

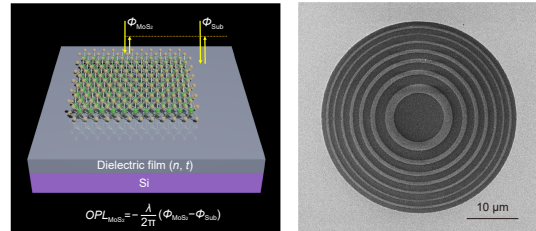


DOI: 10.12086/oe.2022.220011

# 原子层厚度菲涅尔波带片及其宽谱聚焦特性

吴瑾, 秦飞\*, 李向平

暨南大学光子技术研究院, 广东省光纤传感与通信重点实验室, 广东广州 511443



**摘要:** 基于菲涅尔波带片构型的平面衍射透镜在现代光学系统中发挥着重要的作用, 是高端光学成像系统等应用的关键元器件之一。现有菲涅尔波带片结构多基于金属薄膜或高折射率电介质材料来制备, 难以满足集成光电子系统可集成化的核心需求。本文提出一种基于原子层厚度二维材料的菲涅尔波带片结构, 基于损耗辅助的相位调控机制, 在原子层厚度的  $\text{MoS}_2$  二维半导体材料上实现了对整个可见光波段显著的相位调制能力。利用飞秒激光加工技术, 制备了二元相位型菲涅尔波带片, 理论和实验验证了宽谱衍射受限的聚焦特性。与单层过渡金属硫化物材料的直接带隙特性相结合, 该工作为实现光子集成系统提供了一种可行的路径。

**关键词:** 二维材料; 相位奇点; 损耗辅助; 菲涅尔波带片; 可集成化

**中图分类号:** O469; TH74

**文献标志码:** A

吴瑾, 秦飞, 李向平. 原子层厚度菲涅尔波带片及其宽谱聚焦特性 [J]. 光电工程, 2022, 49(4): 220011

Wu J, Qin F, Li X P. Atomically thin Fresnel zone plate with broadband focusing property[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(4): 220011

## Atomically thin Fresnel zone plate with broadband focusing property

Wu Jin, Qin Fei\*, Li Xiangping

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China

**Abstract:** The planar diffractive lens in zone plate-type configuration plays important roles in the modern optical system, especially in the advanced optical imaging system. Most of them are constructed with opaque metal or dielectric materials with a high refractive index, which restricts the integration possibility for the miniaturized photonic systems. In this work, we proposed and experimentally demonstrated an atomic thin Fresnel zone plate device with 2D semiconductor material. Based on the loss-assisted phase modulation mechanism, an extraordinary phase modulation capability in the entire visible region has been achieved by an atomic thin  $\text{MoS}_2$  sheet. By utilizing the femtosecond laser scribing technique, a binary phase Fresnel zone plate has been fabricated on the atomic thin  $\text{MoS}_2$  sheet. The diffraction-limited focusing property in broadband has been demonstrated in simulation and experiments. Combining with the direct bandgap property of the monolayer  $\text{MoS}_2$  material, this phenomenon may pave the road for the integrated optical system.

**Keywords:** 2D materials; phase singularity; loss-assisted; Fresnel zone plate; integrateable

收稿日期: 2022-03-06; 收到修改稿日期: 2022-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62075085); 广州市基础与应用基础研究项目 (202002030258)

\*通信作者: 秦飞, qinfei@jnu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

## 1 引言

基于光学衍射效应的平面透镜具有平面构型、轻量化、方便制备等显著优势, 得益于紧凑的结构设计和独特的光学性能, 平面衍射透镜已经在空间望远镜系统、高性能显微物镜、光学投影照明系统, 以及光谱分析系统等领域中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。与传统基于折射效应的体材料透镜相比, 平面衍射透镜还具有光场调控灵活的独特优势, 基于平面超透镜的超衍射极限光场调控效应也被广泛研究, 并在远场无标记光学超分辨显微成像<sup>[4-7]</sup>, 超分辨望远成像<sup>[8-9]</sup>, 以及高精度激光加工和光存储等领域展示了应用价值<sup>[10-14]</sup>。常用的构建平面衍射透镜的三种结构类型主要包括同心圆环式的波带片结构<sup>[15-17]</sup>, 亚波长孔阵式的光子筛结构<sup>[18-19]</sup>和亚波长散射单元的超表面结构<sup>[20-22]</sup>。光子筛结构和超表面结构的设计都基于亚波长的结构单元, 加工制备需要用到深紫外曝光技术或者电子束直写工艺, 工艺复杂。基于金属薄膜或者高折射率电介质材料的二元强度或者相位型波带片结构目前仍是平面衍射透镜领域研究和应用最广泛的类型。然而, 受材料体系的限制, 目前已验证的平面衍射透镜仍难以实现与其他主被动光学器件同平台集成的可能, 一定程度上制约了集成光子系统的发展。开发一种基于新材料体系的平面衍射透镜是构建全光集成系统的必然需求, 而有效的相位调控能力是构建平面衍射透镜的先决条件。

近年来, 基于二维半导体材料的光子器件得到人们的广泛关注<sup>[23-25]</sup>。其中, 以 MoS<sub>2</sub> 为代表的过渡金属硫化物 (transition metal dichalcogenide, TMD) 二维半导体材料在构建超薄光电集成应用中展现了巨大潜力。当 MoS<sub>2</sub> 从体材料体系变为少层甚至单层体系时, 其能带结构将从间接带隙变为直接带隙, 这为构建基于单层 MoS<sub>2</sub> 材料的发光器件和光电探测器件提供了便利, 相关工作已经有大量的报道<sup>[26-30]</sup>。然而, 单层 MoS<sub>2</sub> 材料的厚度一般只有 0.65 nm 左右, 受限于趋于物理极限的厚度特性和有限的折射率实部 ( $n$ ), 传统基于光程累积效应导致的光学相位调控能力较差, 成为制约 MoS<sub>2</sub> 二维半导体材料构建全光集成系统的主要因素<sup>[23,31]</sup>。最近, 研究人员提出一种基于损耗辅助的相位调控机制<sup>[32-33]</sup>, 利用光学相位奇点效应, 在单层 MoS<sub>2</sub> 材料体系实现了对可见光的  $\pi$  的相位调控幅度, 这为光子可集成器件的制备提供了一个崭新的

平台。

为进一步验证光学相位奇点效应的物理机理, 本文利用飞秒激光直写技术在单层和双层 MoS<sub>2</sub> 薄膜上制备了可见光区工作的菲涅尔波带片。与已报道的单原子层平面超临界透镜具有固定的环带宽度不同, 本文展示的非涅尔波带片具有从内到外显著变化的环带宽度。与理论预期一致的光学聚焦效果表明, 损耗辅助的相位调控机制只与材料体系及界面特性有关, 而与环带的宽度等器件结构参数无关。得益于 MoS<sub>2</sub> 二维半导体材料显著的损耗色散特性, 在多层 MoS<sub>2</sub> 体系中获得了对可见光的宽谱相位调控。基于双层 MoS<sub>2</sub> 体系的菲涅尔波带片, 在理论和实验中获得了从蓝光到红光宽谱区域内的近衍射受限光学聚焦焦斑。

## 2 理论设计

传统基于高折射率电介质材料的相位调控主要依赖于与材料厚度相关的传输相位和与亚波长散射单元结构参数相关的散射相位两类, 对应于可见光波段, 有效光场调控所需要的材料厚度一般都在百纳米量级, 而基于损耗辅助的相位调控机制与以上方法显著不同。本文所采用的材料结构体系如图 1(a) 所示, 为单层 MoS<sub>2</sub>/电介质缓冲层/Si 衬底的三层结构体系, 该结构体系也是利用二维 TMD 材料构建发光器件和光电探测器件的常用模型。这是一种典型的单端口耗散体系, 当激光从 MoS<sub>2</sub> 二维材料一侧垂直照明到样品上反射回来时, 其损耗主要包括与衬底结构相关的辐射损耗和与二维材料特性相关的吸收损耗两部分。当辐射损耗和吸收损耗相平衡的时候, 反射光的强度消失, 此时将伴随产生一种光学奇点现象 (phase singularity)。跨越奇点两侧将产生显著的 Heaviside 相位突变。基于耦合模理论, 通过合理设计结构参数可以得到, 当中间电介质缓冲层的折射率和厚度分别为 1.98 和 65 nm 时, 对应单层 MoS<sub>2</sub> 覆盖和没有 MoS<sub>2</sub> 覆盖两种状态, 结构共振系统将分别处于相位奇点两侧, 对应过耦合 (over-coupling) 和欠耦合 (under-coupling) 状态, 针对目标波长 535 nm, 可以产生  $\pi$  的相位跃变。这为我们制备原子层厚度的二元相位型衍射光学元件提供了便利。为验证这种相位调控能力, 图 1(b) 为利用时域有限差分方法 (Lumerical FDTD solution) 模拟的结果, 其中左半边表示 535 nm 平面波从折射率和厚度分别为 1.98 和 65 nm 的 ZnO 薄膜上反射时

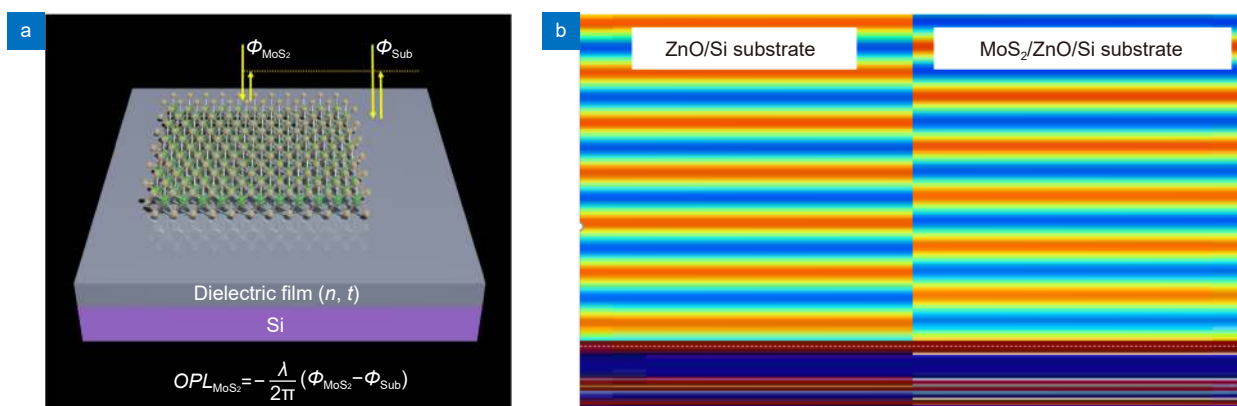


图 1 损耗辅助的相位调制机制。

(a) 样品结构示意图; (b) 利用时域有限差分方法模拟结果显示, 单层 MoS<sub>2</sub> 二维材料对 535 nm 波长可见光的 π 相位调控特性

Fig. 1 Schematic shown of the loss-assisted phase shift mechanism.

(a) The structure configuration used in our work;

(b) FDTD simulation result of the π phase shift come from the monolayer MoS<sub>2</sub> sheet

的电场强度分布, 而右侧表示同等条件下 535 nm 波长平面波从单层 MoS<sub>2</sub>/65 nm ZnO/Si 材料体系上反射光的电场强度分布。从图中可以明显看到, 在有单层 MoS<sub>2</sub> 覆盖(右半部分)和没有 MoS<sub>2</sub> 覆盖(左半部分)两种结构状态下, 反射光的相位刚好相差半个周期, 即实现了利用厚度仅为 0.65 nm 的单层 MoS<sub>2</sub> 获得了对 535 nm 波长 π 的相位调制能力。

与传统结构共振散射效应的相位调制机制不同, 基于损耗辅助的相位调控只与界面特性相关, 与二维材料的横向结构尺寸无明显关系, 这为我们构建变参数结构的光子器件提供了便利。为了验证这点, 我们基于单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜设计并制备了二元相位型菲涅尔波带片结构。该波带片的结构参数满足如下相长干涉条件公式:

$$r_m^2 = m\lambda \left( f + \frac{m\lambda}{4} \right), \quad (1)$$

其中:  $r_m$  为第  $m$  个环带的半径, 透镜焦距  $f$  设定为 43 μm, 设计波长  $\lambda$  为 535 nm。最大环的外径约为 19 μm, 有效数值孔径约为 0.4。详细结构参数如表 1 所示。

### 3 实验制备和结果分析

在如上理论的指导下, 我们实验制备了相关二元相位波带片型的平面衍射透镜。首先采用原子层沉积技术 (atomic layer deposition, Cambridge Nanotech ALD Fiji F200) 在 Si 衬底材料上生长 ZnO 薄膜, 通过调节沉积条件, 可以精确控制 ZnO 的折射率和厚度分别为我们所需要的 1.98 和 65 nm。在获得高质量的衬底体系后, 利用化学气相沉积技术 (chemical

表 1 原子层厚度菲涅尔波带片的结构参数

Table 1 Parameters of the atomic thin Fresnel zone plate

Zone Nos.	Inner radius of $r_m / \mu\text{m}$	Outer radius of $r_m / \mu\text{m}$
1	0.00	4.80
2	6.80	8.35
3	9.65	10.81
4	11.86	12.83
5	13.73	14.59
6	15.40	16.18
7	16.92	17.64
8	18.33	19.05

vapor deposition, CVD) 在 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上分别生长单层和双层的 MoS<sub>2</sub> 的薄膜, 然后利用湿法转移技术转移到 ALD 制备的 ZnO/Si 衬底上, 得到所需的初始样品。为表征所制备二维材料薄膜的相位调控能力, 利用相位干涉仪 (Veeco NT9100 phase-shifting interferometer) 对所得样品的相位调控能力进行了测试, 测试结果显示, 对应于 535 nm 波长入射光从 MoS<sub>2</sub> 层反射和从 ZnO 衬底反射的光具有大于 0.9 $\pi$  的相位差, 与理论值相符。在获得高质量的 MoS<sub>2</sub> 样品后, 利用飞秒激光直写技术把设计环带区域的 MoS<sub>2</sub> 薄膜剥离, 从而得到所设计的波带片式平面衍射透镜。图 2(a) 为所加工的平面衍射透镜的光学照片。从扫描电镜照片 (图 2(b)) 可以看出, 结构参数与设计具有较高的符合度。为了验证激光刻写和未刻写区域的材料

对比, 利用扫描 Raman 成像技术 (Renishaw RL532C50) 对所加工的透镜结构进行了成像表征, Raman 成像结果 (图 2(c)) 显示, 激光刻写区域的 MoS<sub>2</sub> 薄膜已被全部剥离, 而未刻写区域的 MoS<sub>2</sub> 则未受影响。使得在刻写和未刻写区域可以形成有效的相位对比。

为了测试所制备的单层二维材料平面衍射透镜的光场调控特性, 我们利用自制的显微成像系统对聚焦光场进行了表征测量。图 3 为相应的测量系统光路示意图。其中绿色光线表示入射光, 红色光线表示经平面透镜调制后的反射光。利用波长选择器从超连续激光器 (Fianium WL-SC-400-4-PP) 中选出 535 nm 波长的激光, 经准直后利用焦距为 100 mm 的平凸透镜 (Thorlabs) 聚焦到显微物镜 (Olympus) 的后焦面上, 再经显微物镜调制后以近平面波的波前照射到所制备

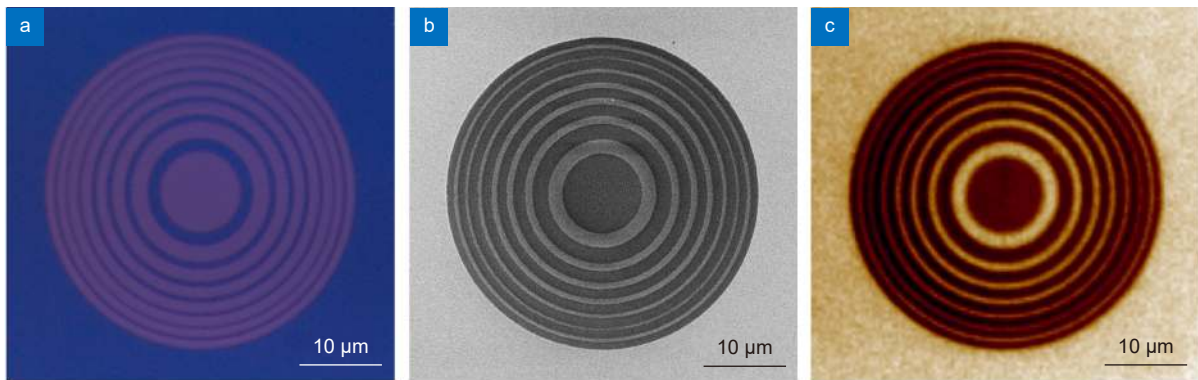


图 2 (a) 激光直写技术加工制备的原子层厚度菲涅尔波带片的光学照片; (b) 扫描电镜照片; (c) 扫描拉曼成像结果

Fig. 2 (a) The optical image; (b) SEM image; (c) Raman mapping image of the atomic thin Fresnel zone plate fabricated by laser scribing technique

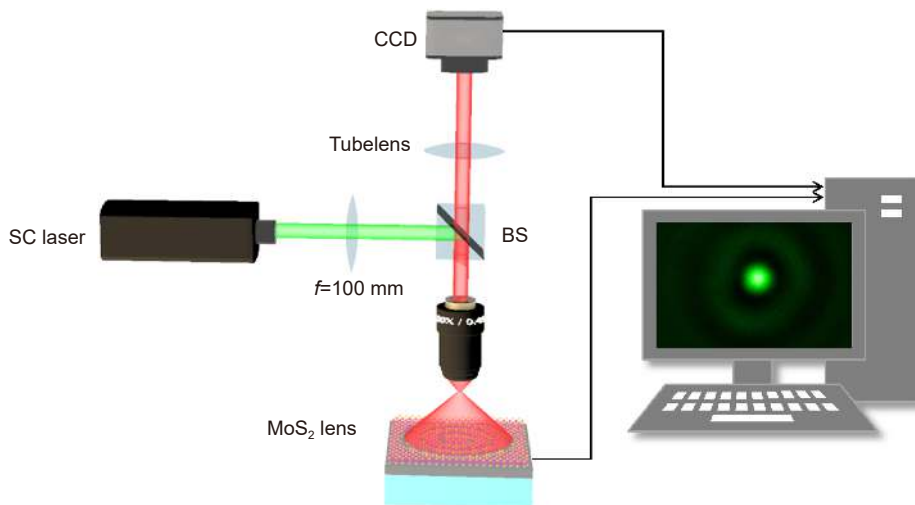


图 3 原子层厚度菲涅尔波带片光学测试系统

Fig. 3 Schematic diagram of the optical characterization system

的原子层厚度平面衍射透镜上。系统中使用的显微物镜的数值孔径为  $NA=0.45$ ，大于所设计平面衍射透镜  $0.40$  的数值孔径，以保证全部衍射空间频率都可以被有效收集。样品的对准和位置扫描由承载平面衍射透镜的三维纳米平移台 (PI, P-545.3R8S) 来完成。经平面衍射透镜调制聚焦后的反射光场可以用同一个物镜收集，成像于高性能相机 (Nikon, DS-Ri2)，从而获得对应  $XY$  平面的光场强度分布图。通过沿光轴方向以  $200\text{ nm}$  为间隔进行样品扫描获得聚焦场的三维强度分布，聚焦场  $XZ$  平面的强度分布可以从三维强度分布中提取  $XZ$  向的截面分布图得到。

图 4 为测量得到的原子层厚度菲涅尔波带片对目标波长  $535\text{ nm}$  的聚焦光场。其中图 4(a) 为焦平面  $z=43\text{ }\mu\text{m}$  处的强度分布，可以看出，在焦平面上的强度分布呈现出完美的艾里斑图样，同时具有良好的对称性，这证明了基于单层  $\text{MoS}_2$  材料的损耗辅助相位调控机制的有效性。聚焦焦斑沿  $x$  方向的强度分布如图 4(b) 所示，其中黑色点线为实验测量结果，而红色实线为高斯线型拟合结果。拟合结果显示，焦斑半径约为  $0.84\text{ }\mu\text{m}$ ，略大于衍射受限的艾里斑半径  $0.81\text{ }\mu\text{m}$  的尺寸。微小的偏差来源于飞秒激光加工过程中结构

参数的不完美。图 4(c) 为在  $XZ$  平面内沿光轴方向从  $z=30\text{ }\mu\text{m}$  到  $z=50\text{ }\mu\text{m}$  范围内实验获得的光场强度分布。由图可以看出，透镜的焦距与设计值  $z=43\text{ }\mu\text{m}$  完全一致，光场能量也主要集中在焦斑区域，没有明显的次级衍射影响，使得该原子层厚度菲涅尔波带片具有与传统平面衍射透镜同量级的能量利用效率。实验测量在  $535\text{ nm}$  波长处的聚焦效率约  $5\%$  左右，远大于已报道的单层 TMD 材料基于激子共振诱导相位所制备菲涅尔波带片  $0.08\%$  的对应值<sup>[31]</sup>。此外，从表 1 的结构参数中可以看出，该菲涅尔波带片的环带具有从内向外渐变减小的环带宽度。与理论预期一致的聚焦效果充分证明了  $\text{MoS}_2$  膜层的相位调控能力与环带宽度等结构参数无关，只与界面特性导致的损耗辅助的相位奇点效应有关。这为我们基于该体系设计复杂的光场调控器件提供了便利。

区别于传统电介质材料， $\text{MoS}_2$  二维材料的折射率和吸收损耗具有显著的色散特性。如图 5(a) 所示，在波长  $400\text{ nm}$  到  $650\text{ nm}$  的可见光频谱范围内，其折射率的虚部  $k$  值从  $5.12$  显著变化到  $1.2$  左右<sup>[34]</sup>。剧烈的折射率虚部变化为基于该材料体系的损耗辅助相位调控机制提供了额外的自由度。得益于此，原子层厚

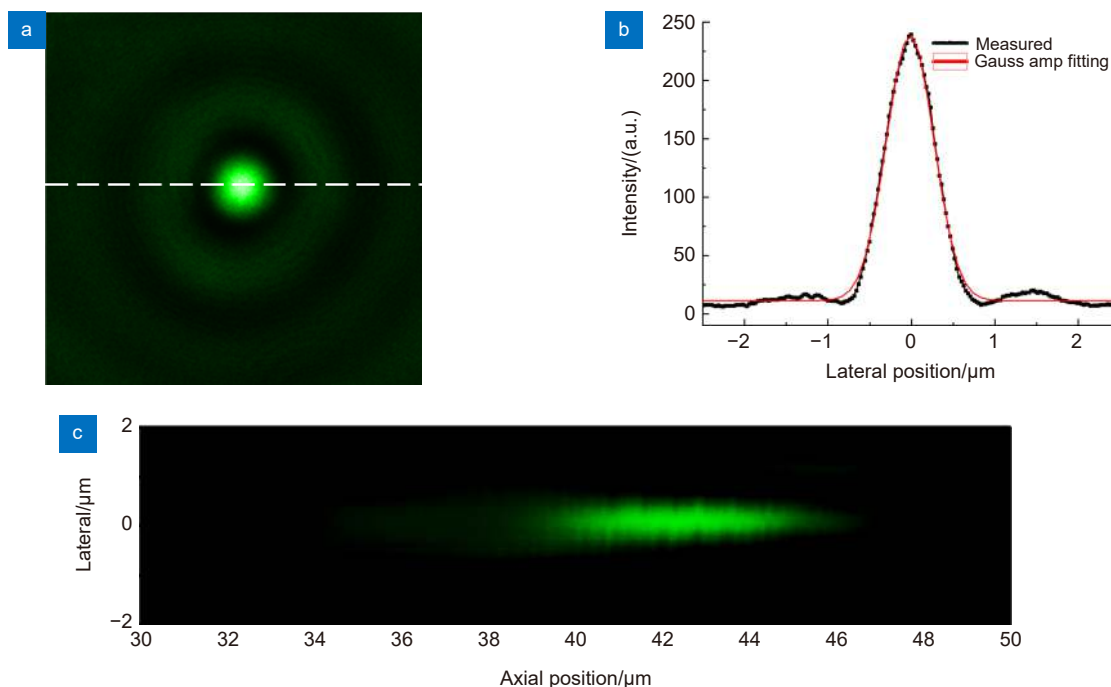


图 4 单层菲涅尔波带片在  $535\text{ nm}$  波长处的聚焦特性。

(a) 实验测量的焦平面光场分布图; (b) 焦斑强度分布曲线; (c) 沿  $XZ$  平面的光场分布图

Fig. 4 The focusing property in  $535\text{ nm}$  wavelength of the monolayer Fresnel zone plate.

(a) Experimental measured intensity distribution in the focal plane of  $z=43\text{ }\mu\text{m}$ ; (b) Intensity line profile of the focal spot; (c) The experimental measured intensity distribution along the propagation distance in the region between  $z=30\text{ }\mu\text{m}$  and  $z=50\text{ }\mu\text{m}$

度 MoS<sub>2</sub> 薄膜不仅可以在设计波长 535 nm 处产生  $\pi$  的相位跃变, 其显著的相位调控能力可以扩展到宽谱波段。图 5(b) 中的黑色曲线为单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜的宽谱相位调控曲线。更特别之处在于, 当我们把 MoS<sub>2</sub> 薄膜的厚度从单层增加到多层时, 其相位调控带宽将极大地扩展, 如图 5(b) 所示。从图中可以看出, 对于厚度仅有 1.3 nm 的双层 MoS<sub>2</sub> 体系, 在从蓝光到红光的几乎整个可见光范围都可以达到  $0.2\pi$  以上的相位调控能力, 这为我们构建宽谱响应的平面衍射透镜提供了便利。图 6 为基于瑞利索末菲衍射积分模拟的同结构参数菲涅尔波带片的宽谱聚焦结果。其中图 6(a) 为对应不同波长聚焦场沿光轴上的强度分布曲线, 当波

长从 415 nm 的蓝光增加到 635 nm 的红光时, 其焦距从 55  $\mu\text{m}$  逐渐减小到 35  $\mu\text{m}$ , 体现出与传统衍射透镜一致的负色散特性。同时, 从图 6(b) 的焦斑强度分布曲线可以看出, 在焦距随波长变化的过程中, 焦斑尺寸基本不变, 始终保持在  $800\text{ nm} \pm 20\text{ nm}$  之内。

为验证原子层厚度平面衍射透镜的宽谱聚焦特性, 我们在双层 MoS<sub>2</sub> 结构体系上, 利用飞秒激光直写技术加工了如表 1 所示同样结构参数的平面衍射透镜, 图 7 为实验测得的不同波长焦斑强度分布图, 结果显示其焦斑位置和焦斑半径与模拟值基本一致, 这为我们构建基于波长扫描的光学层析成像系统提供了可行的方案。

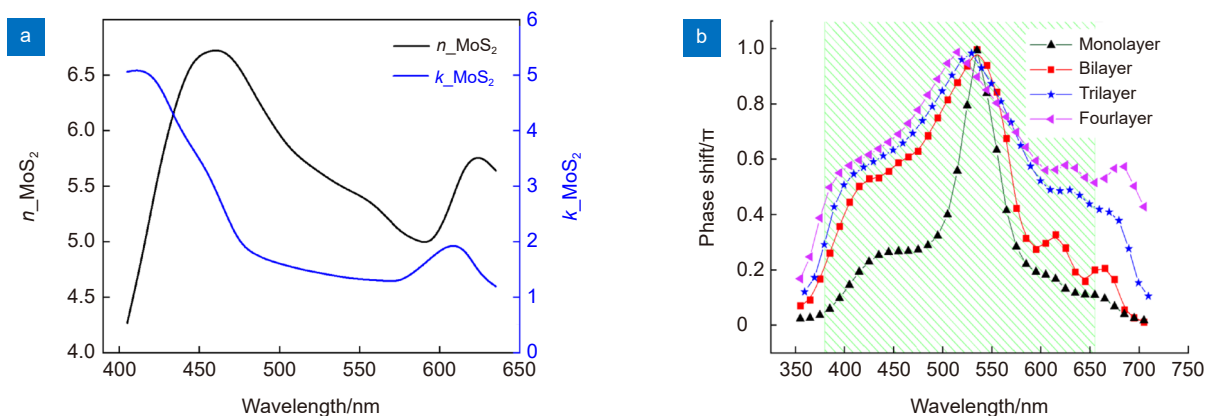


图 5 二维 MoS<sub>2</sub> 薄膜的宽带相位调控特性。

(a) 二维 MoS<sub>2</sub> 材料的折射率实部和虚部随波长的变化关系; (b) MoS<sub>2</sub> 薄膜的宽谱相位调制特性随薄膜层数的变化关系, 其中阴影区域对应双层 MoS<sub>2</sub> 薄膜相位调控大于  $0.2\pi$  的波长范围

Fig. 5 Broadband response of the phase modulation property of the 2D MoS<sub>2</sub> sheet.

(a) The real and imaginary parts of the refractive index of the MoS<sub>2</sub> sheet; (b) The dependence of phase modulation property with the thickness of MoS<sub>2</sub> sheet. The shadow region represents the phase modulation region above  $0.2\pi$

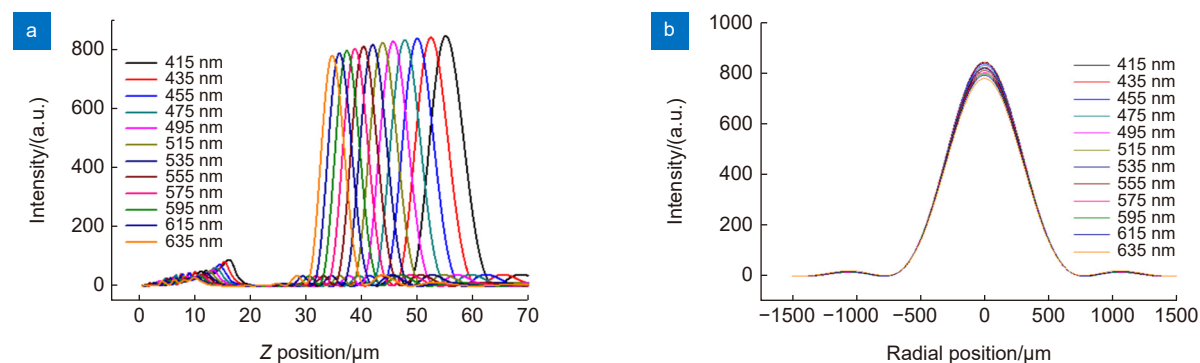


图 6 宽带聚焦特性的模拟结果。

(a) 不同波长聚焦场沿光轴上的强度分布曲线; (b) 焦斑强度分布随波长的变化关系

Fig. 6 Simulation results of the broadband focusing properties.

(a) Intensity profile along the optical axis for the wavelength region from 415 nm to 635 nm;  
(b) The dependence between the focal spot size with working wavelength

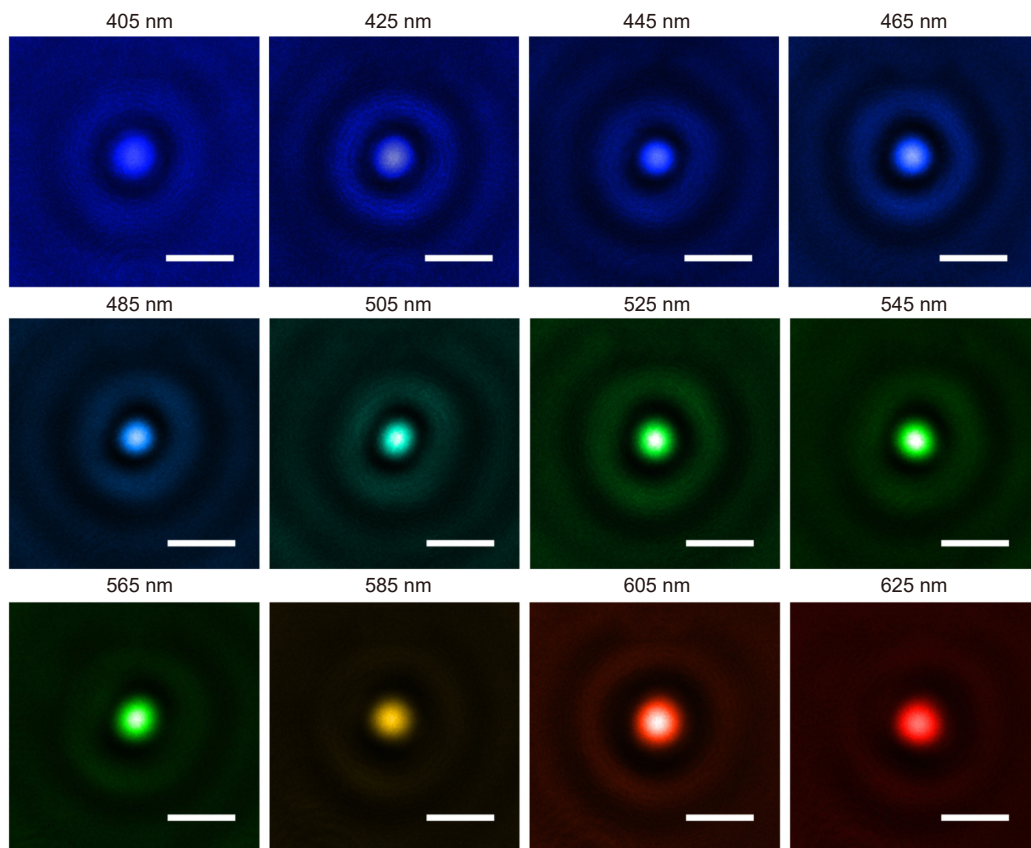


图7 实验测量的宽带聚焦特性。

标尺: 1000 nm

Fig. 7 Measured broadband focusing property of the atomic thin planar diffractive lens.

Scalebar: 1000 nm

## 4 结论

本文设计并实验验证了一种原子层厚度的菲涅尔波带片。该透镜基于  $\text{MoS}_2\text{-ZnO-Si}$  的三层结构体系, 通过调控系统的辐射损耗和吸收损耗的竞争关系, 利用单层  $\text{MoS}_2$  二维半导体材料薄膜, 在有二维材料覆盖和没有二维材料覆盖区域, 成功地实现了对可见光显著的相位调控。理论和实验结果显示, 在设计波长 535 nm 处可以实现  $\pi$  的相位突变, 相位调控能力比  $\text{MoS}_2$  的物理厚度高 350 倍。同时, 得益于原子层厚度  $\text{MoS}_2$  材料显著的损耗色散特性, 当把  $\text{MoS}_2$  薄膜从单层增加到多层时, 其相位调控能力可以显著扩展, 在从蓝光到红光的宽谱波段获得大于  $0.2\pi$  的相位调控能力。基于此, 我们设计并用飞秒激光加工技术在原子层厚度的  $\text{MoS}_2$  材料上加工制备了菲涅尔波带片结构, 在实验上获得了衍射受限的聚焦焦斑。与单层  $\text{MoS}_2$  二维半导体材料的直接带隙特性相结合, 该工作为集成光子系统的构建提供了一条可行的途径。

## 参考文献

- [1] Di Fabrizio E, Romanato F, Gentili M, et al. High-efficiency multilevel zone plates for keV X-rays[J]. *Nature*, 1999, **401**(6756): 895-898.
- [2] Liu T, Tan J B, Liu J, et al. Modulation of a super-Gaussian optical needle with high-NA Fresnel zone plate[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(15): 2742-2745.
- [3] Wang H T, Hao C L, Lin H, et al. Generation of super-resolved optical needle and multifocal array using graphene oxide metalenses[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(2): 200031.
- [4] Wang J, Qin F, Zhang D H, et al. Subwavelength superfocusing with a dipole-wave-reciprocal binary zone plate[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **102**(6): 061103.
- [5] Rogers E T F, Lindberg J, Roy T, et al. A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging[J]. *Nat Mater*, 2012, **11**(5): 432-435.
- [6] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(1): 60-65.
- [7] Qin F, Huang K, Wu J F, et al. A supercritical lens optical label - free microscopy: sub - diffraction resolution and ultra - long working distance[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(8): 1602721.
- [8] Tang D L, Wang C T, Zhao Z Y, et al. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for

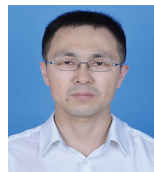
- subdiffraction light focusing[J]. *Laser Photonics Rev*, 2015, **9**(6): 713–719.
- [9] Wang C T, Tang D L, Wang Y Q, et al. Super-resolution optical telescopes with local light diffraction shrinkage[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 18485.
- [10] Huang K, Qin F, Liu H, et al. Planar diffractive lenses: fundamentals, functionalities, and applications[J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(26): 1704556.
- [11] Berry M, Zheludev N, Aharonov Y, et al. Roadmap on superoscillations[J]. *J Opt*, 2019, **21**(5): 053002.
- [12] Fang W, Lei J, Zhang P D, et al. Multilevel phase supercritical lens fabricated by synergistic optical lithography[J]. *Nanophoton*, 2020, **9**(6): 1469–1477.
- [13] Ouyang X, Xu Y, Xian M C, et al. Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nat Photonics*, 2021, **15**(12): 901–907.
- [14] Zhu L W, Cao Y Y, Chen Q Q, et al. Near-perfect fidelity polarization-encoded multilayer optical data storage based on aligned gold nanorods[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(11): 210002.
- [15] Liu T, Shen T, Yang S M, et al. Subwavelength focusing by binary multi-annular plates: design theory and experiment[J]. *J Opt*, 2015, **17**(3): 035610.
- [16] Liu T, Liu J, Zhang H, et al. Efficient optimization of super-oscillatory lens and transfer function analysis in confocal scanning microscopy[J]. *Opt Commun*, 2014, **319**: 31–35.
- [17] Zhang Z X, Li Z Y, Lei J, et al. Environmentally robust immersion supercritical lens with an invariable sub-diffraction-limited focal spot[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(10): 2296–2299.
- [18] Huang K, Liu H, Garcia-Vidal F J, et al. Ultrahigh-capacity non-periodic photon sieves operating in visible light[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 7059.
- [19] Zhao X N, Hu J P, Lin Y, et al. Ultra-broadband achromatic imaging with diffractive photon sieves[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 28319.
- [20] Gao J, Yan S K, Zhou Y, et al. Polarization-conversion microscopy for imaging the vectorial polarization distribution in focused light[J]. *Optica*, 2021, **8**(7): 984–994.
- [21] Fan Z B, Shao Z K, Xie M Y, et al. Silicon nitride metalenses for close-to-onenumericalapertureandwide-anglevisibleimaging[J]. *Phys Rev Appl*, 2018, **10**(1): 014005.
- [22] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, **358**(6367): eaam8100.
- [23] Yang J, Wang Z, Wang F, et al. Atomically thin optical lenses and gratings[J]. *Light Sci Appl*, 2016, **5**(3): e16046.
- [24] Liu C H, Zheng J J, Colburn S, et al. Ultrathin van der Waals metalenses[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(11): 6961–6966.
- [25] Wang Z Y, Yang T S, Zhang Y P, et al. Flat lenses based on 2D perovskite nanosheets[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(30): 2001388.
- [26] Li H, Zhang Q, Yap C C R, et al. From bulk to monolayer MoS<sub>2</sub>: evolution of Raman scattering[J]. *Adv Funct Mater*, 2012, **22**(7): 1385–1390.
- [27] Li Z W, Yang W, Huang M, et al. Light-triggered interfacial charge transfer and enhanced photodetection in CdSe/ZnS quantum dots/MoS<sub>2</sub> mixed-dimensional phototransistors[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(9): 210017.
- [28] Wang X D, Wang P, Wang J L, et al. Ultrasensitive and broadband MoS<sub>2</sub> photodetector driven by ferroelectrics[J]. *Adv Mater*, 2015, **27**(42): 6575–6581.
- [29] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors[J]. *Nat Nanotechnol*, 2011, **6**(3): 147–150.
- [30] Mak K F, Lee C, Hone J, et al. Atomically thin MoS<sub>2</sub>: a new direct-gap semiconductor[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **105**(13): 136805.
- [31] van de Groep J, Song J H, Celano U, et al. Exciton resonance tuning of an atomically thin lens[J]. *Nat Photonics*, 2020, **14**(7): 426–430.
- [32] Qin F, Liu B Q, Zhu L W, et al.  $\pi$ -phase modulated monolayer supercritical lens[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 32.
- [33] Wang Y W, Deng Z L, Hu D J, et al. Atomically thin noble metal dichalcogenides for phase-regulated meta-optics[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(11): 7811–7818.
- [34] Liu H L, Shen C C, Su S H, et al. Optical properties of monolayer transition metal dichalcogenides probed by spectroscopic ellipsometry[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **105**(20): 201905.

## 作者简介



吴瑾(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为平面超衍射极限透镜。

E-mail: 1400595913@qq.com



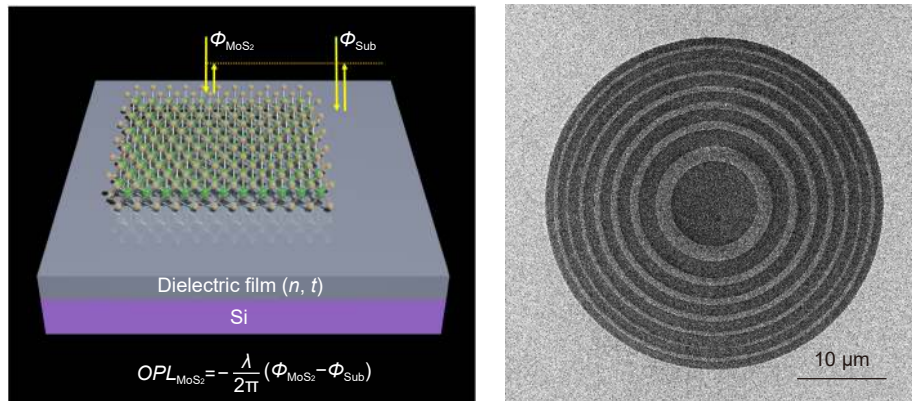
【通信作者】秦飞(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳光子学和光学超分辨成像技术研究。

E-mail: qinfei@jnu.edu.cn



# Atomically thin Fresnel zone plate with broadband focusing property

Wu Jin, Qin Fei\*, Li Xiangping



Atomically thin Fresnel zone plate with binary phase configuration

**Overview:** Although the diffractive lens with the photon-sieve and the metasurface metasurface type have been severely investigated in recently year, zone plate plate-type constructed with a series concentric phase and amplitude belts is still the most commonly used configuration, and have been frequently used in many applications including space telescope, high high-performance microscope object, projection illumination system, etc. Nevertheless, the integration possibility of such components in the opto-electronic circuits remains a challenge, due to the configuration of the incompatible materials configuration constructed with the opaque metal or dielectric materials with high refractive index. Two-dimensional transition -metal dichalcogenides (2D TMD) have attracted massive attention recently. As their typical representative, Molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ ) has been intensively investigated and shown extremely high quantum efficiency in photocurrent generation and photo-luminescence process owing to its unique photon-electronic characteristics. However, their capability for wavefront engineering has less been appreciated by far, due to the insufficient phase modulation capability when the thickness of the  $\text{MoS}_2$  sheet is decreased to atomic layers. In this work, we proposed and experimentally demonstrated an atomic thin Fresnel zone plate device. Based on the loss-assisted phase modulation mechanism, an extraordinary phase modulation of  $\pi$  phase shift for the optimized wavelength of 535 nm has been achieved by a monolayer  $\text{MoS}_2$  sheet with a thickness of 0.67 nm. Unlike the phase shift that comes from the dielectric or plasmonic resonator which highly rely relies on the spatial dimension of the resonator itself, the loss-assisted phase only determined by the basic configuration scheme has no obvious connection with the geometric size of the scribed pattern. Therefore, such an original phase shift mechanism can be applied for the creation of diffractive optical devices more conveniently. By utilizing the femtosecond laser scribing technique, a binary phase Fresnel zone plate has been fabricated on a monolayer and bilayer  $\text{MoS}_2$  sheet. The FZP is composed of 8 scribed concentric belts on the  $\text{MoS}_2$  sheet to form the alternating  $\pi$  and 0 phase zones between the scribed and un-scribed region. The radii of the zone belt are given by the standard FZP equation for satisfying the construction interference at the desired focal position. Experimentally measured results shown that a diffraction diffraction-limited focal spot with a focusing efficiency of around 5% has been obtained by the monolayer FZP device, which is notably outperforms the reported monolayer TMD lens with a focusing efficiency of 0.08%. Benefitting from the unique k dispersion property of the  $\text{MoS}_2$  sheet, such a significant phase modulation property could be extended to broadband through increasing the thickness of  $\text{MoS}_2$  from monolayer to bilayer. The simulation results shown that a  $0.2\pi$  and above phase shift could be achieved in the wavelength region from blue to red light. The broadband focusing property have has been demonstrated in simulation and experiments from the wavelength of 405 nm to 635 nm. Combining with the direct bandgap property of the monolayer  $\text{MoS}_2$  material, this phenomenon may pave the road for the integrated opto-electronic system.

Wu J, Qin F, Li X P. Atomically thin Fresnel zone plate with broadband focusing property[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(4): 220011; DOI: 10.12086/oe.2022.220011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62075085) and Guangzhou Science and Technology Program (202002030258) Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China

\* E-mail: qinfei@jnu.edu.cn