

打印方法制作菲涅耳波带片及其光学特性研究

刘芋良¹, 李思潜², 白婷钰¹, 王超仪¹, 张声怡¹, 卢恒¹, 邓姝雅¹, 喻心悦¹, 肖啸^{1*},
魏玮^{1*}, 廖宇^{1*}

¹乐山师范学院物理与光电工程学院, 四川 乐山

²乐山师范学院数学与统计学院, 四川 乐山

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月24日

摘要

菲涅耳波带片是衍射光学元件的源头, 依靠对入射波前的衍射调制实现会聚与成像, 具有平面、轻量、可宽谱工作等优势。针对传统电子束直写、光刻等工艺设备昂贵、流程复杂的问题, 本研究提出以激光菲林高精度打印制作振幅型菲涅耳波带片的低成本方法。基于半波带法与菲涅耳-基尔霍夫衍射积分, 推导了环带半径公式与沿轴光强分布, 阐明了波带片以衍射方式聚焦、具有主焦点与一系列次焦点的“一片多焦”本质。实验以氦氖激光器(632.8 nm)为光源, 经扩束、衰减后照射菲林波带片, 用CCD相机配合ImageJ采集并分析焦斑光强, 对传统圆形与正方形波带片的多种规格(焦距40~60 cm、波带数20~160)进行测量, 清晰观察到主焦点与次焦点的会聚焦斑, 验证了焦点位置与理论值的一致性, 并系统研究了波带数、焦距、几何构型对会聚能力的影响, 同时验证了其成像能力。结果表明该方法低成本、易实现, 焦距测量的相对不确定度约为1.85%, 主导误差来自焦深判断, 为低成本衍射光学元件的设计与应用提供了可行方案。

关键词

菲涅耳波带片, 衍射会聚, 振幅型, 菲林制版, 激光打印

Fabrication of Fresnel Zone Plates by a Printing Method and a Study of Their Optical Properties

Yuliang Liu¹, Siqian Li², Tingyu Bai¹, Chaoyi Wang¹, Shengyi Zhang¹, Heng Lu¹,
Shuya Deng¹, Xinyue Yu¹, Xiao Xiao^{1*}, Wei Wei^{1*}, Yu Liao^{1*}

¹College of Physics and Optoelectronic Engineering, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

²College of Mathematics and Statistics, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 刘芋良, 李思潜, 白婷钰, 王超仪, 张声怡, 卢恒, 邓姝雅, 喻心悦, 肖啸, 魏玮, 廖宇. 打印方法制作菲涅耳波带片及其光学特性研究[J]. 应用物理, 2026, 16(8): 761-774. DOI: 10.12677/app.2026.168070

Abstract

The Fresnel zone plate (FZP), as the origin of diffractive optical elements, achieves focusing and imaging by diffractive modulation of the incident wavefront, offering the advantages of being planar, lightweight and broadband. To address the expensive equipment and complex procedures of traditional electron-beam direct writing and lithography, this study proposes a low-cost method of fabricating amplitude-type FZPs by high-resolution laser film printing. Based on the half-wave-zone method and the Fresnel-Kirchhoff diffraction integral, the zone-radius formula and the on-axis intensity distribution are derived, clarifying the “one plate, multiple foci” nature of the FZP with a principal focus and a series of subsidiary foci. In the experiment, a He-Ne laser (632.8 nm) was used as the light source; after beam expansion and attenuation it illuminated the film zone plate, and a CCD camera together with ImageJ was used to acquire and analyze the focal-spot intensity. Multiple specifications of circular and square zone plates (focal length 40~60 cm, zone number 20~160) were measured, and the converging spots of the principal and subsidiary foci were clearly observed, verifying the agreement between the focal positions and theory. The effects of zone number, focal length and geometry on focusing ability were studied systematically, and the imaging ability was verified. The results show that the method is low-cost and easy to implement, with a relative uncertainty of focal-length measurement of about 1.85%, dominated by depth-of-focus judgment, providing a feasible scheme for the design and application of low-cost diffractive optical elements.

Keywords

Fresnel Zone Plate, Diffractive Focusing, Amplitude-Type, Film Plate-Making, Laser Printing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

衍射是光的波动本性最直接的表现[1]。当光波遇到与其波长相当的孔径或障碍时，会偏离几何光学所预言的直线路径，在空间中重新分布，形成明暗相间的衍射图样[2]。对衍射现象的研究孕育出一类区别于传统折射元件的器件——衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)。与依靠介质界面折射改变光线方向的传统透镜不同，衍射光学元件通过对入射波前的振幅或相位进行空间调制实现对光场的会聚、整形与成像，因而具有平面化、轻量化、色散可设计[3]、可在宽光谱乃至红外、紫外、X射线[4]等非可见波段工作等独特优势。

菲涅耳波带片(Fresnel Zone Plate, FZP)是衍射光学元件的源头，也是原理最为典型的器件[5]。它由一组透光与不透光相间的同心圆环带构成，环带半径按序数的平方根规律排布，使相邻环带边缘到轴上某点的光程差恰为半个波长，故这些环带被称为“半波带”[6]。本研究制作的是最经典的振幅型波带片：奇数(或偶数)半波带透光、相邻半波带遮光，当一束单色平行光正入射时，所有透光半波带的子波在主焦点处同相叠加而显著增强，使波带片如同凸透镜把光会聚成明亮焦斑，如图1所示。与普通透镜相比，波带片最引人注目的特征在于：除主焦点外，它还沿轴线产生一系列次焦点，相当于同时具备一块平板玻璃与多个正、负透镜的作用，这种“一片多焦”行为正是其衍射本质的直接结果[7]。

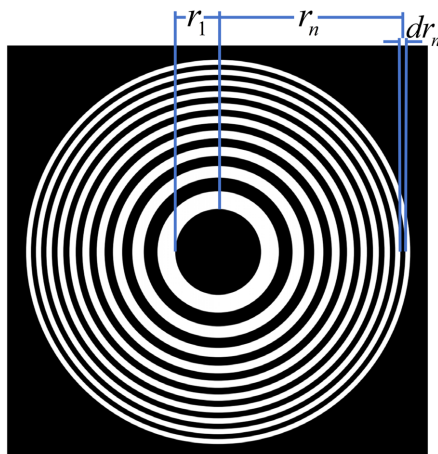


Figure 1. Schematic diagram of the structure of an amplitude Fresnel zone plate
图 1. 振幅型菲涅耳波带片结构示意图

制作一块波带片的核心,是确定一组半径为 $r_n = \sqrt{n\lambda f}$ 的同心环带并将其高精度复现到基片上。在波带片的制备方面,传统方法依赖于电子束直写或光刻工艺,设备昂贵、流程复杂,难以在教学和探索性研究中快速实现多规格对比样品的批量制作。照相缩拍法[8]、喷墨打印法[9]是两种常见的低成本替代途径,但前者受暗房工艺条件制约、重现性有限,后者则因墨点扩散效应导致边缘锐度不足。相比之下,商业激光菲林输出工艺以激光直接曝光方式将矢量图形转印至透明胶片,分辨率可达 10,000 dpi (单像素约 $2.5\ \mu\text{m}$),无墨点晕染,输出一致性好,成本极低,是在可见光波段快速制备振幅型波带片的一种可行且便捷的方案。

2. 实验原理

2.1. 半波带的几何关系与环带半径公式

设单色平行光沿轴正入射,考察轴上主焦点 P_0 ,它到波带片中心 O 的距离为主焦距 b_0 ,如图 2 所示。

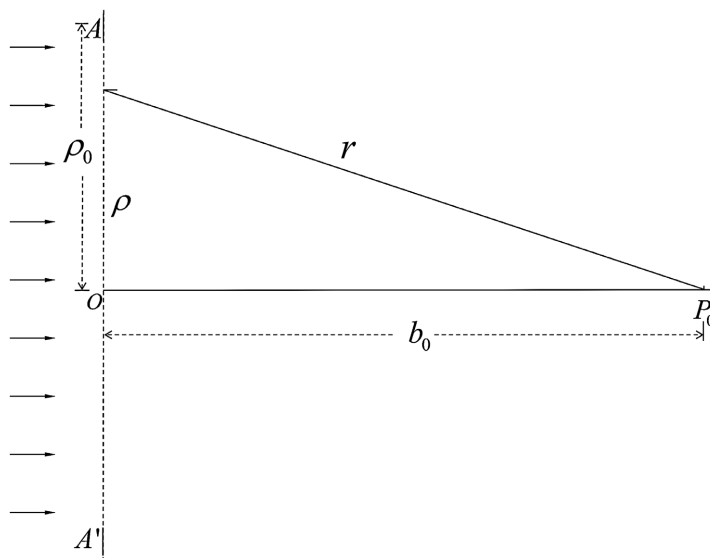


Figure 2. Schematic ray diagram of incident monochromatic light forming the principal focus
图 2. 单色光入射形成主焦点路线图

波带片平面上半径为 ρ 的环上一点到 P_0 的距离 r 满足 $r = \sqrt{b_0^2 + \rho^2}$ 。在 $b_0 \gg \rho$ 的傍轴条件下, 将根式按泰勒级数展开并略去高阶小量, 得该点子波相对中心子波的光程差 $\Delta = r - b_0 \approx \frac{\rho^2}{2b_0}$ 。规定相邻半波带边缘到 P_0 的光程差恰为半个波长, 即第 m 个环带边缘满足 $\Delta = \frac{m\lambda}{2}$, 代入即得第 m 个半波带的边缘半径:

$$\rho_m = \sqrt{mb_0\lambda}, m = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

公式(1)表明各半波带边缘半径正比于序数的平方根, 越往外环带越密。进一步可证在傍轴近似下各半波带面积近似相等且与序数无关, 这是后续讨论各带贡献近似相等的几何基础。

2.2. 半波带法与波带片的会聚机理

依据惠更斯-菲涅耳原理, 波带片上每一点都是发射子波的次波源[10]。由公式(1), 相邻两半波带边缘到 P_0 的光程差为 $\frac{\lambda}{2}$ 、相位差为 π , 因此相邻半波带在 P_0 处的合振动彼此反相、趋于抵消。若把所有偶数半波带遮挡、只保留奇数半波带(即振幅型波带片的做法), 则各透光半波带在 P_0 处的子波相位全部相同, 相干叠加后振幅显著增强, 从而形成明亮焦斑——波带片由此实现类似凸透镜的会聚。这一过程也解释了振幅型波带片衍射效率仅约 10% 的原因: 近一半入射能量被遮光带吸收。

为看清次焦点的来历, 可考察 P_0 的一个半波带在另一焦点 P_1 ($b_1 = \frac{b_0}{3}$) 处所对应的半波带数: 对 P_1 而言同一环带边缘的光程差变为 $\frac{3\lambda}{2}$, 即对 P_0 的一个半波带, 对 P_1 恰好包含三个半波带, 其中两个作用相消、仅余一个带贡献, 三带同相叠加仍产生干涉极大, 于是在 $\frac{b_0}{3}$ 处形成次焦点。对 $\frac{b_0}{5}$ 、 $\frac{b_0}{7}$ 等位置可作类似分析, 从而形成一系列次焦点。如图 3 所示。

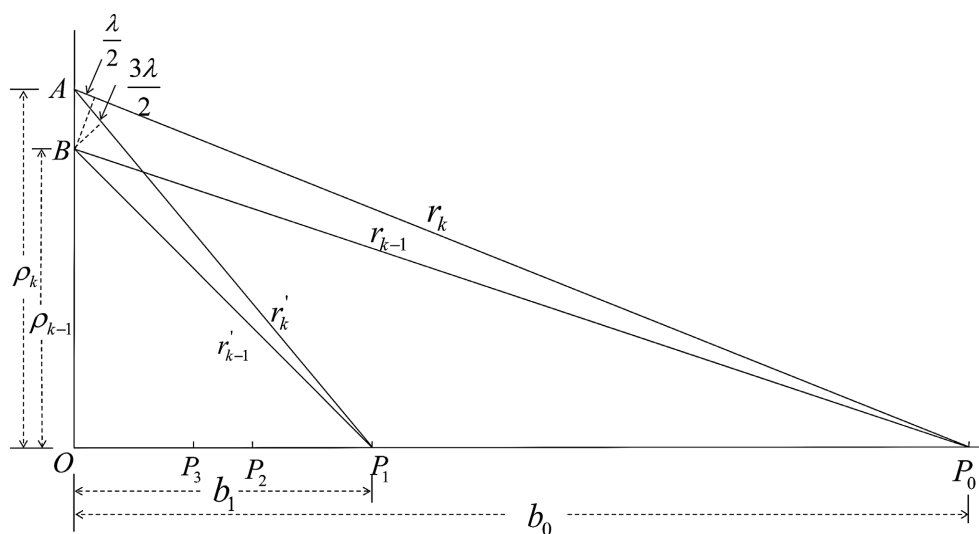


Figure 3. Geometrical illustration of multiple foci based on the half-period zone method

图 3. 半波带法解释多焦点的几何示意图

2.3. 沿轴衍射光强分布

轴上任一点 $P(OP = b)$ 的复振幅由菲涅耳-基尔霍夫衍射积分给出[11]:

$$\tilde{U}(P) = -\frac{i}{2\lambda} \iint \tilde{U}_0 t(\rho) (1 + \cos \theta) \frac{e^{ikr}}{r} dS \quad (2)$$

公式(2)中, $\tilde{U}_0$ 为入射平面波复振幅(取为复常数), $t(\rho)$ 为振幅透射率, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, r 为面元 dS 到 P 的距离, $(1 + \cos \theta)$ 为倾斜因子, $dS = 2\pi\rho d\rho$ 。如图 4 所示。

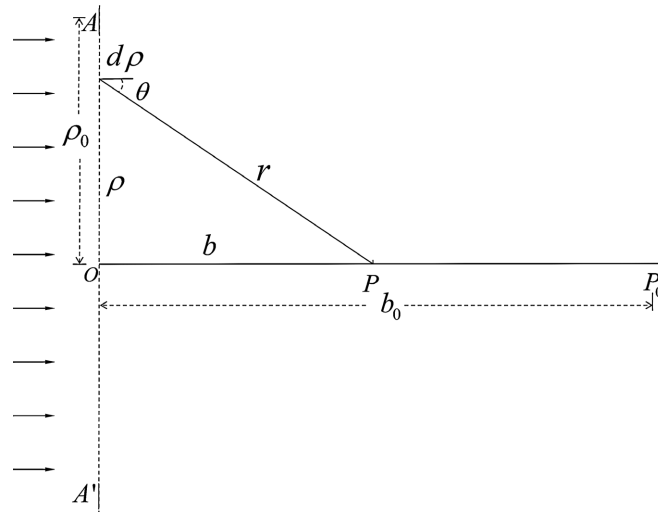


Figure 4. Schematic diagram of the on-axis diffraction intensity distribution
图 4. 沿轴衍射光强分布几何示意图

取环形面元、以平均倾斜因子 ε 代替逐点倾斜因子, 并将式(1)的关系代入指数项后对各半波带分段积分求和, 可得波带片沿轴衍射光强分布:

$$I(P) = I_0 \varepsilon^2 \sin^2 \frac{\phi}{2} \cdot \frac{\sin^2 N\phi}{\sin^2 \phi} \quad (3)$$

公式(3)中, I_0 为与入射光强有关的常量, ε 为倾斜因子, N 为透光半波带对数, $\phi = \frac{\pi b_0}{b}$ 为相邻半波带边缘到 P 的相位差。式(3)在形式上与线光栅的夫琅禾费衍射光强分布完全相似: 可视为单个半波带光阑的衍射因子与 N 缝多光束干涉因子之积。由多光束干涉因子可知, 当 $b = \frac{b_0}{2n-1}$, $n=1, 2, 3, \dots$ 时出现主极大, 即主焦点位于 $z = f$ 、次焦点依次位于 $\frac{f}{3}, \frac{f}{5}, \frac{f}{7}, \dots$, 且主极大峰值正比于 N^2 。这一结果为后续实验测量焦点位置、考察会聚能力随波带数的变化提供了理论依据。

3. 实验装置与方案设计

3.1. 波带片样品的设计与制作

在确定波长、焦距、波带数等参数后, 使用 Adobe Illustrator 2025 进行波带片图样的矢量绘制。各环带半径严格按菲涅耳公式 $r_n = \sqrt{n\lambda f}$ 设定, 以黑色为背景、透光环带留白, 确保边缘锐利、放大不失真。随后将矢量图样送激光菲林输出, 以 10,000 dpi 的高精度复制到 8 开透明菲林胶片上, 背景为纯黑不透光、环带处透明, 从而以极低成本获得边缘锐利、周期准确的振幅型波带片。如图 5 所示。

最后将整版菲林上的单个波带片剪裁为 $55 \times 55 \text{ mm}$ 的正方形, 放入 PLH-22 滤光片固定支架中夹持

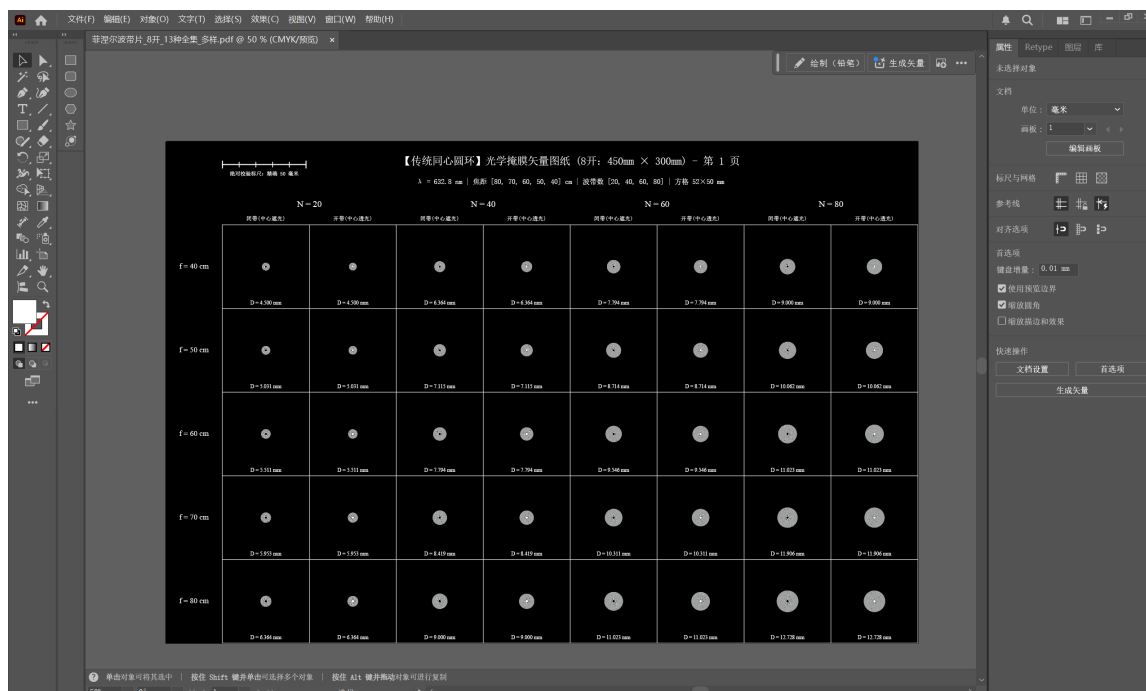


Figure 5. Finished 8K full-sheet printed Fresnel zone plate film

图 5. 8 开整版菲林波带片打印成品

固定，即制成可直接用于光路的波带片样品。除传统圆形外，本研究还按相同原理设计、制作了正方形几何构型波带片，使其顶点恰好落在菲涅耳半径上。

激光菲林输出的标称分辨率为 10,000 dpi，对应单像素尺寸约 $2.5 \mu\text{m}$ 。由菲涅耳半径公式 $r_n = \sqrt{n\lambda f}$ 可知，波带片最外侧环带宽度约为 $\Delta r_N \approx \frac{r_N}{2N}$ ；以本研究最密规格 ($N = 160$, $f = 60 \text{ cm}$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 为例， $\Delta r_{160} \approx 0.12 \text{ mm}$ ，约为单像素尺寸的 48 倍。这表明打印像素离散化对环带几何形貌的影响处于可忽略的量级，菲林输出工艺的几何保真度能够满足本研究各规格波带片的制作要求。这一判断亦与后续章节中实测焦距与理论设计值高度吻合的实验结果相互印证。

3.2. 实验装置与光路

本实验在一台 100 cm 高精度光具座上搭建，各光学器件通过滑块与金属支撑杆固定于导轨上，可沿轨道平移以精确调节间距。沿光路方向依次为：氦氖激光器(JGQ-250II, 632.8 nm)、0.3%透光率衰减片、20 倍激光扩束器、菲涅耳波带片、海康威视 CCD 相机(MV-CS060-10UC-PRO, 600 万像素)，整体布置如图 6 所示。激光器发出的细光束先经衰减片降低功率，再由扩束器扩展为均匀的大直径平行光，近似平面波垂直照射菲林波带片；波带片对入射光产生衍射会聚，相机置于其后接收并记录会聚光场，经 WTX-USB3.0 数据线传至电脑，在 MVS 软件中实时观察并拍照保存，后续由 ImageJ 读取分析。

其中，衰减片置于激光器之后，作用有二：一是保护 CCD 相机免受强激光损伤；二是避免光强超出相机量程而过曝(饱和)，从而保证测得的光强分布真实有效。20 倍激光扩束器将细光束扩展为直径更大、强度更均匀的圆形光斑，使其完整、均匀地照亮波带片孔径，是波带片正常会聚的前提。

3.3. 实验方案与观测流程

(1) 共轴调节：开启激光器，依次将衰减片、扩束器、波带片、相机装上滑块，沿光具座调整各器件

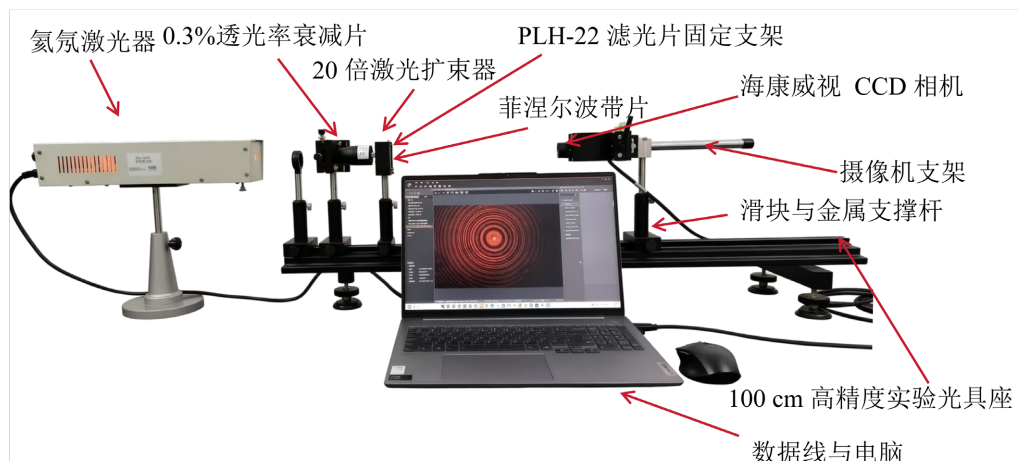


Figure 6. Photograph of the overall experimental setup
图 6. 实验装置总览照片

等高共轴，使扩束后的光斑正对波带片孔径中心。

(2) 定位焦点：保持波带片位置不动，沿光轴前后移动 CCD 相机。当相机移至主焦点 $z = f$ 处时，会聚光斑收缩至最小、最亮，此即主焦点；继续调节可在 $\frac{f}{3}$ 等处找到次焦点。

(3) 采集图像：在 MVS 软件中观察并适当调节衰减与曝光，确保焦斑不过曝(中心灰度不超过 255)，分别在 f 与 $\frac{f}{3}$ 位置拍照保存。

(4) 数据提取：将拍摄图像导入 ImageJ，沿过焦斑中心的轴线提取光强分布曲线，用于后续焦斑尺寸、相对强度等定量分析。实验对传统圆形与正方形波带片的多种规格(焦距 40~60 cm、波带数 20~160)分别进行测量。

4. 实验测量结果与分析

4.1. 焦平面焦斑的基本形貌

首先观察传统圆形波带片在主焦点处的焦平面光强分布。实验拍摄的焦斑呈现为中心一个明亮集中的亮斑、外围环绕若干逐级减弱的同心衍射环，这正是圆形孔径衍射受限聚焦的典型特征(艾里斑结构)，表明所制作的波带片确实实现了对入射光的衍射会聚，如图 7 所示。将相机移至次焦点 $f/3$ 位置，焦斑同样可见中心亮斑，但中心斑亮度明显弱于主焦点、衍射环分布也更松散，反映出次焦点会聚能量低于主焦点的事实。

为定量描述焦斑，使用 ImageJ 沿过焦斑中心的水平轴线提取光强分布曲线，如图 8 所示。曲线中央为尖锐的主峰、两侧为逐级衰减的旁瓣，与圆孔衍射的理论形态吻合，由主峰可读取焦斑半高全宽(FWHM)作为聚焦能力的核心指标。

4.2. 会聚能力的影响因素

(1) 波带数 N 的影响。固定波长与焦距，对比不同波带数(N 从 20 到 160)的圆形波带片实测焦斑。结果表明：随 N 增大，参与会聚的半波带增多，中心焦斑峰值增强、主峰更尖锐，焦斑 FWHM 减小，会聚能力增强，如图 9 所示。这与 2.3 节“主极大峰值正比于 N^2 ”的理论结论一致；同时由焦斑半值宽度 $\Delta \approx 0.61 \frac{\lambda f}{R}$ 可知，孔径 R 随 N 增大使焦斑横向尺寸减小、分辨能力提高。

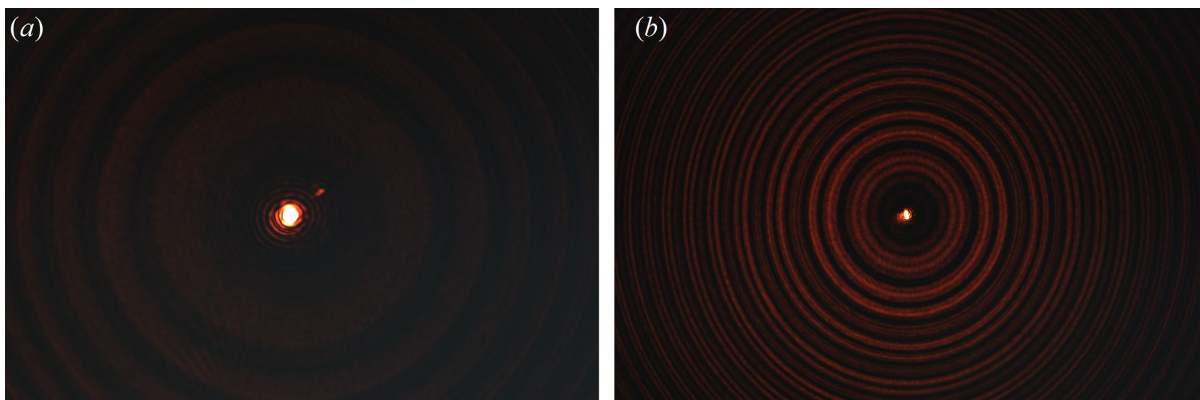


Figure 7. Measured focal-plane intensity of a circular zone plate at f and $f/3$: (a) at f ; (b) at $f/3$

图 7. 圆形波带片在 f 与 $f/3$ 处的实测焦平面光强: (a) f 处; (b) $f/3$ 处

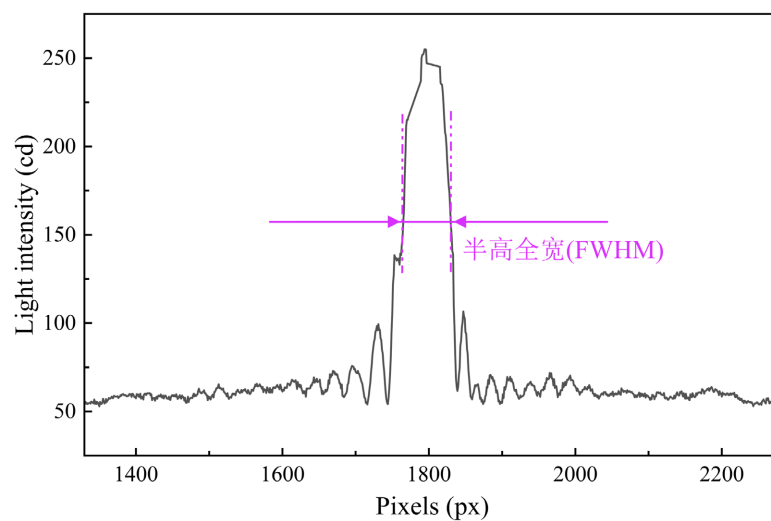


Figure 8. On-axis intensity profile extracted using ImageJ

图 8. ImageJ 提取的中心轴线光强曲线

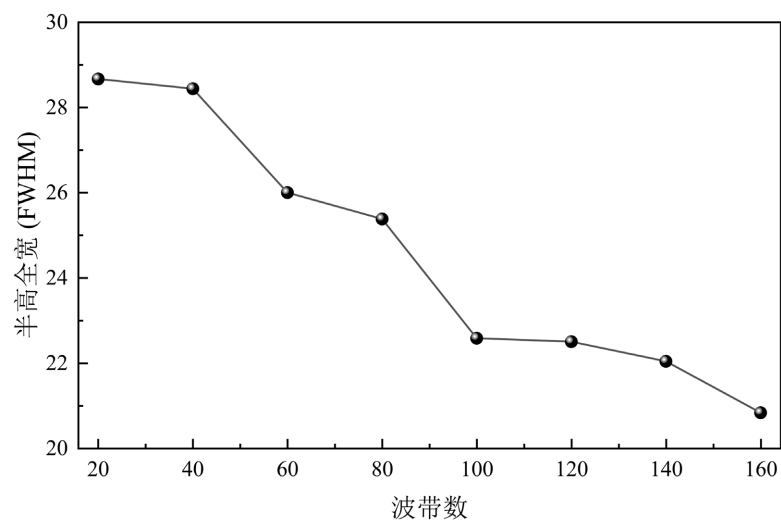


Figure 9. Variation of focal-spot FWHM with zone number N

图 9. 不同波带数 N 的焦斑 FWHM 变化曲线

(2) 焦距 f 的影响。固定波长与波带数，对比设计焦距 $f=40、50、60\text{ cm}$ 的波带片。结果显示焦距越短，会聚越强、焦斑越小，但外侧环带更密、对制版精度要求更高，说明焦距选取需在会聚强度与制版可行性之间权衡。

(3) 实测焦距与设计焦距的对比。将相机沿光轴移动找到焦斑最小最亮的位置记为实测焦距，与设计焦距比较可得相对误差，如表 1 所示。各规格波带片实测焦距与设计值接近，相对误差大多在 $\pm 3\%$ 以内，验证了“环带半径按 $r_n = \sqrt{n\lambda f}$ 设计即可精确控制焦距”这一核心原理。

Table 1. Comparison of designed and measured focal lengths and relative errors for various zone plates
表 1. 各规格波带片设计焦距与实测焦距对比及相对误差

波带片类型	波带数 N	理论设计焦距 f/cm	实验测量焦距 f/cm	相对误差
圆形波带片	20	40	40.81	1.98%
圆形波带片	80	60	59.16	-1.42%
圆形波带片	100	60	60.17	0.28%
方形波带片	20	40	40.56	1.38%
方形波带片	80	60	61.06	1.74%
方形波带片	100	60	60.74	1.22%

4.3. 开/闭带波带片与轴向衍射演化

利用已拍摄的开带/闭带波带片在主轴不同位置($f/7、f/5、f/3、30、40、50、60\text{cm}$ 等)的焦平面照片，可观察焦斑随轴向位置的演化，如图 10 所示。无论开带还是闭带，当相机从远处($f/7$)逐步移向主焦点 f 时，中心亮斑逐渐收缩、增亮，在 f 处达到最集中、最明亮， $f/3、f/5$ 等次焦点处亦能看到较弱的会聚斑，这正是波带片“一片多焦”的直接实验证据，且各焦点位置与理论值 $\frac{f}{2n-1}$ 一致。

进一步将各离散位置照片的中心峰值强度用 ImageJ 逐张读出、按 z 位置绘成散点图，得到离散的实测轴向强度分布，如图 11 所示。结果显示主焦点 f 处峰值最高， $f/3、f/5$ 等次焦点峰值依次降低，与理论“次焦点强度随级次升高而衰减”的趋势相符。对比同规格的开带与闭带波带片，二者在主焦点处均能会聚成清晰焦斑、焦斑位置一致，但因所保留的半波带恰好互补，中心强度与背景分布存在差异，验证了开带与闭带都能聚焦且互为补充的理论预期。

4.4. 不同几何构型波带片的对比

对比传统圆形与正方形波带片的实测焦斑可见：圆形波带片焦斑为规则的同心艾里环；正方形波带片中心仍能会聚成焦斑，但沿水平、竖直方向出现明显的十字旁瓣，部分能量被分散到旁瓣中，如图 12 所示。这说明波带片的会聚能力不仅取决于焦距与波带数，还与几何构型相关——偏离圆对称会把部分能量分散到旁瓣，削弱中心会聚效率。这一规律为以传统圆环作为主要研究对象提供了依据。

4.5. 波带片的聚焦与成像能力验证

前述各节已充分证明所制作波带片的聚焦能力：能将均匀入射光会聚成尖锐焦斑，实测焦距与设计值吻合，且焦斑尺寸随波带数、焦距规律变化。综合而言，圆形波带片在最优规格下焦斑 FWHM 可达约 20.83 px、峰值对比度约 4.5 倍，定量体现了良好的聚焦性能。

为验证成像能力，在焦距 15 cm 的波带片前方放置一个透光的镂空物体(矩形)，用扩束激光照明，

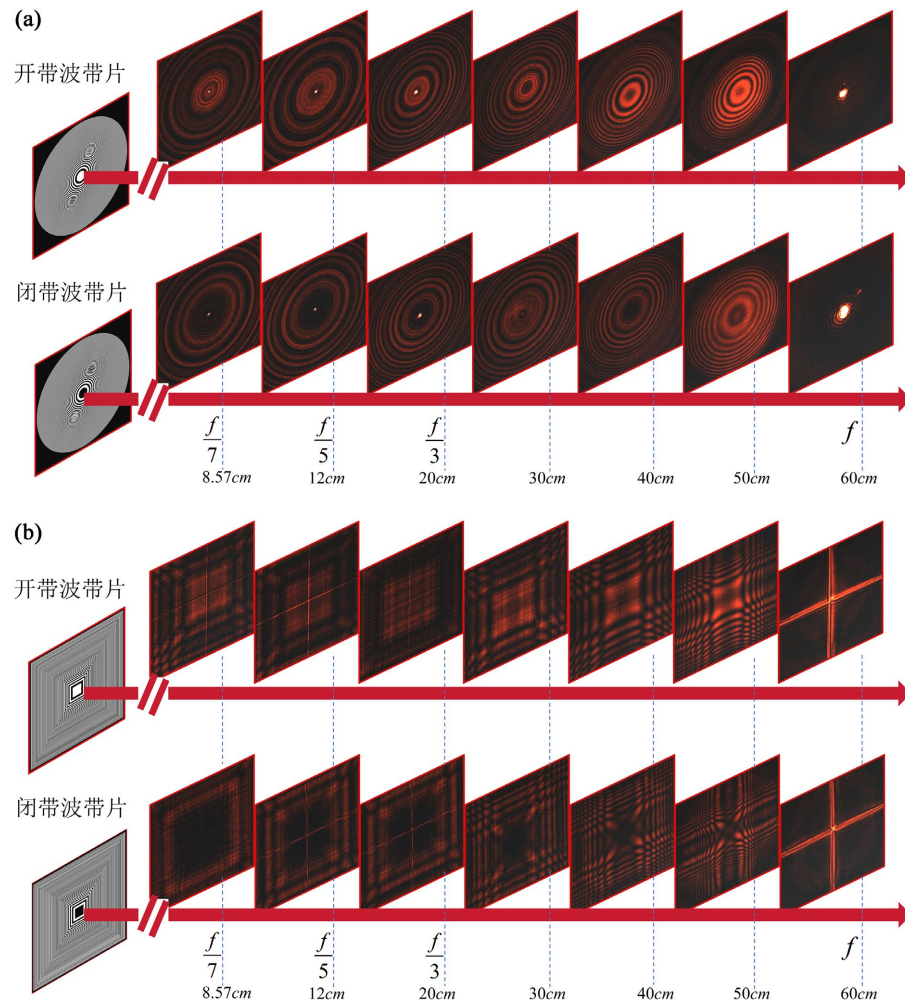


Figure 10. Focal plane image arrays at different axial positions of open and closed Fresnel zone plates: (a) circular Fresnel zone plate; (b) square Fresnel zone plate

图 10. 开带、闭带波带片在各轴向位置的焦平面照片阵列：(a) 圆形波带片；(b) 正方形波带片

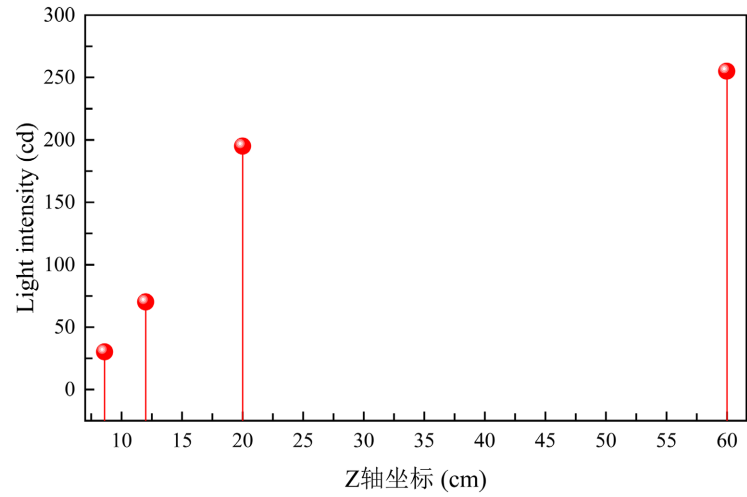


Figure 11. Measured on-axis central peak intensity

图 11. 实测轴向中心峰值强度

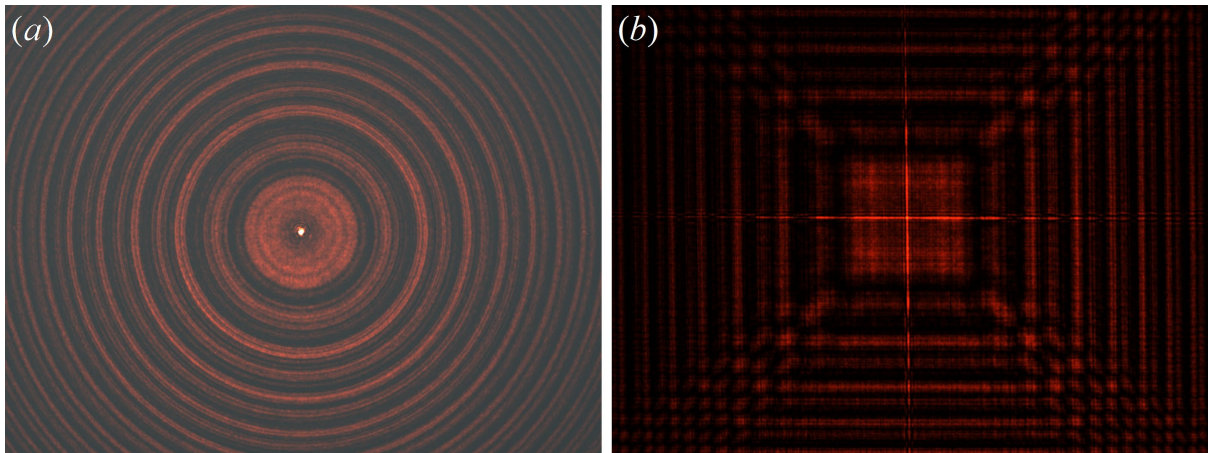


Figure 12. Comparison of $f/5$ focal spots of circular and square zone plates ($f = 60$ cm, $N = 160$): (a) circular; (b) square

图 12. 圆形与正方形 $f/5$ 焦斑对比($f = 60$ cm、 $N = 160$): (a) 圆形; (b) 正方形

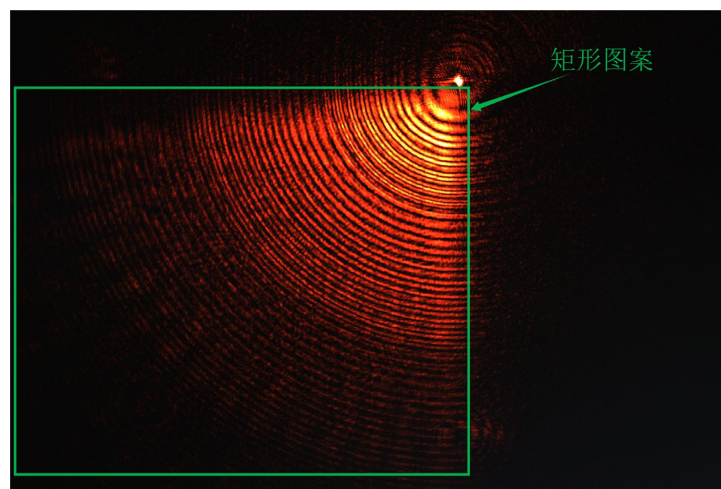


Figure 13. Imaging experiment of a rectangular object using a circular Fresnel zone plate

图 13. 成像实验——物体(矩形)与圆形波带片所成的像

按成像公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 设定物距与像距, 在像面用相机接收所成的像, 如图 13 所示。实验得到的像能够清晰还原物体的形状, 证明所制作的波带片不仅能聚焦, 还具备成像能力。

5. 误差分析

本实验的测量精度由波带片制作精度、光具座定位精度与焦点判断精度三方面共同决定, 对各误差来源的定量分析如下。

5.1. 制作端误差

激光菲林输出分辨率为 10,000 dpi, 对应单像素尺寸约 $2.5 \mu\text{m}$ 。由菲涅耳半径公式可知, 最外侧环带宽度 $\Delta r_N \approx \frac{r_N}{2N}$, 对最密规格($N = 160$, $f = 60$ cm)约为 0.12 mm, 约为单像素尺寸的 48 倍, 打印离散化对环带半径的相对误差贡献约为 $\frac{2.5 \mu\text{m}}{0.12 \text{ mm}} \approx 2\%$, 属次要量级。通过误差传递 $\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{2\Delta r_N}{r_N}$, 打印精度引入

的焦距不确定度分量为：

$$u_{B,\text{print}} \approx f \cdot \frac{2 \times 2.5 \text{ } \mu\text{m}}{r_N} \approx 0.008 \text{ cm} \quad (4)$$

5.2. 波长不确定度

氦氖激光器标称波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ，典型波长稳定性优于 $\Delta\lambda \approx 0.1 \text{ nm}$ 。由 $r_n = \sqrt{n\lambda f}$ 对焦距的传递关系 $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ ，对应焦距不确定度分量为：

$$u_{B,\lambda} = f \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 60 \times \frac{0.1}{632.8} \approx 0.009 \text{ cm} \quad (5)$$

同属次要量级。

5.3. 读数误差

光具座最小分度为 1 mm ，可估读至 0.5 mm ，按均匀分布估计：

$$u_{B,\text{read}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \approx 0.029 \text{ cm} \quad (6)$$

5.4. 焦深判断误差

由于焦斑在焦点附近存在一定轴向范围，“光斑最小最亮位置”的判断不可避免地引入主观性误差。为给出客观、可重复的焦深估计，采用基于数值孔径的瑞利焦深公式：

$$\delta z = \pm \frac{\lambda}{2\text{NA}^2} \quad (7)$$

以代表性规格 ($N = 100$, $f = 60 \text{ cm}$) 为例，最外环半径 $r_{100} = \sqrt{100 \times 632.8 \times 10^{-7} \times 60} \approx 0.616 \text{ cm}$ ，数值孔径 $\text{NA} = \frac{r_{100}}{f} \approx 0.0103$ ，理论焦深：

$$\delta z = \pm \frac{632.8 \times 10^{-7}}{2 \times 0.0103^2} \approx \pm 2.98 \text{ cm} \quad (8)$$

实验中通过沿轴向逐点采集光强分布(见图 11)，以强度下降至峰值 80%处所对应的轴向范围作为判断依据，实测可判定范围约 $\delta \approx 1.91 \text{ cm}$ ，处于瑞利焦深范围之内，与理论估计吻合良好。将焦点位置定义为轴向强度分布的峰值中心，其不确定度按均匀分布估计：

$$u_{B,\delta z} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{1.91}{\sqrt{3}} \approx 1.103 \text{ cm} \quad (9)$$

对比各 B 类分量可知， $u_{B,\delta z}$ 远大于其余三项之和，焦深判断是本实验焦距测量的主导误差来源，其余系统误差均为次要分量。

合成 B 类标准不确定度：

$$u_B = \sqrt{u_{B,\text{print}}^2 + u_{B,\lambda}^2 + u_{B,\text{read}}^2 + u_{B,\delta z}^2} \approx 1.103 \text{ cm} \quad (10)$$

5.5. A 类不确定度

取某规格圆形波带片 ($N = 100$, $f = 60 \text{ cm}$) 的 5 次独立测量，所得焦距分别为 60.12、59.51、60.35、

60.07、59.88 cm，平均值 $\bar{f} = 59.986$ cm，样本标准差 $s \approx 0.329$ cm，平均值的 A 类标准不确定度：

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.329}{\sqrt{5}} \approx 0.147 \text{ cm} \quad (11)$$

5.6. 合成标准不确定度

u_A 与 u_B 相互独立，合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.147^2 + 1.103^2} \approx 1.113 \text{ cm} \quad (12)$$

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度 $U = k \cdot u_c \approx 2.23$ cm，实测焦距最终报告为：

$$f = (59.99 \pm 2.23) \text{ cm}, \quad k = 2 \quad (13)$$

相对不确定度 $E_r = \frac{u_c}{f} \approx \frac{1.113}{59.99} \approx 1.85\%$ ，与设计值(60 cm)吻合良好。

综上焦深判断误差贡献约 $\eta = \frac{u_B}{u_c} = \frac{1.103}{1.113} \times 100\% \approx 99\%$ ，是绝对主导的误差来源。降低该误差的根本

途径在于提高数值孔径(增大孔径或缩短焦距)，使焦深在物理上更为收窄，同时辅以基于图像处理的自动峰值检测方法，以客观定位取代人眼判断，可进一步提升测量重复性。

6. 结束语

本研究围绕振幅型菲涅耳波带片，提出并实现了以高精度激光菲林打印制作波带片的低成本方案，完整完成了波带片的设计、制作与表征。在原理上，从半波带法与菲涅耳-基尔霍夫衍射积分出发，推导了环带半径公式与沿轴衍射光强分布，阐明了波带片以衍射方式会聚成像、且“一片多焦”的本质。在实验上，以氦氖激光器为光源，借助扩束、衰减与 CCD 相机搭建了完整观测光路，对传统圆形与正方形波带片的多种规格(焦距 40~60 cm、波带数 20~160)进行了测量，清晰观察到主焦点与各次焦点的会聚焦斑，验证了焦点位置与理论值 $\frac{f}{2n-1}$ 的一致性，并定量考察了波带数、焦距、几何构型对会聚能力的影响，同时验证了波带片的聚焦与成像能力。

综上，本研究验证了激光菲林高精度打印制作振幅型菲涅耳波带片这一低成本方案的可行性。所制波带片具备良好的聚焦与成像能力，制作流程简便、参数调整灵活，特别适合用于光学衍射原理的教学演示、多规格波带片的快速对比研究，以及可见光波段衍射聚焦系统的原型设计与验证。受限于振幅型结构的理论衍射效率上限(约 10.1%)及菲林打印的最小特征尺寸，本方法当前主要适用于可见光波段、环带宽度在数十微米以上的应用场景。未来可在此基础上探索相位型波带片的低成本制备途径，并结合图像处理方法对焦点位置进行客观定量判定，以进一步降低测量不确定度、提升系统性能。

基金项目

2026 年四川省大学生创新创业训练计划项目“打印方法制作菲涅耳波带片及其光学特性研究”(S202610649073)。

参考文献

- [1] 饶瑞中. 衍射衍说[J]. 科学, 2024, 76(4): 39-43+69.
- [2] 刘婷婷. 基于 Phyphox 软件的菲涅耳圆孔衍射实验的设计与实施[J]. 黑龙江科学, 2024, 15(8): 78-80+84.
- [3] 肖炎庭, 姜海明, 黄建溶, 等. 液晶菲涅耳透镜的研究进展[J]. 液晶与显示, 2025, 40(12): 1757-1781.
- [4] 陈洁, 柳龙华, 刘刚, 等. 高分辨率 X 射线显微成像及其进展[J]. 物理, 2007(8): 588-594.

-
- [5] 黄翀, 邹敏, 欧阳艳东, 等. 菲涅尔液晶透镜的制备及偏光织构研究[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2013, 28(2): 8-12+29.
- [6] 王钰涵, 唐浩原, 李金环, 等. 复合衍射光学元件的设计制作及其特性研究[J]. 物理实验, 2024, 44(10): 56-62.
- [7] 苏金炎. 菲涅尔透镜拼接失调误差分析与仿真[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2017.
- [8] Reyes-Coronado, A., Álvarez-Rodrigo, L., Martínez-Herrero, R., *et al.* (2015) Synthesis of Fresnel Zone Plates by Photographic Techniques for Use in Optics Laboratory Courses. *European Journal of Physics*, **36**, Article 055020.
- [9] Alamán, J., Alicante, R., Peña, J. and Sánchez-Somolinos, C. (2016) Inkjet Printing of Functional Materials for Optical and Photonic Applications. *Materials*, **9**, Article 910. <https://doi.org/10.3390/ma9110910>
- [10] 王辉, 梁苗, 朱梦博. 基于单纯形-最短路径射线追踪的微震震源混合定位算法[J]. 中国矿业, 2020, 29(10): 110-115+121.
- [11] 宫建平. 平行单色光狭缝衍射的区域划分[J]. 大学物理, 2011, 30(1): 31-35+41.