

文章编号:1007-2780(2022)08-0942-06

基于电润湿效应驱动的液体菲涅尔透镜

王 鑫, 赵悠然, 徐近博, 袁荣英, 王琼华, 刘 超*
(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:传统的菲涅尔透镜在没有机械移动的情况下,不能进行主动轴向调焦。为了更好地将菲涅尔透镜应用于成像、显示、目标跟踪、光伏系统等领域,本文根据菲涅尔透镜的典型结构、基于电润湿效应提出了一种环形腔室的液体菲涅尔透镜。可以通过电压来控制环形腔室内液面的倾斜角度,从而控制光束的偏折方向,实现菲涅尔透镜轴向焦距调节的功能。实验结果表明,本文提出的液体菲涅尔透镜具备轴向调焦的功能,驱动电压约为 20 V,饱和电压约为 220 V,焦距变化范围为 $-52\sim-73$ mm。

关 键 词:菲涅尔透镜;电润湿效应;变焦

中图分类号:O435.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0154

Liquid Fresnel lens based on electrowetting effect drive

WANG Xin, ZHAO You-ran, XU Jin-bo, YUAN Rong-ying, WANG Qiong-hua, LIU Chao*

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Traditional Fresnel lenses cannot be used for active axial focusing without mechanical movement. In order to better apply the Fresnel lens to imaging, display, target tracking, photovoltaic system, and other fields, we proposed a ring chamber liquid Fresnel lens based on the typical structure of Fresnel lens and electrowetting effect. The proposed lens can be controlled by voltage to change the angle of inclination of the liquid surface within the ring chamber. So the axial focal length can be adjusted by controlling the deflection direction of the beam. The experimental results show that the proposed liquid Fresnel lens has the function of axial focusing. Its driving voltage is about 20 V, saturation voltage is about 220 V, and focal length varies from -52 mm to -73 mm.

Key words: Fresnel lens; electrowetting effect; zoom

1 引 言

普通光学透镜的表面曲率半径是决定其成像特性的因素之一。传统菲涅尔透镜将普通玻璃透镜的光滑连续表面切割成多个环状锯齿型

凹槽,每一环凹槽具有不同的倾斜角度,这使得菲涅尔透镜具有与传统玻璃透镜相同的折光功能,但其整体厚度要更小^[1]。所以,菲涅尔透镜较普通光学透镜而言,质量更轻,透镜材料的使用量更少。菲涅尔透镜低成本、轻量化的优点,已

收稿日期:2022-05-03;修订日期:2022-05-12.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61927809, No. 62175006)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61927809, No. 62175006)

*通信联系人, E-mail: chaoliu@buaa.edu.cn

广泛应用于太阳能光伏^[2-5]、显示与成像^[6-8]等诸多领域。另一方面,随着光学系统集成化和微型化的趋势,基于电润湿效应的各种液体光子器件因其轻量化、可电压控制、快速响应等优点而受到广泛关注,被应用于显微镜^[9-12]、内窥镜^[13]、望远镜^[14]、集成成像^[15]等各种光学系统中。

传统的菲涅尔透镜在没有任何机械移动的情况下,不能进行主动焦距控制,因此为增加菲涅尔透镜焦距的可调性,许多研究人员对可变焦菲涅尔透镜进行了深入的研究。日本 Takeuchi 等人通过刻蚀加工制作了多焦点的菲涅尔透镜,该透镜焦点个数较少,且加工精度要求较高^[16]。为实现更大的变焦范围,Xueming Li^[17]和韩国 Suntak^[18]等人均提出基于弹性介质的可变焦菲涅尔透镜。2020年,北京理工大学郑宏飞团队提出了一种通过拉伸形变实现变焦的菲涅尔透镜^[19]。但是这种机械拉伸形变的变焦方式的响应时间要比大多数基于液体的变焦方式更长。新加坡国立大学 Clement 等人提出用一维线性阵列的液体棱镜作为可调菲涅尔透镜,通过单独控制每个液体棱镜实现空间调焦的功能^[20]。SONY 公司 Takai 等人在 2012 年提出一种基于电润湿效应的微棱镜阵列,可以实现菲涅尔透镜的功能,其焦距为 7 mm,响应速度在 1 ms 以内^[21]。然而,基于液体棱镜阵列设计的菲涅尔透镜是通过设计液面的倾斜角度来达到与典型菲涅尔透镜横截面的结构形式一致,但这实际上是菲涅尔透镜的一种等效的结构形式,而并没有实现典型菲涅尔透镜的环状锯齿型凹槽结构。本文提出了一种环形腔室的液体菲涅尔透镜,通过电润湿效应实现光轴方向的焦距调节。

2 结构设计及工作原理

2.1 结构设计

本文提出的菲涅尔透镜结构如图 1 所示,由内外两个同心圆环和方形玻璃基板组成,其中外圈圆环和内圈圆环在玻璃基板上构成了环形腔体,腔体内部填充不同折射率的导电液体和不导电液体,两种液体的密度相近,以保证器件具有更好的机械稳定性。

为了驱动该菲涅尔透镜,在外圈圆环内壁和内圈圆环外壁进行了膜层设计,如图 1 所示,外圈

圆环内壁上依次涂覆电极层、介电层和疏水层,内圈圆环外壁上涂覆疏水层。介电层采用高介电系数的材料,确保透镜在电压驱动下不会被击穿。疏水层的设计可以使内部液体在腔体侧壁上的粘附性减弱,获得更大的初始接触角。电极的一端连接在外圈圆环的内壁上,另一端连接基板。

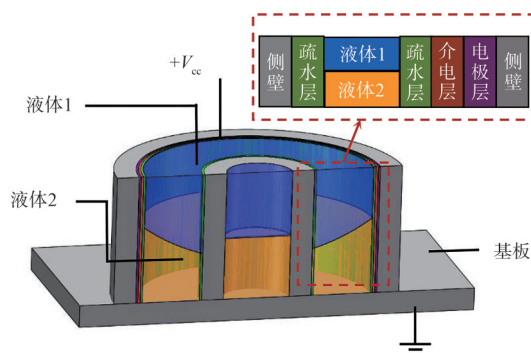


图1 所提出的菲涅尔透镜的结构

Fig. 1 Structure of the proposed Fresnel lens

2.2 工作原理

该菲涅尔透镜基于电润湿效应驱动。根据介电质上的电润湿效应,Young-Lippmann 方程描述^[22]为

$$\cos\theta = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon\epsilon_0}{2\gamma_{12}d}U^2, \quad (1)$$

式中, θ 为导电液体与介电层的接触角, θ_0 为未加电压前导电液体与介电层的初始接触角, ϵ 、 ϵ_0 分别为介质层介电常数和真空介电常数, d 为介电层厚度, γ_{12} 为导电液体和非导电液体的表面张力。

因此,在该菲涅尔透镜的两端施加不同的驱动电压可以控制液面与介电层之间的接触角,从而改变液-液界面的倾斜角度,实现对菲涅尔透镜的焦距控制,其具体的工作原理如图 2 所示。设液体与介电层的接触角为 θ ,光束进入导电液体后的偏转角度为 θ_2 ,由几何关系有

$$n_1\sin\theta = n_2\sin\theta_2, \quad (2)$$

$$\sin\beta = n_2\sin(\theta - \theta_2), \quad (3)$$

则会聚角 β 可以由接触角 θ 表示

$$\sin\beta = n_2\sin\theta \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\sin\theta\right)^2} - \frac{n_1}{n_2}\cos\theta\sin\theta, \quad (4)$$

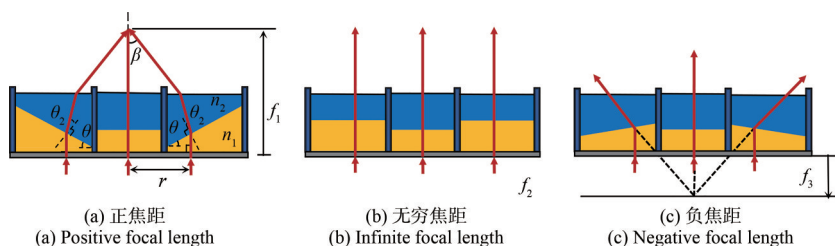


图2 所提出的菲涅尔透镜的变焦原理

Fig. 2 Zooming principle of the proposed Fresnel lens

焦距 f_1 由会聚角表示为

$$f_1 = r \tan \beta. \quad (5)$$

图2展示了该菲涅尔透镜不同的工作状态。图2(a)表示处于加电时的菲涅尔透镜,此时工作在正焦距状态。通过减小外加电压,可以逐渐改变液-液界面的倾斜角度,如图2(b)所示,此时菲涅尔透镜处于无穷焦距状态。图2(c)则表示未加电时菲涅尔透镜的工作状态,由于液体与介电层具有初始接触角,所以液-液界面并不是水平的,而是具有一定的倾角,此时菲涅尔透镜处于负焦距状态。

3 制作过程

该菲涅尔透镜制作过程如图3(a)所示,将内壁半径5.5 mm、厚度1 mm的大圆环和内壁半径

1.5 mm、壳厚1 mm的小圆环分别作为菲涅尔透镜的外环和内环,圆环的材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。按照图1所示的结构设计制作膜层,在大圆环内壁上,依次涂覆氧化铟锡(ITO)膜、UA胶和Teflon(AF-1600),分别作为电极层、介电层和疏水层,在小圆环内壁上涂覆Teflon(AF-1600)。制作过程中将ITO一面朝向填充液体。之后将两个不同半径、涂覆有膜层的圆环同心置于方形ITO玻璃基板上,构成一个环形的腔室。ITO玻璃基板尺寸为25 mm×25 mm×1 mm,制成的菲涅尔透镜总尺寸为25 mm×25 mm×6 mm。最后在环形腔体内填充导电液体($n=1.4313$, $\rho=1.110 \text{ g/cm}^3$)和不导电液体($n=1.492$, $\rho=1.058 \text{ g/cm}^3$)。其中导电液体位于下层,不导电液体位于上层。图3(b)为制作的菲涅尔透镜样品。

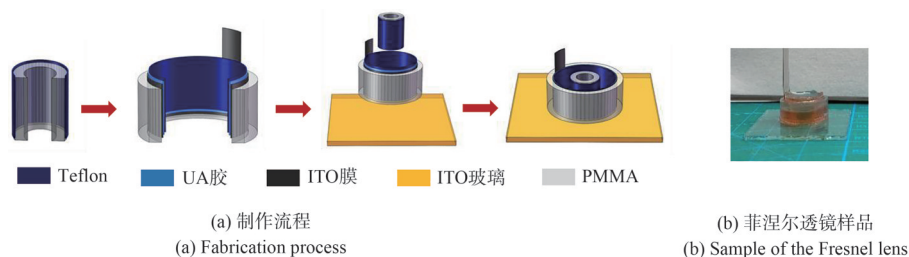


图3 菲涅尔透镜的制作流程及样品

Fig. 3 Fabrication process and sample of the Fresnel lens

4 实验与结果

4.1 菲涅尔透镜的驱动实验

为了更好地观察液体的运动状态,我们对导电液体进行了染色。选用频率1 kHz的正弦波交流电压对制作的菲涅尔透镜进行驱动。

图4(a)显示了初始的液-液界面状态。图4(b)~(f)分别显示了100~220 V电压驱动下

的液面情况。该液体菲涅尔透镜的驱动阈值电压约为20 V,当施加电压大于100 V时,液面的三相线和接触角发生明显变化,外环侧壁液面有较为明显的上升。当施加电压值大于220 V时,外壁液面无法继续上升,接触角达到饱和状态。取消外加电压后,液面会迅速恢复至初始状态。该菲涅尔透镜可以被反复驱动,具有较好的稳定性。

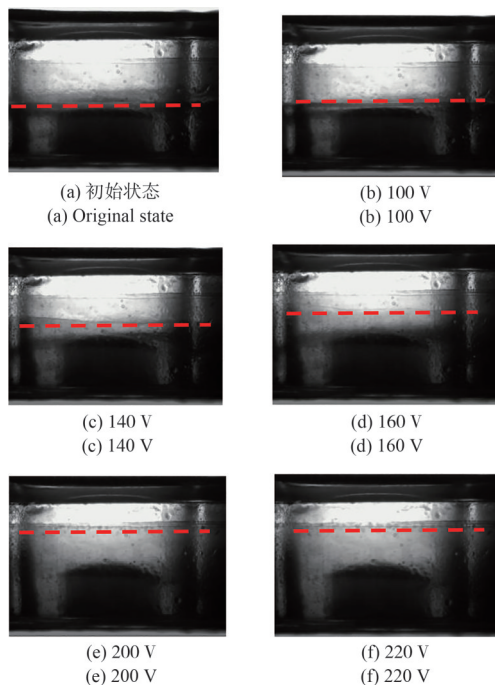


图 4 不同电压驱动下菲涅尔透镜的液面情况

Fig. 4 Liquid interface of the Fresnel lens driven by different voltages

4.2 菲涅尔透镜的焦距测量实验

我们对制作的菲涅尔透镜的焦距可调节范围进行了实验测试。搭建的实验光路如图 5 所示,经扩束后的激光通过衰减器,入射到反射镜上。调整反射镜面的倾斜角度,使反射的激光光束经过菲涅尔透镜样品垂直入射到 CCD 上。

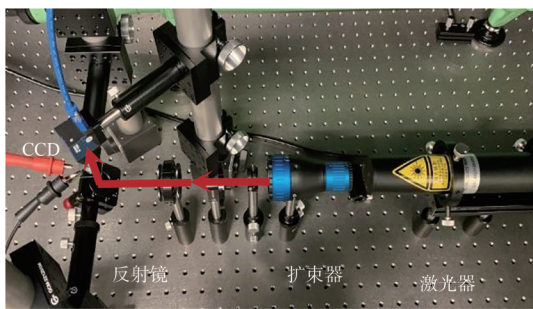
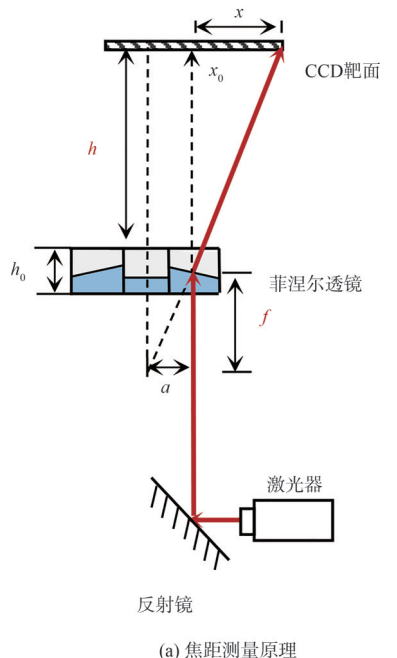


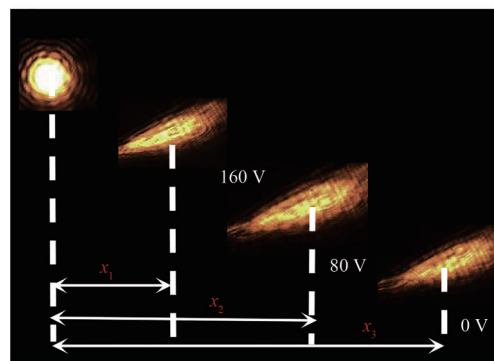
图 5 焦距测量实验装置

Fig. 5 Experimental setup used for the focal length measurement

如图 6(a)所示,激光光束垂直入射进环形腔室内液体界面的中心时,光束在的液-液界面发生偏折,相对于垂直入射的光斑位置 x_0 产生横向位移。



(a) Principle of the focal length measurement



(b) 实验结果

(b) Experimental results

图 6 菲涅尔透镜焦距测量原理与实验结果

Fig. 6 Principle and experimental results of the focal length measurement of the Fresnel lens

设激光光斑相对于菲涅尔透镜中心的横向位移距离为 x , CCD 靶面距菲涅尔透镜的高度为 h ,菲涅尔透镜高度为 h_0 ,光束垂直入射的位置距离透镜中心的距离为 a ,则根据几何关系有

$$\frac{x}{h + h_0/2} = \frac{a}{f}, \quad (6)$$

$$f = \frac{a(h + h_0/2)}{x}. \quad (7)$$

图 6(b)展示了电压分别为 160, 80, 0 V 状态下,激光光斑在 CCD 上成像的不同位置 x_1 、 x_2 、 x_3 。可以看到,随着电压值的增大,激光光斑的横向位移量减少,逐渐靠近垂直入射的初始位置

x_0 。达到饱和状态后,液-液界面不再发生移动,光斑也不再移动。

CCD靶面到菲涅尔透镜的距离 h 为49 mm, CCD像元尺寸为 $2.4\text{ }\mu\text{m}$,分辨率为 $3\,088\times 2\,064$ 。根据式(7)计算焦距,并将焦距与电压的关系绘制如图7所示。随着电压值从0~220 V之间逐渐增加,菲涅尔透镜的焦距在 $-52\sim-73\text{ mm}$ 之间连续变化。电压值在0~60 V时,激光光斑横向的位移量变化不明显,这是因为即使达到了透镜的驱动电压,但在驱动电压附近并不是透镜最佳的工作状态。随着电压值的增大,激光光斑的横向位移量随电压值的改变更加明显,激光光斑逐渐靠近垂直入射的位置。当电压超过160 V时,激光光斑几乎不再移动,这是因为液体界面接触角已经达到饱和状态,所以该菲涅尔透镜的

最佳工作电压为60~160 V。

4.3 讨论

激光光束通过菲涅尔透镜成像到CCD上后,光斑呈椭圆形,这是因为在我们的实验中,只在透镜外环的内壁上施加了电压,并不能很好地控制液-液界面为平整的斜面,因此成像的像差较大。在后续的实验中,可以同时在内环的外壁上施加电压,调整外环和内环上施加的电压差来调节液-液界面的形状,使液-液界面保持更好的斜面形态,从而优化像差。

该菲涅尔透镜只工作在负焦态,这是由于填充的两种液体折射率差值和液体与腔体侧壁的接触角不够大共同导致的。在未来的工作中,可以选用折射率差值更大的液体配方来增大焦距调节范围。

5 结 论

本文提出了一种基于电润湿效应驱动的液体菲涅尔透镜,通过电压来调控环形腔室内液面的倾斜角度,改变光束的偏折方向,实现了变焦功能。通过实验验证了所提出的菲涅尔透镜在光轴方向上具有焦距调节能力,其焦距变化范围为 $-52\sim-73\text{ mm}$ 。最小驱动电压约为20 V,饱和电压约为220 V。该菲涅尔透镜适用于有变焦需求、结构紧凑的光学系统,如LED照明、传感器、3D显示器等。

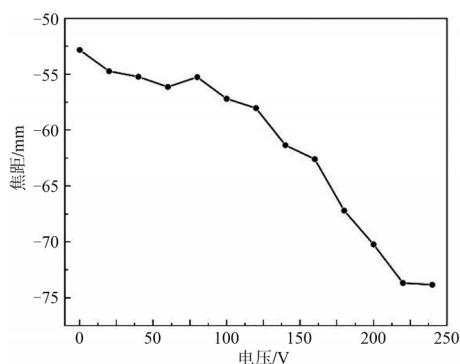


图7 菲涅尔透镜的焦距与驱动电压的关系

Fig. 7 Relationship between the focal length of the Fresnel lens and the driving voltage

参 考 文 献:

- [1] DAVIS A, KÜHNLENZ F. Optical design using Fresnel lenses: Basic principles and some practical examples [J]. *Optik & Photonik*, 2007, 2(4): 52-55.
- [2] XIE W T, DAI Y J, WANG R Z, *et al.* Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 2588-2606.
- [3] LEUTZ R, SUZUKI A, AKISAWA A, *et al.* Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators [J]. *Solar Energy*, 1999, 65(6): 379-387.
- [4] MA X L, LIANG S, JIN R H, *et al.* Characteristics of a zoomable Fresnel lens (ZFL) used for solar concentration [J]. *Energy*, 2020, 194: 116698.
- [5] HE J W, ZHAO C M, YANG S H, *et al.* Design of a solar pumped solid-state laser [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(12): 1115-1123.
- [6] HAIN M, SPIEGEL WVON, SCHMIEDCHEN M, *et al.* 3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 315-326.
- [7] 汪洋,王元庆. 多用户自由立体显示技术 [J]. *液晶与显示*, 2009, 24(3): 434-437.
- WANG Y, WANG Y Q. Auto-stereoscopic display for multi-users [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and*

- Displays*, 2009, 24(3): 434-437. (in Chinese)
- [8] 闵森林,王元庆. 基于菲涅尔透镜的新型立体显示系统[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 306-309.
MIN S L, WANG Y Q. New stereoscopic display system based on Fresnel lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(3): 306-309. (in Chinese)
- [9] ZHENG Y, WANG D, JIANG Z, *et al.* Continuous zoom compound eye imaging system based on liquid lenses [J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37565-37579.
- [10] JIANG Z, WANG D, ZHENG Y, *et al.* Continuous optical zoom microscopy imaging system based on liquid lenses [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20322-20335.
- [11] QU Y F, YANG H J. Optical microscopy with flexible axial capabilities using a vari-focus liquid lens [J]. *Journal of Microscopy*, 2015, 258(3): 212-222.
- [12] LI L, WANG D, LIU C, *et al.* Zoom microscope objective using electrowetting lenses [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2931-2940.
- [13] 张薇,田维坚. 大焦深内窥镜光学系统设计[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 558-560, 565.
ZHANG W, TIAN W J. Design of a kind of large depth of focus endoscope system [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(4): 558-560, 565. (in Chinese)
- [14] LI L, WANG D, LIU C, *et al.* Ultrathin zoom telescopic objective [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18674-18684.
- [15] KIM C J, CHANG M, LEE M, *et al.* Depth plane adaptive integral imaging using a varifocal liquid lens array [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2565-2571.
- [16] TAKEUCHI Y, MAEDA S, KAWAI T, *et al.* Manufacture of multiple-focus micro Fresnel lenses by means of nonrotational diamond grooving [J]. *CIRP Annals*, 2002, 51(1): 343-346.
- [17] LI X M, WEI L, POELMA R H, *et al.* Stretchable binary Fresnel lens for focus tuning [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25348.
- [18] PARK S, PARK B, NAM S, *et al.* Electrically tunable binary phase Fresnel lens based on a dielectric elastomer actuator [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 23801-23808.
- [19] MA X L, LIANG S, JIN R H, *et al.* Characteristics of a zoomable Fresnel lens (ZFL) used for solar concentration [J]. *Energy*, 2020, 194: 116698.
- [20] CLEMENT C E, THIO S K, PARK S Y. An optofluidic tunable Fresnel lens for spatial focal control based on electrowetting-on-dielectric (EWOD) [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 240: 909-915.
- [21] TAKAI Y, KOSHIISHI R, KIRITA S, *et al.* Electrowetting Fresnel lenticular [C]//*Proceedings of the 2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Paris, France: IEEE, 2012: 632-635.
- [22] 赵悠然,徐近博,刘超,等. 大口径电润湿液体透镜[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(9): 877-882.
ZHAO Y R, XU J B, LIU C, *et al.* Large aperture electrowetting-based liquid lens [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(9): 877-882. (in Chinese)

作者简介:



王 鑫(1997—),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,2021年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事液体光子器件与成像技术方面的研究。E-mail: xinwang2117@buaa.edu.cn



刘 超(1988—),男,山西太原人,博士,副教授,2016年于四川大学获得博士学位,主要从事液体光子器件与成像技术方面的研究。E-mail: chaoliu@buaa.edu.cn