

# 紧凑型横向变焦系统关键器件的设计方法与功能验证\*

张勇飞<sup>1</sup>, 贾丹阳<sup>2</sup>, 杨大海<sup>3</sup>, 王逸群<sup>4</sup>

(1. 上海航天控制技术研究所·上海·201109;

2. 成都飞机工业有限责任公司·成都·610000;

3. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院·哈尔滨·150001;

4. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所·苏州·215123)

**摘要:** 变焦系统可实现连续的光学变焦, 可对不同景深的目标实现连续成像, 在焦深延拓和光学检测等领域中具有广泛的应用和发展潜力。提出了一种紧凑型可实现连续变焦功能的扁平化位相衍射元件, 并设计分析和验证了横向调制相位型变焦衍射元件的功能。通过标量衍射基本理论模型, 借助菲涅尔波带和多台阶相位衍射元件的设计方法, 实现了横向变焦关键器件的设计仿真和实验验证。以多波长响应的空间光调制器为基础, 搭建了器件相位调制验证实验系统, 通过测试证明了所设计器件的变焦能力, 仿真和实验测试均可实现5倍变焦目标的有效调制。

**关键词:** 变焦系统; 横向变焦; 衍射元件; 空间光调制器

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2020)06-0076-08

## Design Method and Functional Verification of Key Components of Compact Lateral Zoom

ZHANG Yongfei<sup>1</sup>, JIA Danyang<sup>2</sup>, YANG Dahai<sup>3</sup>, WANG Yiqun<sup>4</sup>

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;

2. Corporation Chengdu Aircraft Industry Co. Ltd., Chengdu 610000;

3. School of Instrument Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

4. Suzhou Institute of Nanotechnology and Nano Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123)

**Abstract:** The zoom system can achieve continuous optical zoom, and achieve continuous imaging of targets with different depths of field. It has wide application and development potential in the fields of focal depth extension and optical inspection. This paper proposes a compact and flat phase diffractive element that can realize continuous focusing function, and design, analyze and verify this kind of phase-type zoom diffractive element that can realize lateral modulation. Through the basic theoretical model of scalar diffraction and the design method of Fresnel band and multi-step phase diffractive element, the simulation and experimental verification of key components of lateral zoom are realized. And based on the multi-wavelength response spatial light modulator, the device phase modulation verification experimental system was built that prove the modulation capability. The results of the experimental simulation tests show that the key components can achieve effective modulation of the lateral zoom, and the zoom ratio can reach the designed 5 times zoom target.

**Keywords:** zoom system; lateral zoom; diffractive element; spatial light modulator

\* 收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-11-14

作者简介: 张勇飞 (1979—), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: zh@hrbeu.edu.cn

## 0 引言

光学变焦系统在仪器和成像系统中有着广泛的应用,包括目标检测、视频监控、武器制导等诸多领域<sup>[1-3]</sup>。光学变焦系统是指一种焦距可在一定范围内连续变化,而在变焦过程中可保持像面不动且成像质量良好的光学系统<sup>[4]</sup>。较之于定焦光学系统,变焦系统最大的优点在于焦距可连续任意调整,从而实现对不同距离的物体成像,大大简化了光学系统的结构设计。

近年来,随着光学系统的不断发展,变焦镜头在很多领域得以应用,如智能手机、虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)、增强现实技术(Augmented Reality, AR)等新型应用场景。消费级光电子领域不仅要求光学变焦系统具有良好的变焦范围和成像效果,而且对其尺寸和质量也提出了更高的要求。因此,在不断扩大光学系统变焦范围、提高成像质量的同时,致力于减小系统尺寸、质量和系统的复杂性,逐渐成为当下新型光学变焦系统的研究重点。因此,对紧凑型变焦系统的关键器件进行研究有着重要实际意义<sup>[5-6]</sup>。目前,变焦系统方案大致可分为三类:①基于镜组中透镜间相对位置的纵向调节方式(简称纵向变焦);②基于镜组中透镜自身焦距改变;③基于横向位移实现焦距变化的变焦系统。纵向变焦方案有着悠久的发展历史,最早可以追溯到1834年英国工程师彼得巴洛(Peter Barlow)提出的巴洛透镜。它通过机械结构调节多个光学元件之间的纵向间隔,进而实现变焦功能<sup>[7]</sup>。但是,纵向变焦系统和可调透镜存在体积大、成本高、变焦速度慢等缺点,系统的灵活性受到了限制<sup>[8-11]</sup>。而在横向位移变焦系统中,当透镜组垂直于光轴进行横向移动时,焦距将随位移产生变化<sup>[12]</sup>。

横向变焦器件最早出现于1967年,Luis W. Alvarez在发表的专利中提出了用于眼科医学的变焦镜组。该变焦镜组由一对共轭、旋转不对称的自由曲面透镜构成,透镜一侧为平面,另一侧为特定的三次曲面<sup>[12]</sup>。2000年,Ian M. Barton等人首次利用衍射光学元件实现了横向变焦,可以通过移动衍射透镜来产生任意的焦点。自此,各种基于横向变焦概念的光学器件或系统陆续出现<sup>[13]</sup>。2012年,Paul等人利用金刚石加工的方法成功制作了用于横向变焦的红外透镜,并演示了

其中红外波段的聚焦效果。该装置的聚焦变化范围约为40mm~170mm,通过成像试验得到了实验验证<sup>[14]</sup>。2013年,Guangya Zhou等人实现了一种基于横向变焦原理的集成可变焦透镜,可以实现焦距超过1.5倍的动态调节,焦距范围为3mm~4.65mm<sup>[15]</sup>。2017年,Alan Zhan等人提出了一种工作在可见波段的氮化硅超表面横向变焦器件,器件孔径为1cm,工作波长为1550nm,并证明了焦距的非线性变化。实验测得该器件的聚焦效率高达57%,焦距变化范围超过6cm,其超表面透镜具有4倍变焦成像功能<sup>[16]</sup>。在2018年,侯昌伦等人设计并研制了一套3倍光学变焦系统,其焦距为34.5mm~103.5mm,他们认为该变焦镜头可能在未来替代传统变焦镜头,特别是在一些存在空间约束的应用场景,如手机摄像模块等<sup>[17]</sup>。

本文从横向变焦的基本原理出发,结合衍射光学元件独有的结构紧凑、质量小等优点,提出了一种新型横向变焦叠加相位型衍射元件。根据设计的器件特性,利用标量衍射理论作为器件设计模型和焦场分析模型,对器件的聚焦性能与变焦能力进行了分析,并利用空间光调制器验证了其横向调制变焦的能力。

## 1 横向变焦原理

横向变焦由两片面型互补的自由曲面透镜组成,其中单个透镜的一侧表面为平面,另一侧表面为三次曲面,透镜组中的一片透镜相对另一个反向放置,并且垂直于光轴排布。横向变焦系统的组成与基本原理如图1(a)、图1(b)、图1(c)所示,其中S1、S2代表两块透镜,红色箭头表示光传播的方向。当S1、S2两者对齐放置时,两个透镜是互补的,光相当于通过了一层平行平板,没有调制作用;当两者同时向相反方向进行横向运动对称平移时,入射光经过透镜的重叠部分,其调制作用相当于凹透镜,如图1(b)所示,或其调制作用相当于凸透镜,如图1(c)所示,而出射光束会随重叠区域的变化而呈现发散或者汇聚。

由于S1和S2面型互补,它们的相位调制函数 $\varphi_{1,2}(x,y)$ 可表达为共轭形式

$$\varphi_{1,2}(x,y) = \pm A \left( \frac{x^3}{3} + xy^2 \right) \quad (1)$$

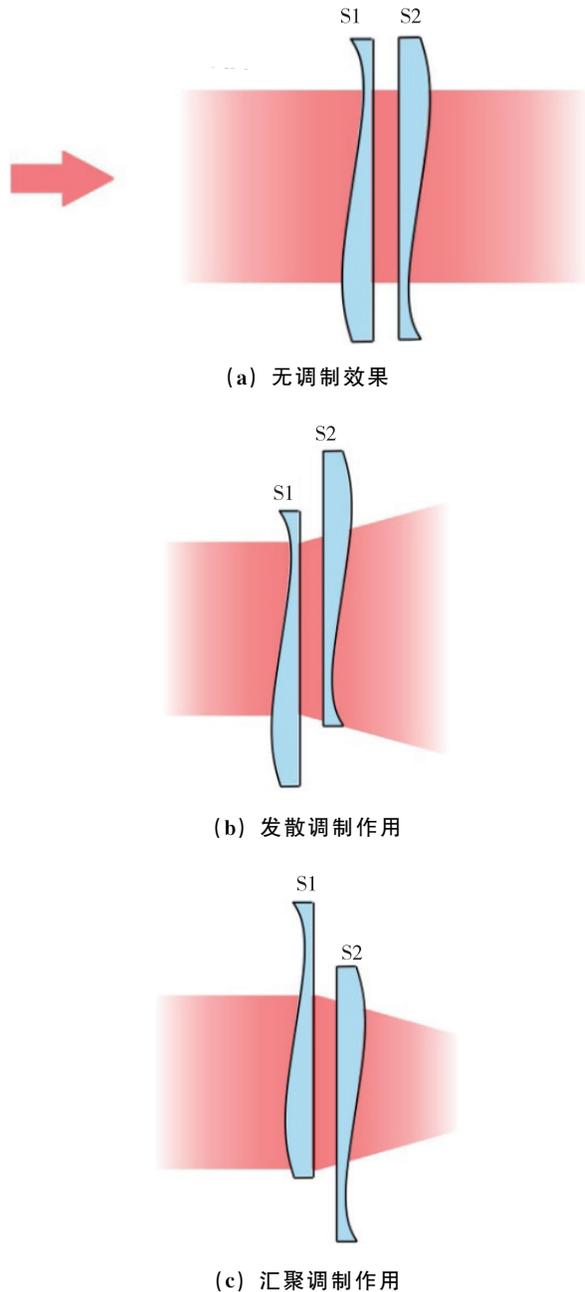


图1 横向变焦原理图

Fig. 1 Schematic of lateral zoom principle

其中,  $(x, y)$  为直角坐标系下的坐标值;  $\pm$  表示互补的共轭相位;  $A$  表示变焦调制系数。  $A$  的数值大小决定了焦距的调节能力, 数值越大, 在相同的移动范围内, 焦距变化越大, 反之越小。假设  $S1$  和  $S2$  分别沿横轴平移, 当两者分别从中心位置运动了距离  $d$  时, 此时两者重叠部分的相位叠加, 可以得到重叠部分的相位分布为  $\varphi$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = A \left( \frac{(x-d)^3}{3} + (x-d)y^2 \right) -$$

$$A \left( \frac{(x+d)^3}{3} + (x+d)y^2 \right) \quad (2)$$

公式 (2) 经整理可得

$$\varphi = -2Adr^2 - \varphi_0 \quad (3)$$

其中,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  是以光轴为中心的圆柱坐标系的径向分量,  $\varphi_0$  为没有调制作用的全局相位, 可以忽略。公式 (3) 中的第一项为具有调制作用的二次相位。在标量衍射理论中, 其相位调制函数可以表示类比于抛物透镜的形式, 如式 (4) 所示<sup>[17]</sup>

$$\varphi' = -2Adr^2 \stackrel{!}{=} \frac{\pi r^2}{\lambda f} \quad (4)$$

式中符号  $\stackrel{!}{=}$ , 表示类比相等。可以由式 (4) 得出焦距的依赖表达式为

$$f(d) = \frac{\pi}{2A\lambda d} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  表示入射光波长,  $f$  表示透镜组的焦距。由焦距表达式可以看出, 焦距是随  $d$  变化的,  $d$  是透镜在  $x$  轴正方向的位移量, 符号仅代表运动方向。当  $d > 0$  时, 出射光线发散; 相反, 当  $d < 0$  时, 出射光线汇聚。焦距的大小则由系数  $A$  和  $d$  决定。

## 2 横向变焦衍射光学器件设计与仿真分析

### 2.1 横向变焦衍射光学器件设计

在衍射光学变焦器件的设计前, 需要综合考虑器件原理和实际需求, 从而确定系统的设计参数。首先, 本文中系统的工作波长为  $632.8\text{nm}$ 。根据设计指标确定器件的面型尺寸和通光孔径大小, 本文选定的变焦器件尺寸为  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 孔径为直径为  $5\text{mm}$  的圆孔。为了保证器件两者在通光部分一直有重叠部分, 单一器件横向平移范围为距离光轴  $0 \sim 2.5\text{mm}$ 。

同时, 设定最小采样点尺寸为  $2\mu\text{m}$ , 根据横向变焦的设计原理, 调制系数  $A$  的最大取值为  $6.2832 \times 10^{10}\text{m}^{-3}$ 。为了避免在设计结构时出现采样不足的现象, 设定值需要设定为最大值的一半, 取  $A$  为  $3.808 \times 10^{10}\text{m}^{-3}$ 。在理论上, 当器件无位移时, 系统的焦距可以无穷大, 但考虑到聚焦效率, 所以变焦器件的最小位移量需要设定为  $0.5\text{mm}$ 。由公式 (5) 可得, 系统的变焦范围为  $30 \sim 150\text{mm}$ , 可实现 5 倍变焦。表 1 所示为横向变焦衍射光学器件的总体设计参数。

表 1 横向变焦衍射元件的总体设计参数  
Tab. 1 Overall design parameters of lateral zoom diffractive element

工作波长	器件尺寸	通光孔径	平移范围	最小采样点数
632.8nm	10mm×10mm	5mm	0~2.5mm	2 $\mu$ m
变焦调制系数	最小位移量	器件变焦范围	变焦倍率	最大光程差
6.2832×1010m <sup>-3</sup>	0.5mm	30~150mm	5 倍	1756 倍

通过将相位分布转化为光程差的公式  $\varphi/2\pi$  可知, 该横向变焦器件的最大光程差为设计波长的 1756 倍。若通过折射透镜实现该位相函数, 器件在最厚处可达厘米级, 不具有实际应用价值; 衍射光学元件具有轻量化和紧凑性的性质, 通过对横向调制变焦透镜进行扁平化处理, 其厚度会大大降低, 可以适用于小型化的应用场景。波带片型衍射光学元件通过将连续的相位进行量化, 转化为波带片环带的浮雕轮廓面型参数, 可实现透镜的小型化。本文选择了两台阶化的相位型衍射元件来设计横向变焦关键器件。具体设计步骤如下:

(1) 首先, 设置器件的设计参数, 如工作波长为 632.8nm, 系数 A 为  $3.81 \times 1010\text{m}^{-3}$ , 横向运动范围为 0.5~2.5mm, 焦距满足公式 (5)。

(2) 根据采样公式计算合适的采样间隔, 设定单位尺寸为  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ , 器件的尺寸为 10mm×10mm, 生成并初始化  $5000 \times 5000$  的二维网格以存储器件面型信息。然后, 设置输入平面的初始相位值  $\varphi$ 。

(3) 利用相位型波带片的设计方法, 对连续相位进行分层压缩处理, 得到分段连续分布相位  $\text{mod}_{2\pi}(\varphi)$ 。其中, mod 表示取余运算, 再对分层后的相位进行离散化处理, 将  $2\pi$  周期平均分成  $N$  个台阶。在本设计中,  $N$  的取值为 2, 值分别为 0 和  $\pi$ , 得到离散的台阶相位  $\text{mod}_{2\pi}(\varphi) \frac{2\pi}{N}$ 。

(4) 在后续分析中, 可以通过改变重叠网格部分实现器件的横向平移。采用标量衍射积分公式, 可对衍射光场的焦距、焦点的横向半高宽等特性参数进行计算分析。

根据以上分析, 设计了如图 2 所示的横向

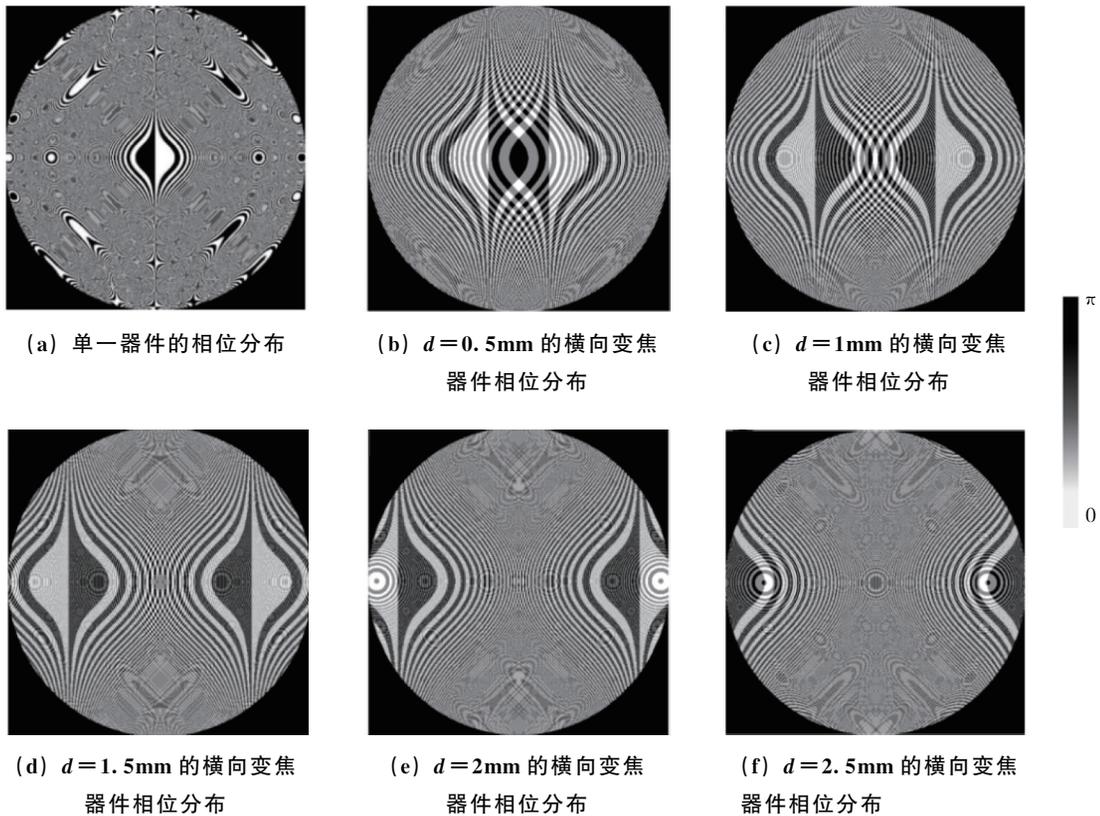


图 2 横向变焦波带相位型衍射元件相位分布图

Fig. 2 Schematic of transverse zoom band phase diffraction element

变焦衍射元件。设计结果如图2所示,图2(a)为单一器件的相位分布图,图2(b)~图2(d)分别表示移动距离为 $d=0.5\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ 、 $2\text{mm}$ 时,横向变焦波带型衍射元件的相位分布示意图。

## 2.2 横向变焦衍射光学器件仿真分析

为了验证上述波带片型变焦组件的变焦性能,

本文分别对平移距离为 $0.5\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ 、 $2\text{mm}$ 、 $2.5\text{mm}$ 的叠加组合变焦器件进行了仿真分析,利用菲涅尔衍射积分公式,分别计算了 $d$ 为 $0.5\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ 、 $2.5\text{mm}$ 时的远场聚焦光斑,如图3所示。

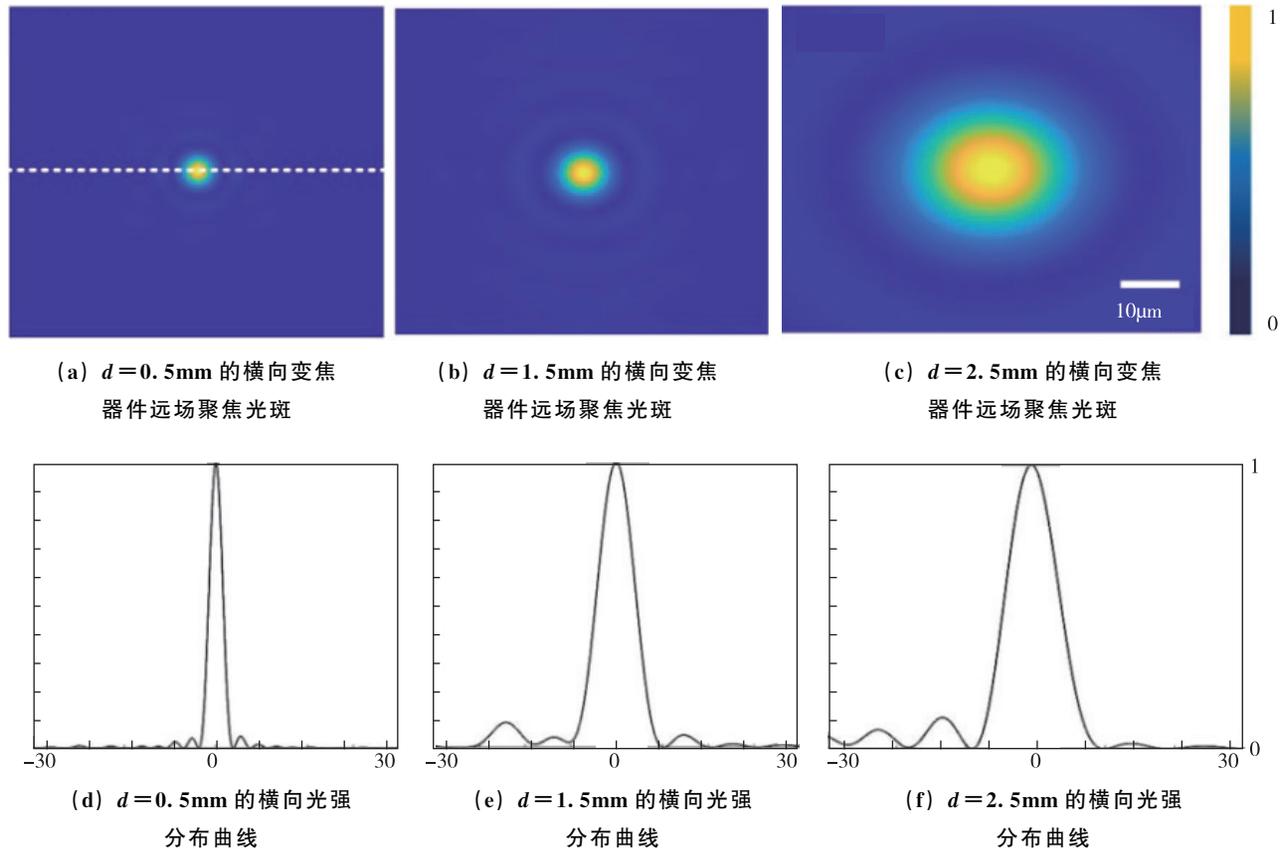


图3 横向变焦波带相位型衍射元件的聚焦光场分布

Fig. 3 Focused light field distribution of transverse zoom band phase diffraction element

从图3的仿真结果可以看到横向变焦器件在不同的叠加移动距离 $d$ 下,均能够很好地实现光场的聚焦,光斑质量良好。图3(a)~图3(c)分别为 $d=0.5\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ 、 $2.5\text{mm}$ 的横向变焦器件远场聚焦光斑的仿真结果计算图。从仿真结果可以发现,随着移动距离的增大,光斑会出现明显的弥散,周围的旁瓣也会越来越大。在图3(d)~图3(f)的光斑一维横向截面的光强分布曲线中,也可以看到光斑的半径明显变大,周围的旁瓣也变大。为了更好地说明光斑的质量,表2对各项数据进行了总结。

表2 光斑质量分析数据

Tab. 2 Spot quality analysis data 单位:  $\mu\text{m}$

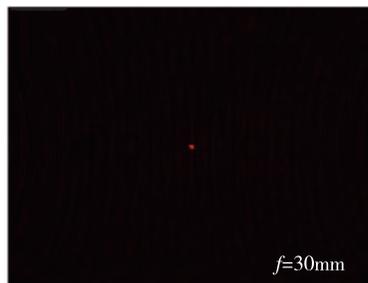
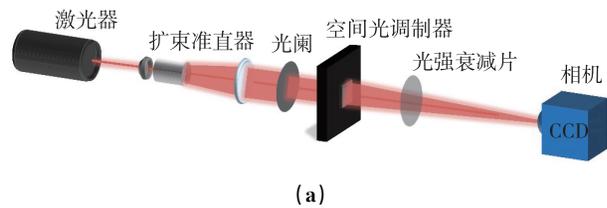
平移量	$x$ 横向半高宽	$y$ 横向半高宽	焦深	衍射极限
2500	4.8	4.7	470	4.0
2000	6.7	5.3	552	5.0
1500	7.4	7.2	781	6.7
1000	10.6	10.4	1274	10.1
500	21.7	20.9	2481	20.1

如表2所示,在不同的移动距离 $d$ 下,光斑的横向半高宽会明显变大,与图3的结果对应一致。但是,其总的横向半高宽大小接近衍射极限

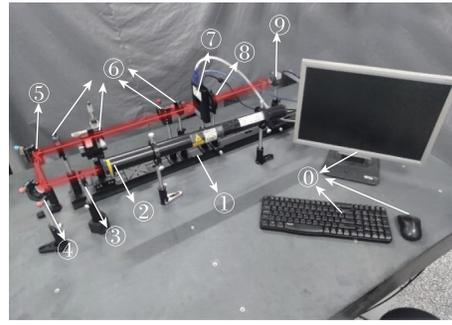
的理论计算值, 这说明光斑的聚焦效果良好, 能够很好地实现聚焦。从焦深的理论计算和仿真数据中可以看到, 其变焦器件可以达到 5 倍变焦的效果。

### 3 验证实验与结果分析

为了更好地验证本文提出的变焦器件的功能, 本文设计了基于空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 的验证实验。可通过液晶空间光调制器, 直接加载经过横向平移叠加设计的变焦衍射元件, 来验证其变焦性质。通过对平移量的调整, 可以模拟变焦器件横向运动时重叠区域相位变化的情况, 进而对入射光束进行相位调制, 验证变焦器件的光学变焦效果。图 4 所示为搭建的实验验证系统。图 4 (a) 为光路调制的示意图, 图 4 (b) 为对应的实际光路系统。由于在实际的实验过程中, 实验室光学平台的长度有限, 所以本文中的光路选择了如图 4 (b) 所示的反射光路。为了达到更好的实验效果, 在实际光路系统中, 进行了多次小孔滤波, 使得杂散光尽可能减少。图 4 (b) 中对应的序号, 为实际光路系统中对应的光学元件。在光路中, 为了实现更好的对准, 扩束准直器的物镜被搭载在具有五维调节能力的调节架上。其数值孔径  $NA$  为 0.5, 放大倍率为 30, 这样能使扩束准直的光波恰好入射到空间光调制器的中心。



(a)  $d=0.5\text{mm}$  的横向变焦聚焦场, 焦距  $f=30\text{mm}$

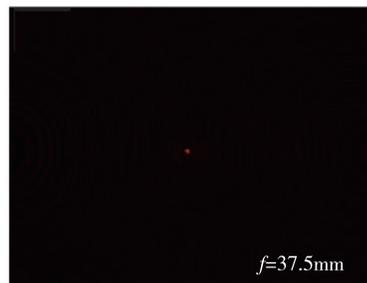


(b)

①计算机 (控制 SLM 与 CCD); ②光学导轨; ③632.8nm 的 He-Ne 激光器; ④小孔光阑; ⑤/⑥反射镜; ⑦扩束准直器 (小孔、物镜、透镜、小孔); ⑧空间光调制器 (SLM); ⑨光强衰减镜; ⑩相机 (CCD)

图 4 横向变焦波带相位型衍射元件聚焦验证实验装置  
Fig. 4 Experimental device of lateral zoom band phase diffraction element

在验证实验装置图 4 中, 各个器件的组成与功能分别是: 光源为 He-Ne 激光器, 型号为 Meller Gright25-LHP-925-230, 波长为 632.8nm, 线偏振输出, 最大输出功率 30mW, 输出光强分布呈近高斯分布。激光器出射的高斯光, 经过一个扩束准直器后调制成一个近平面波。通过小孔光阑进行杂散光的滤波, 出射光场入射到透过式空间光调制器。空间光调制器的型号为 Real Light-SLM-T1, 振幅兼相位调制型, 液晶面尺寸为  $18.6\text{mm}\times 14.5\text{mm}$ , 液晶像元大小为  $12.8\mu\text{m}$ 。空间光调制器通过计算机来加载如图 2 所示的横向变焦调制相位。经过空间光调制器加载的相位调制后, 聚焦光斑在 CCD 上被接受。CCD 相机型号为 DaHeng Galaxy viewer, 单个像素间距为  $3.45\mu\text{m}$ , 像素点个数为  $2456\times 2058$ , 光谱响应范围为  $400\text{nm}\sim 1000\text{nm}$ 。为了不让 CCD 过饱和, 在其前面加载了一个光强衰减片, 所得到的实验结果如图 5 所示。



(b)  $d=1\text{mm}$  的横向变焦聚焦场, 焦距  $f=37.5\text{mm}$

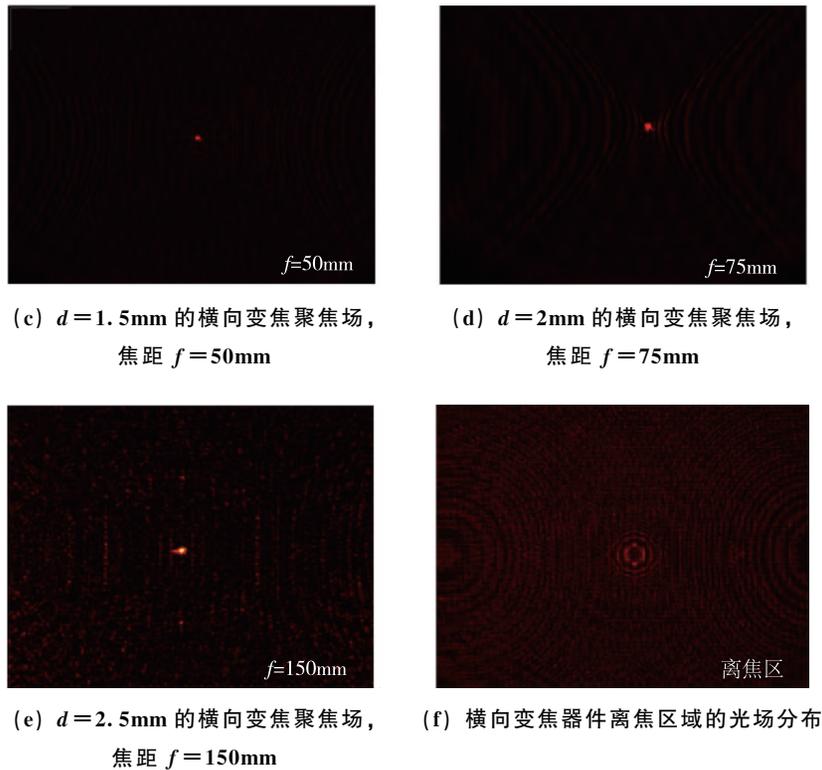


图5 横向变焦相位型衍射元件实验聚焦光场分布

Fig. 5 Experiment of transverse zoom band phase diffraction element

通过图5的实验聚焦场可以观察到, 本文提到的横向变焦波带相位型衍射元件能够实现良好的聚焦效果, 与仿真结果一致。随着横向距离  $d$  的变化, 聚焦场的焦距发生了明显的变化。图5(a)~图5(e)分别表示的是随着变焦器件横向距离  $d$  的变大, 聚焦场的光斑会在不同的聚焦位置形成。从变焦器件叠加相位横向距离  $d=0.5\text{mm}$  到  $d=2.5\text{mm}$  的变化中, 聚焦光斑焦距  $f$  会从  $f=30\text{mm}$  变化到  $f=150\text{mm}$ , 实现了5倍变焦的效果。图5(f)显示的是横向距离  $d$  没有变化时, 器件是没有聚焦效果的, 对应图1(a)的情况。图5(f)也可以证明只有在横向距离  $d$  的控制下, 器件才会产生聚焦效果。

## 4 结 论

本文提出了一种可实现变焦的横向调制组合相位型衍射元件。借助相位型波带片的设计方法和线性系统相位可叠加的基本原理, 通过仿真设计和空间光调制器实验系统的验证, 设计的紧凑型横向变焦关键器件可实现5倍变焦比的有效调制。同时, 只需要横向移动相位位移, 就可实现大倍数的变焦, 进一步可使变焦系统的结构设计

简化。其次, 衍射元件具有轻薄特性, 可以减小系统质量, 适合手机的相机模组、AR图像耦合等小型化的变焦应用场景。在空间光调制器的验证实验中, 空间光调制器具有多波长的响应特性, 本文提到的关键器件的相位设计方法和功能同样在其他波段也适用, 例如红外波段的成像调焦、X射线波段的医学成像调焦等。

总而言之, 本文提出的设计方法和验证实验为变焦元件的设计提供了一种新的设计思路和方法验证。同时, 随着目前集成超构表面技术的发展, 本文提到的紧凑型横向变焦关键器件的叠加相位, 也有望在超构表面技术的带动下实现新的突破。

## 参考文献 (References)

- [1] ZHANG X, SUN J, LU S. Spectrum zoom processing for low-altitude and slow-speed small target detection [C] // International Conference on Geo-spatial Knowledge & Intelligence, Singapore: Springer, 2018: 405-413.
- [2] 王潇枫, 石岩, 庄一, 等. 变焦结构光成像系统的光学设计 [J]. 应用光学, 2018, 39 (1): 22-27.  
WANG X F, SHI Y, ZHUANG Y, et al. Optical design of zoom structured light imaging system [J]. Applied Optics,

- 2018, 39 (1): 22-27 (in Chinese) .
- [ 3 ] 罗春华, 岳品良, 张东虎, 等. 变焦投影物镜光学系统设计 [J]. 应用光学, 2017, 38 (2): 180-186.  
LUO C H, YUE P L, ZHANG D H, et al. Optical system design of zoom projection objective lens [J]. Applied Optics, 2017, 38 (2): 180-186 (in Chinese) .
- [ 4 ] JIANG L, HUANG W. Lens design for optical system of high zoom ratio [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31 (12): 1222006.
- [ 5 ] 张健, 罗天娇, 罗春华, 等. 30mm~300mm 轻型变焦物镜光学系统设计 [J]. 应用光学, 2019, 40 (1): 59-65.  
ZHANG J, LUO T J, LUO C H, et al. Optical system design of 30mm~300mm light zoom objective lens [J]. Applied Optics, 2019, 40 (1): 59-65 (in Chinese) .
- [ 6 ] 张以谟. 应用光学 [M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
ZHANG Y M. Applied optics [M]. Third edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008 (in Chinese) .
- [ 7 ] SUN-HYUNG J, SUNG-CHAN P. Design and analysis of an 8x four-group zoom system using focus tunable lenses [J]. Optics Express, 2018, 26 (10): 13370-13382.
- [ 8 ] 张薇. 液体透镜技术及其在微型变焦距系统中的应用 [D]. 西安: 中国科学院研究生院 (西安光学精密机械研究所), 2009.  
ZHANG W. Liquid lens technology and its application in miniature zoom system [D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics), 2009 (in Chinese) .
- [ 9 ] LI L, WANG J H, WANG Q H, et al. Displaceable and focus-tunable electrowetting optofluidic lens [J]. Optics Express, 2018, 26 (20): 25839-25848.
- [10] JEONG K H, LIU G L, CHRONISHR N, et al. Tunable microdoublet lens array [J]. Optics Express, 2004, 12 (11): 2494-2500.
- [11] 吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐. 可调微流控光学变焦透镜 [J]. 发光学报, 2015, 36 (6): 718-723.  
WU W T, LIANG Z Z, ZHANG L. Adjustable microfluidic optical zoom lens [J]. Acta Luminica Sinica, 2015, 36 (6): 718-723 (in Chinese) .
- [12] ALVAREZ L W. Two-element variable-power spherical lens [P]. US: 1967.
- [13] BARTON I M, DIXIT S N, SUMMERS L J, et al. Diffractive Alvarez lens [J]. Optics Letters, 2000, 25 (1): 1-3.
- [14] SMILIE, PAUL J. Design and characterization of an infrared Alvarez lens [J]. Optical Engineering, 2012, 51 (1): 013006.
- [15] ARBABIR E, ARBABIR A, KAMALI S M, et al. MEMS-tunable metasurface lens [J]. Nature Communications, 2017, 9 (1): 812-835.
- [16] SHANE C, ALAN Z, ARKA M. Varifocal zoom imaging with large area focal length adjustable metalenses [J]. Optica, 2018, 5 (7): 825-831.
- [17] HOU C, XIN Q, ZANG Y. Optical zoom system realized by lateral shift of Alvarez freeform lenses [J]. Optical Engineering, 2018, 57 (4): 045103.1-045103.8.