作为成像端通过纳米 3D 打印一体化集成在光纤束的端面上,可对聚焦平面上的光学视场下任意目标图像进行获取以达到成像目的。以光纤传像束为载体,系统主要进行了在光纤束成像实验中对成像超构透镜的设计和系统结构优化的研究。本系统由光纤束、光纤束端面微结构及超构透镜、光源、显像和图像采集设备四部分组成,可直接伸入需要探测的物体内部并固定进行探测。

本系统通过光源发出的光经过光纤传像束,然后经超构透镜直接照明需要探测的物体,物体被照明后反射具有物体信息的光由成像端成像,通过光纤传像束传导图像,由图像传感器接收最终获得物体的像信息,完成成像功能。如图 4 所示。若该系

统用于深入生物体组织探测且不对组织造成损伤,则该光纤传像束半径在 0.1 mm 左右或者更小。该系统中,图像传感器接受的是由光纤传像束传出的图像,因此限制成像清晰度的主要是所用光纤传像束及超构透镜。为保证图像清晰可见,光纤传像束端面微结构高度应与超构透镜像距保持一致,在实际应用探测物体时应调整成像物距直至清晰成像。

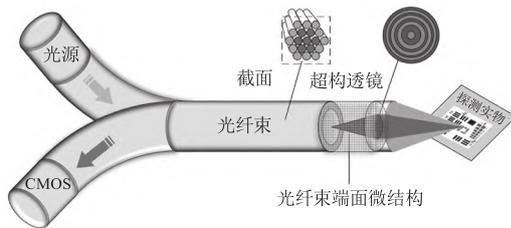


图 4 成像系统工作原理图

Fig. 4 Principle for imaging system

利用纳米 3D 打印技术打印的微结构可以作为超构透镜的支撑平台连接光纤与超构透镜,并且微结构采用多孔结构可便于结合多种环境进行探测成像。将通过拓扑优化设计的超构透镜结合微结构打印在光纤束的端面上可实现器件的小型化特点。由于大多数基于光纤束的传像系统仍是传统的厚重镜头组,其孔径很难设计的较小且结构复杂,装调困难,限制了其在狭窄环境探测的通用性。然而,这种通过纳米 3D 打印制造的超构透镜的出现将有望解决这一难题。超构透镜的超薄、尺寸小和易集成的特点,这种集成式结构的方式也将有望成为日后小型化光纤传像器件的重要开发思想。由于光纤端面结构直径较小,对需探测物体的破坏程度就小。并且光纤束端面为纯光学成像结构,不涉及光电转换技术,在探测特殊结构或物体时更加安全,稳定、可靠。因此,可在远距离探测、生物组织探测、工业微结构探测中发挥巨大优势,此外光纤束的末端还可以外接一些特殊的相机进行成像,如紫外红外相机、高速相机等外接视频化成像设备,使用这种成像设备像信息将更加直接、更具有较强的真实性、立体感。

3 结果与讨论

本文进行拓扑优化过后得到特定结构的超构透镜,为了验证超构透镜的聚焦性能,进行了超构透镜电场汇聚性能的数值仿真实验。在预设入射波长为 486 nm,直径为 24 μm ,厚度 1.2 μm ,NA 为 0.8 时设计的超构透镜的电场能量分布及归一化如图 5

(a1) 和图 5 (b1) 所示,半峰全宽 (FWHM) 为 372 nm,可以看到在焦点处的电场能量分布达到最大值,并在焦点处完成对电场的聚焦,证明该超构透镜对于波长为 486 nm 的光有良好的聚焦性能。为证明本设计方法对于不同波长及不同超构透镜直径没有局限性,我们又分别设计了入射波长为 633 nm 直径为 24 μm 和入射波长为 633 nm 直径为 48 μm 的超构透镜,超构透镜厚度为 1.2 μm ,NA 为 0.8,并对设计结果进行电场汇聚性能的数值仿真实验,分别如图 5 (a2) ~ (a3) 所示,均可证明其聚焦性能。图 5 (a1) ~ (a3) 分别为入射波长为 486 nm 直径为 24 μm 、入射波长为 633 nm 直径为 24 μm 以及入射波长为 633 nm 直径为 48 μm 的超构透镜结构和透射电场能量分布图,右侧为电场振幅归一化颜色图例。图 5 (a1) 与图 5 (a2) 的比例尺为 2 μm ,图 5 (a3) 的比例尺为 4 μm 。图 5 (b1) ~ (b3) 分别对应图 5 (a1) ~ (a3) 的归一化焦平面电场强度分布图,半峰全宽 (FWHM) 分别为 372 nm、468 nm 和 456 nm,图中横轴位置坐标,单位为 μm ,纵轴为归一化强度。该超构透镜用于实际成像时误差主要来源于超构透镜的结构加工误差及入射杂散光的像差。

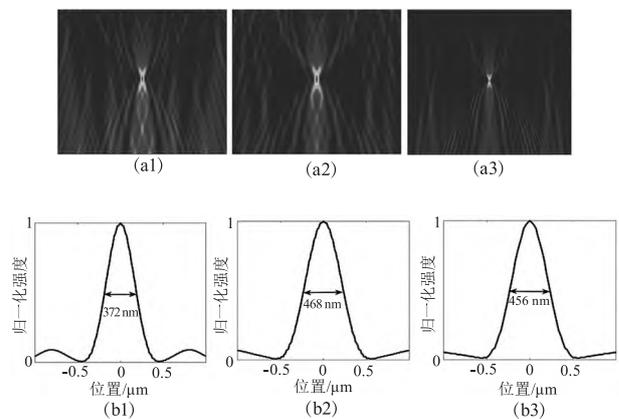


图 5 超构透镜的聚焦特性

Fig. 5 Focusing properties of metalens

为了验证该超构透镜的成像性能,采用纳米 3D 打印技术加工制备了直径 30.47 μm ,NA 为 0.8 的超构透镜,并进行了超构透镜的成像实验,如图 6 所示。图 6 (a) 为成像实验原理图;图 6 (b) 为超构透镜的光学数码显微镜成像示意图,比例尺为 3 μm ;图 6 (c) 为电脑端获取的超构透镜成像图像,比例尺为 3 μm ;图 6 (d) 为电脑端获取的超构透镜成像图像,比例尺为 4 μm ;图 6 (d) 为电脑端获取的超构透

镜结合光纤束成像图像,比例尺为 $4\ \mu\text{m}$ 。实验原理如图 6(a) 所示,由白光 LED 光源发出的光经过准直透镜照明美国空军 (USAF) 1951 分辨率目标^[16-18],由超构透镜行成像后,通过光纤束传输到后端的 CMOS 图像传感器从而接收像信息,并使用图像传感器自带的软件进行成像图像的获取。为了对成像结果进行对比分析,我们也进行了无光纤束的超构透镜成像实验。通过纳米 3D 打印制备的超构透镜光学数码显微示意图如图 6(b) 所示,无光纤束的超构透镜成像实验对目标的成像结果如图 6(c)~(d) 所示。使用光纤束传像的超构透镜成像实验对目标的成像结果如图 6(e) 所示。

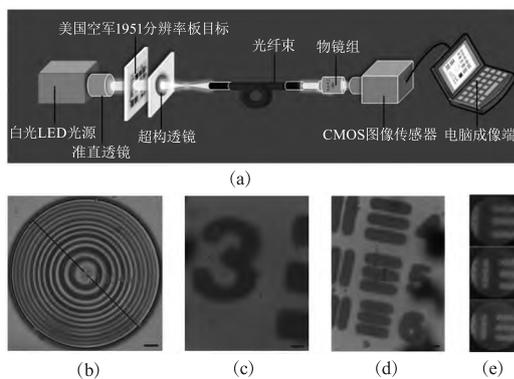


图 6 超构透镜成像实验及结果

Fig. 6 Imaging experiment and results of metalens

图 6(c) 和图 6(d) 为无光纤束的超构透镜成像结果,其中可以清晰的看到成像结果并分辨数字与线条图案,该系统满足对人眼成像的要求。图 6(a) 中数字“3”的宽度为 $3.54\ \mu\text{m}$,图 6(d) 中线条的宽度为 $4.02\ \mu\text{m}$,可分辨的两线条间隔为 $0.70\ \mu\text{m}$,证明该超构透镜分辨率优于 $0.70\ \mu\text{m}$,在对微小物体的成像效果上具有一定优势。图像成像边缘分界不清晰是由于超构透镜的加工误差和成像实验中光强的减小造成的,使用精度更高的纳米 3D 打印设备能有效提高实际成像的分辨率。图 6(e) 为目标经超构透镜成像后由光纤束传像的成像结果,与图 6(d) 结果相比,图像被放大了很多并且充满了光纤束的整个光学孔径,但也限制了系统的视场。图 6(e) 中线条存在斑点是由于光纤束存在断点或单丝分布不均匀丢失成像目标造成的。这时的成像质量由超构透镜和光纤束共同影响,若使用单丝直径更小和像素数更大的光纤束将有望提高系统的成像质量。

4 总 结

本文通过设计用于聚焦成像的超构透镜及端面

微结构,结合柔性传输的光纤传像束实现高效率传像能力,将光纤束和端面超构透镜集成,实现了小型化光纤束传像系统。所得系统具有小型化的特点。拓扑优化方法为超构透镜设计提供了一种新思路。通过预设直径和 NA 并且指定入射波波长获得在焦点处具有最高电场强度的同心环拓扑超构透镜。同时,所得成像系统可实现微小物体、生物体微小组织等复杂环境内的清晰成像,这对医疗、工业、军事、航天探测等领域的远程传像具有重要意义。

参考文献:

- [1] Xu Mingquan. Characterization of light transmission characteristics of optical fiber image transmission bundle[J]. Optical Fiber and Cable and Its Application Technology, 1997, (5):22-23. (in Chinese)
徐明泉. 光纤传像束的传光特性表征[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1997, (5):22-23.
- [2] Zhu Huiqing, Liu Shanqi, Huang Wentao. The development of optical fiber hydrophone technology and its military application[J]. Optical Fiber and Cable and Its Application Technology, 2017, (4):5-8. (in Chinese)
朱辉庆,刘姗姗,黄文涛. 光纤水听器技术的发展概况及军事应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017, (4):5-8.
- [3] Lin Zhihua, Li Chaofeng, Liu Jiachun. Optical fiber sensing technology and its military application[J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(7):4-6. (in Chinese)
林之华,李朝锋,刘甲春. 光纤传感技术及其军事应用[J]. 光通信技术, 2011, 35(7):4-6.
- [4] Huang Changjiang, Xiao Jiabin, Li Xintang. Research and development trend of optical fiber temperature measurement technology[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(2):102-108. (in Chinese)
黄长江,肖家宾,李新堂. 光纤测温技术现状研究及发展趋势[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(2):102-108.
- [5] Peng Chao, Zhao Jiankang, Miao Fugui. On-line monitoring of cable temperature with distributed optical fiber temperature measurement technology[J]. High Voltage Technology, 2006, (8):43-45. (in Chinese)
彭超,赵健康,苗付贵. 分布式光纤测温技术在线监测电缆温度[J]. 高电压技术, 2006, (8):43-45.
- [6] Tong Jian, Xiang Yang, Dong Meng, et al. Design of dual-

- band fiber optic endoscope objective lens [J]. *Applied Optics*, 2014, 35(5): 779 – 784. (in Chinese)
佟建, 向阳, 董萌, 等. 双波段光纤内窥镜物镜设计 [J]. *应用光学*, 2014, 35(5): 779 – 784.
- [7] Sun Hongyu, Xie Xin, Lu Xin. Design of flexible infrared optical imaging system based on optical fiber transmission [J]. *Optoelectronic Technology Application*, 2021, 36(3): 11 – 14. (in Chinese)
孙宏宇, 谢欣, 卢鑫. 基于光纤传输的柔性红外光学成像系统设计 [J]. *光电技术应用*, 2021, 36(3): 11 – 14.
- [8] Khorasaninejad, M. and F. Capasso, Metalenses: versatile multifunctional photonic components [J]. *Science*, 2017, 358: 6367.
- [9] N Yu, P Genvent, M A Kats, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334: 333 – 337.
- [10] Zhen, Q., et al. Optical fiber-based laser confocal microscope with a metalens [C] // 2018 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), 2018.
- [11] Sun, D., et al., Excitation and emission dual-wavelength confocal metalens designed directly in the biological tissue environment for two-photon micro-endoscopy [J]. *Biomed Opt Express*, 2020, 11(8): 4408 – 4418.
- [12] Yang, Y J, et al. Polarization-insensitive micro-metalens for high-resolution and miniaturized allfiber two-photon microendoscopic fluorescence imaging [J]. *Optics Communications*, 2019, 445: 7683.
- [13] Bianchi S, Rajamanickam V P, Ferrara L, et al. Focusing and imaging with increased numerical apertures through multimode fibers with micro-fabricated optics [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 4935 – 4938.
- [14] Hadibrata, W Wei, H Krishnaswamy, et al. Inverse design and 3D printing of a metalens on an optical fiber tip for direct laser lithography [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(6): 2422 – 2428.
- [15] Timo Gissibl, Simon Thiele, Alois Herkommer, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 554 – 560.
- [16] Thorlabs. Test targets identify resolution of an imaging system [EB/OL]. Available from: [https://www.thorlabschina.cn/NewGroupPage9_PF.cfm? Guide = 10 & Category_ID = 220 & ObjectGroup_ID = 4338](https://www.thorlabschina.cn/NewGroupPage9_PF.cfm?Guide=10&Category_ID=220&ObjectGroup_ID=4338).
- [17] Born, M., E. Wolf. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [J]. *Physics Today*, 2000, 53(10): 77 – 78.
- [18] Li, Z, et al. Achromatic broadband super-resolution imaging by super-oscillatory metasurface [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(10): 1800064.