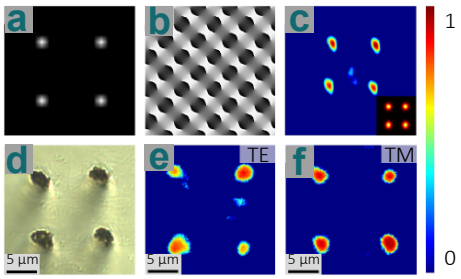
OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering 微纳光子学：结构与器件专题

Article

2026 年 7 月, 第 53 卷, 第 7 期

基于 SLM 的飞秒激光多焦点纵向直写高效制备玻璃光波导



白　雪，宋　杨，任莹莹*

山东师范大学物理与光电学院，山东省光场调控物理及应用重点实验室，山东 济南 250358

摘要：为解决传统飞秒激光横向逐线直写光波导存在的加工效率低、截面易畸变、偏振敏感性强等问题，本文提出一种基于空间光调制器 (spatial light modulator，SLM) 的纵向飞秒激光多焦点直写策略。通过 GSW 算法设计多焦点阵列全息图，将多焦点阵列轴向与样品纵向运动方向重合，实现光波导的纵向并行高效制备。在石英玻璃内成功制备出 2×2、3×3、4×4 规模的 I 型光波导阵列及轨迹数 8~16 可调的环形包层光波导。所制备波导截面呈近似圆形，4×4 的 I 型波导阵列在横电 (transverse electric, TE) 和横磁 (transverse magnetic, TM) 偏振下，单条波导损耗最低可达 0.1 dB/cm 和 0.2 dB/cm，展示了偏振无关的传输特性；包层光波导在任意偏振下均实现了良好的单模传输。基于该技术，通过 SLM 实时切换全息图，一步式完成“包层光波导输入端-I 型波导阵列输出端”级联的 1×9 分束器集成制备，器件能够实现任意偏振分光，插入损耗低、分光均匀性优良。该方法兼具纵向直写的高对称性优势与多焦点并行加工的高效性，简化了复杂光子器件的制备流程，为高性能光子集成器件的快速制备提供了新方案。

关键词：飞秒激光加工；多焦点；光波导；玻璃

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.260102 | CSTR: 32245.14.oee.2026.260102 | 中图分类号：TN249 | 文献标识码：A

白雪，宋杨，任莹莹. 基于 SLM 的飞秒激光多焦点纵向直写高效制备玻璃光波导 [J]. 光电工程，2026，**53**(7): 260102

Bai X, Song Y, Ren Y Y. Efficient fabrication of optical waveguides in glass via slm-based multi-foci femtosecond laser longitudinal writing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(7): 260102

1　引　言

近年来，光子集成电路向高密度、低损耗、三维集成方向快速发展，光波导作为核心基础器件，其性能、制备精度与效率直接决定光子器件性能与集成规模。飞秒激光直写技术利用超短脉冲在透明材料内部诱导非线性电离，通过局域折射率改变形成导光通道，具备无需掩模、热影响区小、真三维构型等优势，尤其适用于在玻璃、晶体等衬底中制备埋入式低损耗光波导[1-4]。根据激光能量密度与材料响应的不同，飞秒激光可在玻璃中诱导出 I 型正折射率改性波导、II 型应力双线波导，以及 III 型包层波导等多种结构[5-7]，为有源与无源光子器件的单片集成提供了丰富的设计自由度。

传统横向直写利用聚焦物镜将光束汇聚至样品内部，通过样品相对焦点的三维移动来实现波导加工。该模式中样品移动方向与飞秒激光传输方向垂直，易受球差和像散影响，改性截面往往呈现深度方向拉长的椭圆形畸变，导致波导导光特性出现显著偏振敏感性，甚至只能限制某一

收稿日期：2026-04-28；修回日期：2026-06-16；录用日期：2026-06-18；网络出版日期：2026-07-25

基金项目：国家重点研发计划 (2022YFA1404800)；国家自然科学基金资助项目 (12274271)；山东省自然科学基金 (ZR2021ZD02，ZR2023QE145，ZR2024MA029) 资助项目

*通信作者：任莹莹，ryywly@sdnu.edu.cn

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

特定方向的偏振传输[8-9]。此外，传统方案多采用单焦点逐点扫描，加工多通道波导阵列与复杂结构时存在周期长、通量低的问题[10-11]。针对上述问题，研究者们开展了大量的工作。例如，基于狭缝整形的方法和重叠控制多次扫描的方法已被用于调控 I 型波导的几何形貌、尺寸、模场分布及折射率分布等特性[12-13]，但加工效率仍然受到明显制约。基于空间光调制器 (spatial light modulator，SLM) 的光场调控技术已在飞秒激光加工中获得广泛应用[14-16]。通过优化焦场分布，SLM 辅助飞秒激光直写可实现并行多焦点加工，成为优化波导性能、提升加工效率的一种有效策略。基于该方法，Li 等实现了对单模 I 型波导截面圆度的灵活高效调控[17]。Sakakura 等利用 SLM 多焦点结合横向样品平移，在玻璃中实现了三维 1×4 I 型分支波导分束器的单次扫描制备[18]。Pospiech 等采用动态相位光栅，通过单次扫描直写了二维及三维 Y 分束器[19-20]。然而，这些横向写入方案中，激光传播方向与样品运动方向垂直，难以避免像差引起的波导截面椭圆畸变。在包层光波导方面，Cheng 等利用基于 SLM 的狭缝光束整形技术，将所需扫描次数减少至四次，提高了制备效率[21-22]。Zhang 等利用 SLM 产生的连续或离散环形焦斑强度分布实现了包层光波导的单次直写制备，大幅提升了加工效率[23-24]。然而，该工作中采用的横向写入方案需将焦平面相对于扫描方向倾斜，增加了光学设计的复杂度。Long 等采用纵向写入方案，利用 SLM 调制的空心光束制备包层光波导，实现了单次扫描加工并避免了像差引起的非对称性[25]，该方法采用空心贝塞尔光束，焦场分布灵活性上仍存在一定的局限性。

本工作提出一种基于 SLM 的飞秒激光多焦点纵向直写策略。利用 SLM 生成飞秒激光多焦点阵列，采用纵向直写 (激光传播方向与样品运动方向重合)，从原理上消除像差引起的截面畸变。通过调控加工参数，可控制备了 I 型波导阵列与环形包层光波导两类不同机理结构，最高实现了 4×4 I 型阵列及 16 轨迹包层波导的并行加工，在保证低损耗的前提下显著提升了规模化制备效率。此外，利用 SLM 实时切换全息图，将作为输入端的大模场包层光波导与作为输出端的 I 型波导阵列级联，一步式完成 1×9 分束器件的集成化构筑，为光子集成器件的快速制备提供了可行的技术方案。

2 实验过程

2.1 飞秒激光加工光波导

实验搭建的飞秒激光纵向多焦点并行加工系统光路如图 1 所示。光源为一台掺镱光纤飞秒激光放大器 (中心波长 1030 nm，脉宽约 300 fs，重复频率 76 kHz)。输出激光经快门后入射半波片调整偏振方向，使其与液晶指向矢方向平行，以获得最大衍射效率。接着，光束通过由透镜 L_1 和 L_2 组成的望远系统进行扩束。经反射镜 M_1 反射后，光束入射至 SLM 进行焦场整形。SLM 加载根据目标光场经由 GSW 算法生成的计算全息图，对入射波前施加预设相位延迟；经 L_3 与 L_4 组成的 4f 系统后，调制光场传递至数值孔径为 0.4 的 20 倍近红外物镜后瞳，最终在物镜焦点处形成设计的多焦点阵列。实验选用反射式纯相位液晶 SLM (PLUTO-2.1，Holoeye)，其像素尺寸为 8.0 μm，分辨率为 1920 pixel×1080 pixel。纯相位调制可在不损失入射能量的前提下实现波前整形；小像素尺寸与高分辨率有利于复杂全息图的高保真再现，且能够精确控制焦点阵列的间距。4f 系统的放大倍率根据 SLM 像素尺寸与物镜数值孔径的匹配需求计算确定，确保生成的多焦点阵列能够被物镜高效聚焦：物镜后瞳直径约为 6 mm，SLM 有效区域经扩束后需覆盖物镜后瞳，因此 4f 系统设计为 1:1 放大 (L_3、L_4 焦距均为 400 mm)，确保调制光场的高频分量能够被物镜收集，避免信息丢失。

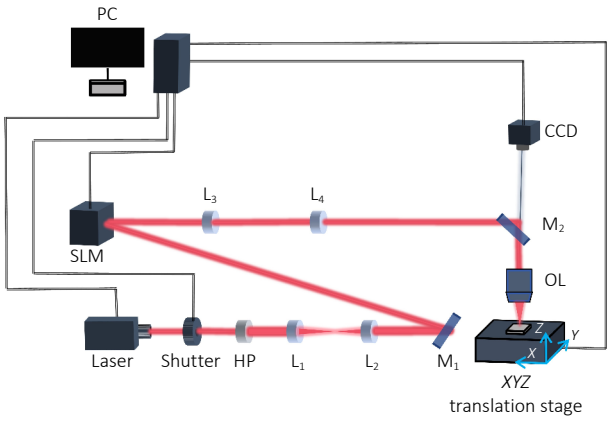


图 1 飞秒激光纵向多焦点并行加工光路示意图

Fig. 1 Schematic of optical path for femtosecond laser multi-focus longitudinal processing

待加工样品为双面光学抛光的熔融石英玻璃，尺寸 10 mm×10 mm×2 mm。样品固定于三维电动位移台上，加工过程中位移台带动样品沿激光入射方向 (z 轴) 做纵向运动，实现自下而上写入。加工过程由计算机统一控制飞秒激光脉冲能量、扫描速度、SLM 全息图切换、激

光快门开断、位移台运动及 CCD 实时成像。通过大量实验验证，获得了优化的加工参数窗口，实现了样品内部按需可控的折射率改性。

2.2 多焦点阵列的生成

多焦点阵列的目标光场分布采用权重 GS 算法 (GSW) 在 MATLAB 环境中设计。该算法通过对各目标焦点的能量引入权重因子进行迭代反馈修正，能够在有限迭代次数内实现较高的能量均匀性[26]。初始相位采用 [0, 2π] 范围内均匀随机分布的随机相位；权重更新系数设置为 $\varepsilon = 0.5$；迭代次数固定为 10 次，未额外设置收敛阈值，在计算效率与均匀性之间取得平衡。每次迭代过程中，根据傅里叶平面幅值与平均幅值之间的偏差对目标光场进行加权反馈修正，逐步提高多焦点阵列的能量均匀性。算法以理想多点光强分布为目标，通过傅里叶域迭代逼近，最终输出对应的相位全息图。以 2×2 矩形阵列为例，图 2(a) 展示了目标光场分布，给定相邻焦点间距 8 pixel 的离散光斑分布，算法生成相位全息图如图 2(b) 所示。全息图加载至 SLM 后，在透镜 L_3 后焦面由 CCD 采集到的实际光斑阵列见图 2(c)。其各焦点的归一化能量依次为 0.97、1.00、0.95、0.96 (对应焦点位置为左上，右上，左下，右下)，各焦点能量的最大相对偏差为 5%，非目标级次杂散光能量低于主瓣能量的 5%，满足并行加工对焦斑质量的要求。相邻焦点在物镜焦平面处的间距实际为 9 μm，这一数值与 SLM 中设定的 8 pixel 间隔相吻合，表明光学系统对目标光场的保真传输能力。为进一步验证全息图设计的正确性，在 GSW 算法生成相位全息图后，通过角谱法依次计算光场在 SLM、透镜 L_3、傅里叶平面、透镜 L_4 以及焦平面的传播过程，获得焦平面理论光强分布，如图 2(c) 插图所示。仿真结果表明，重构光场能够准确形成目标 2×2 阵列，与 CCD 实验测量结果具有较好的一致性，从理论上验证了全息图设计及 4f 系统光场重构的有效性。对于后续实验中涉及的不同焦点数量矩形阵列以及环形阵列，均采用相同设计流程生成对应的全息图序列。

2.3 波导性能测试表征

加工完成后，采用自由空间端面耦合系统对波导进行表征。633 nm He-Ne 激光经物镜聚焦后垂直耦合至波导输入端面，输出端由另一物镜收集并成像至 CCD 或光功率计。通过精密六维调整架优化输入/输出物镜与波导端面的相对位置，观测不同偏振态 (TE/TM) 下的近场模式分布、评估导光特性的偏振依赖性，并测定波导在 633 nm 波长下的传输损耗，波导损耗计算公式如下：

$$P_{\text{out}} = T(1-R)^2 P_{\text{in}} \mathrm{e}^{-\alpha L}, \tag{1}$$

式中：P_{in} 为波导入射端功率；P_{out} 为输出物镜后的出射

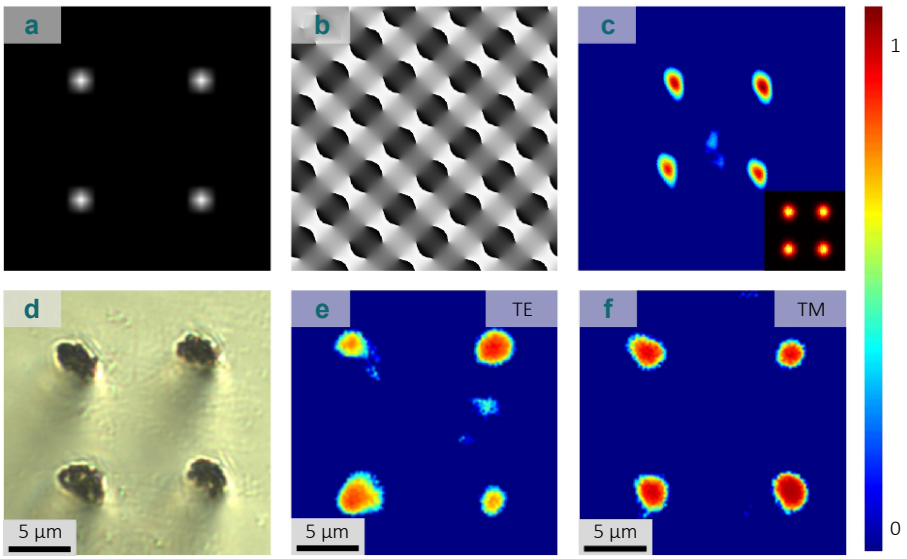


图 2 2×2 光波导阵列的制备。(a) 2×2 焦点阵列的目标光场分布图；(b) 计算全息图；(c) CCD 采集的光场实际分布图；(d) 2×2 波导阵列的端面显微镜图像；(e) TE 偏振和 (f) TM 偏振下的模式分布图

Fig. 2 Fabrication of 2×2 waveguide arrays. (a) Target light field distribution of a 2×2 focal array; (b) Computed hologram; (c) Actual light field distribution captured by CCD; (d) Cross-sectional view for 2×2 waveguide array; Mode distributions under (e) TE polarization and (f) TM polarization

功率；T 为耦合效率；R 为菲涅尔反射系数；α 为传输损耗系数；L 为波导长度。

波导的折射率变化量 Δn 极大值可以通过测量最大受光角 θ_m (即能在波导中传输的光线允许的最大入射角)来进行计算[27]，假设所研究的光波导为折射率突变型，此时有:

$$\Delta n = \frac{(\sin\theta_m)^2}{2n_s}, \tag{2}$$

式中：n_s 为衬底折射率，这种方法操作简单，适用范围较广，然而误差相对较大，约为 30% 左右，因此只能用来估测折射率变化。

3 结果与讨论

3.1 I 型光波导阵列

I 型波导依靠激光焦点处材料致密化诱导的正折射率改变导光，其加工窗口对脉冲能量极为敏感：能量过低无法形成稳定折射率差，能量过高则可能诱发微爆裂或折射率降低应力区。对于多焦点并行写入，SLM 将总入射能量均匀分配至各子焦点。本实验中，2×2 阵列对应的总能量为 8.4 μJ，平均单焦点能量约为 2.0 μJ。采用 2 mm/s 的纵向扫描速度，自样品底面起始向上写入 2 mm 长度。图 2(d-f) 展示了 2×2 I 型波导阵列的端面显微图像及不同偏振下的近场模式分布。四条波导轨迹清晰分立，未出现相邻改性区交叠现象，表明 9 μm 的焦点间距已足以避免串扰。波导平均模场直径约 5 μm，与单模光纤模场尺寸匹配良好。测得 2×2 阵列中各波导的平均传输损耗在 TE 偏振下为 1.1 dB/cm，TM 偏振下为 1.0 dB/cm，表现出优异的偏振无关导光特性，这得益于纵向写入使得改性区折射率分布在波导横截面内具备高度旋转对称性。

通过改变目标光场设计，计算生成了更大规模 I 型波导阵列的全息图。图 3(a) 和图 3(e) 分别展示了 3×3 和 4×4 矩阵多焦点阵列的目标光场分布。实际 3×3 和 4×4 焦点阵列的各焦点能量的最大相对偏差分别为 10% 和 9%。 3×3 和 4×4 阵列的加工能量分别为 17.9 μJ 和 21.7 μJ，对应的平均单焦点能量约为 1.9 μJ 和 1.3 μJ。两种阵列结构均采用 0.4 mm/s 的扫描速度。与 2×2 阵列相比，3×3 和 4×4 阵列的总写入能量相应提升且速度降低，以保证各焦点处有充足的能量沉积以建立稳定折射率变化，避免因通量不足导致改性区域不连续。

图 3(b) 和图 3(f) 分别给出了 3×3 与 4×4 I 型波导阵列的端面显微形貌。可以看出，即使在焦点密度显著提高的情况下，各波导芯层仍保持规则的矩阵排布，相邻波导界限清晰。各波导端面形貌存在轻微不均匀，主要由各焦点间的能量微小差异引起，这与 SLM 相位量化误差、算法残差等因素有关。图 3(c, d) 和图 3(g, h) 分别对应 3×3 和 4×4 阵列在 TE 与 TM 偏振下的近场模式分

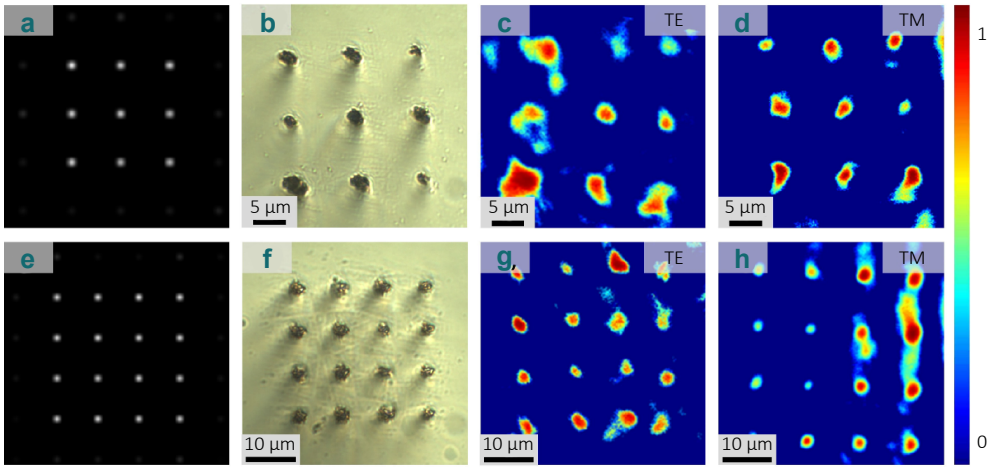


图 3 3×3 和 4×4 光波导阵列的制备。(a) 3×3 焦点阵列的目标光场分布图；(b) 3×3 波导阵列的端面显微镜图像；(c) TE 偏振和 (d) TM 偏振下的模式分布图；(e) 4×4 焦点阵列的目标光场分布图；(f) 4×4 波导阵列的端面显微镜图像；(g) TE 偏振和 (h) TM 偏振下的模式分布图

Fig. 3 Fabrication of 3×3 and 4×4 waveguide arrays. (a) Target light field distribution for 3×3 foci array; (b) Cross-sectional view, for 3×3 waveguide array; Mode distributions under (c) TE polarization and (d) TM polarization; (e) Target light field distribution for 4×4 foci array; (f) Cross-sectional viewfor 4×4 waveguide array; Mode distributions under (g) TE polarization and (h) TM polarization

布图。需要说明的是，阵列部分端口周围观测到少量杂散光，原因在于阵列焦点能量均匀性有所下降，同时阵列横向尺寸较大，边缘波导截面出现轻微畸变，导致部分光场泄漏。尽管如此，所有端口仍保持清晰可辨的单模传输。3×3 阵列 TE 与 TM 偏振下的单波导平均传输损耗分别为 0.4 dB/cm 和 0.5 dB/cm，4×4 阵列则分别为 0.1 dB/cm 和 0.2 dB/cm。损耗数值在较窄范围内波动，且未随阵列规模扩大出现系统性恶化，证实了通过同步调节总能量与扫描速度，可有效维持多焦点并行加工的一致性与稳定性。

3.2 包层光波导

包层光波导通过紧密排布的激光损伤轨迹构成低折射率包层，使光场约束在包层内未辐照的高折射率芯区传输。实验设计了轨迹数量为 8、10、12、14、16 的五种环形焦点分布。各环形阵列中相邻焦点间距保持均匀，SLM 上环形直径均为 28 pixels。包层光波导的写入总能量统一设定为 21.7 μJ，扫描速度 0.4 mm/s。因此，对于 8、10、12、14、16 焦点阵列，其相应的单焦点能量约为 2.6 μJ、2.1 μJ、1.7 μJ、1.5 μJ 和 1.3 μJ。需要说明的是，与 I 类波导阵列相比，制备包层光波导所采用的相邻焦点间距更小，加工过程中焦点之间的应力和热累积效应相互影响，使得局部区域的累积能量沉积显著增强，从而越过正折射率改性阈值，进入由微损伤和材料稀疏化主导的负折射率变化区间。

图 4(a,b) 分别展示了 8 个环形分布焦点设计及相应的计算全息图。图 4(c) 为在透镜 L_3 焦平面处使用 CCD 采集了目标光场的实际分布图，与设计的焦点分布吻合良好，其各焦点能量的最大相对偏差为 8%。图 4(d) 展示了由 8 条轨迹围成的包层光波导端面显微镜图像，可以看到经纵向扫描后样品内部刻写出 8 条独立损伤轨迹，均匀环绕中心区域，构成了清晰完整的低折射率包层边界。该包层结构直径约 32 μm，与 SLM 上 28 pixels 环形直径相吻合。图 4(e, f) 为波导传输模式，可见在 TE 与 TM 偏振模式下，波导输出端均呈现单模传输，未观察到基底漏光现象。测得 TE 偏振损耗为 4.79 dB/cm，TM 偏振损耗为 4.41 dB/cm。

为进一步考察轨迹密度对导光性能的影响，固定包层外径不变，逐步将轨迹数增加至 10、12、14、16 条，相应的设计焦点分布如图 5(a_1-a_4) 所示。实际 10、12、14 和 16 焦点阵列的各焦点能量的最大相对偏差分别为 9%、11%、12% 和 15%。包层光波导端面如图 5(b_1-b_4) 所示，不同焦点数量下均呈现清晰的改性轨迹。随着轨

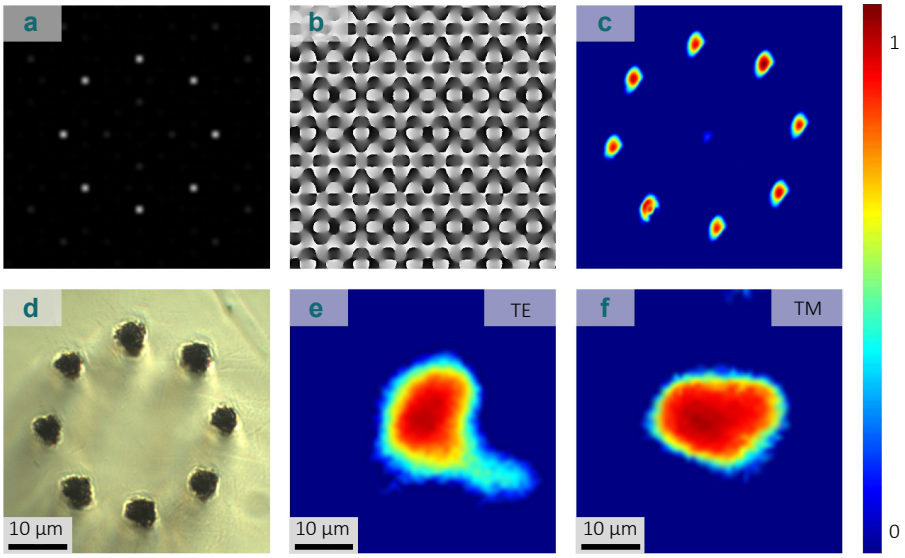


图 4 轨迹数为 8 的包层光波导的制备。(a) 环形分布的 8 焦点目标光场分布设计图；(b) 计算全息图；(c) CCD 采集的光场实际分布图；(d) 8 条轨迹构成的包层光波导的端面显微镜图像；(e) TE 偏振和 (f) TM 偏振下的模式分布图

Fig. 4 Fabrication of cladding waveguide with 8 tracks. (a) Designed target light field distribution for annularly arranged 8 foci; (b) Computed hologram; (c) Actual target light field distribution captured by CCD; (d) Cross-sectional view for cladding waveguide composed of 8 tracks; Mode distributions under (e) TE polarization and (f) TM polarization

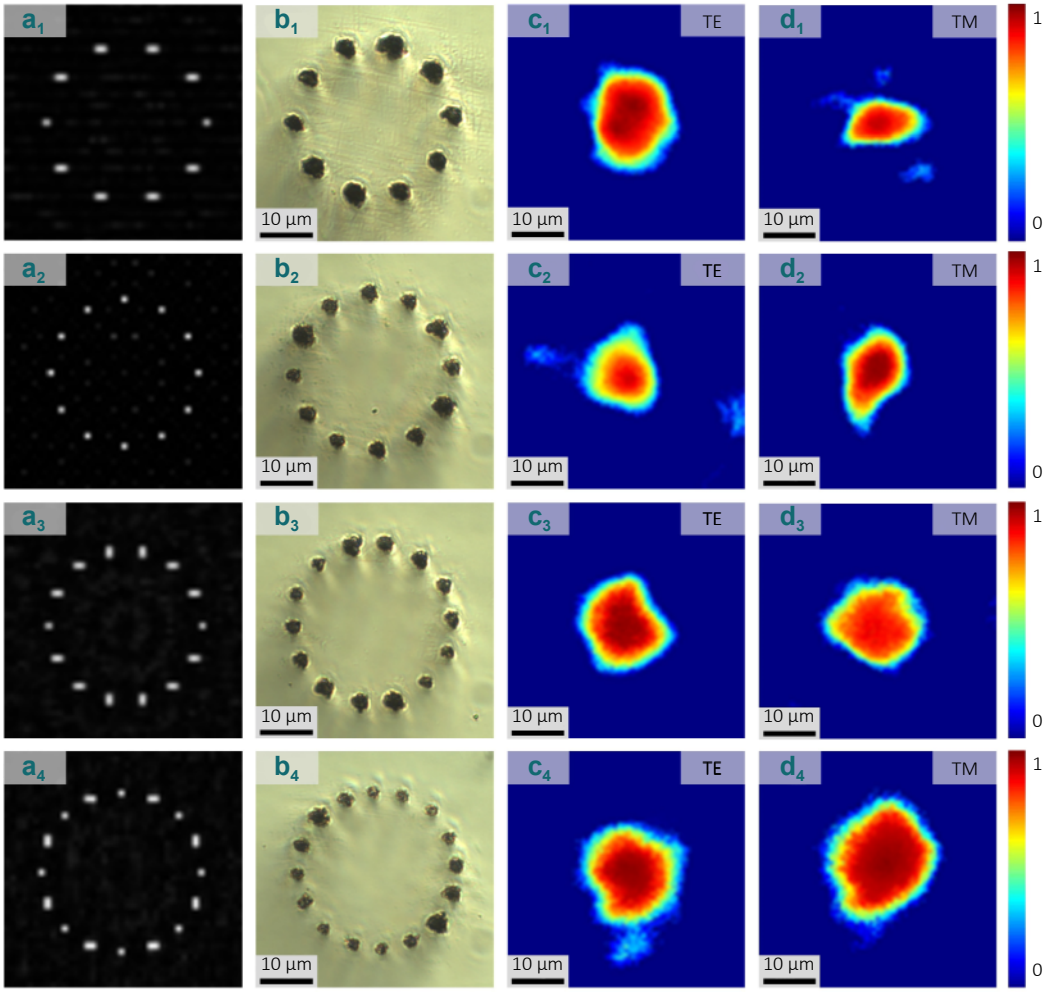


图 5 轨迹数为 10，12，14，16 的包层光波导的制备。(a_1-a_4) 数量为 10、12、14、16 的环形分布焦点分布设计图；(b_1-b_4) 轨迹数量为 10、12、14、16 的包层光波导端面显微镜图像；(c_1-c_4) TE 偏振和 (d_1-d_4) TM 偏振下的模式分布图

Fig. 5 Fabrication of cladding waveguide with 10, 12, 14 and 16 tracks. (a_1-a_4) Designed patterns of annularly distributed foci with the number of 10, 12, 14 and 16; (b_1-b_4) Cross-sectional views of cladding waveguides composed of 10, 12, 14 and 16 tracks; Mode distributions under (c_1-c_4) TE polarization and (d_1-d_4) TM polarization

迹数的增加，环向不均匀性有一定程度的提升，主要由焦斑能量均匀性下降、小间距下应力与热累积的环向分布不均共同导致。图 5(c_1-c_4) 和图 5(d_1-d_4) 为不同偏振下波导传输模式，所有包层波导均实现了任意偏振下稳定的单模传输。对不同波导在 TE 和 TM 偏振下传输损耗的测试结果表明，TE 偏振下损耗位于 3.62~4.83 dB/cm，TM 偏振下损耗则维持在 2.98~4.17 dB/cm。增加轨迹数使得包层边界更趋于连续，理论上可增强对芯层光场的横向束缚，但同时也引入了更多损伤界面带来的散射损耗，因此，随着波导包层痕迹数量的增加，波导损耗未呈现明显单调变化趋势。

3.3 1×9 分束器的集成制备与性能评估

在上述分立波导阵列制备基础上，进一步演示了分束器件的集成化快速制造。分束器设计采用“包层传输-I 型阵列分光”的两级级联架构，即使用环形分布的焦点阵列制备作为输入端的包层光波导，用于接收输入并将其扩展为大模场光斑；输出端则无缝衔接 I 型波导阵列，将入射光束分为多束输出。整个器件的制备仅需在加工程序中切换两次全息图：首先加载环形焦点全息图完成包层输入端刻写，随后立即切换为矩形焦点全息图续写 I 型波导阵列输出端，期间样品保持原位，确保两级结构的精确对准。

以 1×9 分束器为例，图 6(a) 展示了其结构示意图，为使输入端包层结构的模场更好地覆盖输出端，输入端包层结构芯径设计为 35 μm，输出端衔接 3×3 I 型波导阵列 (波导间距 9 μm)。输入端包层光波导制备对应的目标光场分布模拟图和计算全息图分别见图 6(b, c)。图 6(d) 为输入端目标光场的实际分布图。输出端波导阵列的加工与图 3 中 3×3 阵列一致。图 6(e, f) 分别展示了在 633 nm 波长下分束器输入端和输出端的显微镜图像。经测量，输入端光波导的包层区域Δn约为-10^{-3}，I 型光波导单条波导Δn约为$+10^{-3}$。图 6(g, h) 分别为分束器在 TE 和 TM 偏振下输出端的模式分布图，证实了该分束器可在任意偏正下实现有效分光。表 1 显示了 TE 和 TM 偏振下各输出端口的归一化分光比，后续可通过优化包层芯径与输出阵列的模场匹配、改进 GSW 算法以提高多焦点能量均匀性等方法进一步提升分光均匀性。端面耦合测得 TE 偏振下总插入损耗为 2.20 dB，TM 偏振下为 1.37 dB。该器件首次实现了包层与 I 型波导的级联集成，验证了该策略在复杂光子器件快速制备中的可行性与任意偏振分光的优势。

4 结 论

本文发展了一种基于空间光调制器的飞秒激光多焦点纵向直写技术，用于在玻璃内部并行、高效地制备光波导及集成器件。通过对入射激光波前进行主动相位调制，可在物镜焦点处生成可编程的多焦点阵列，从而在单次纵向扫描中同步完成多条轨迹的写入。通过系统优化焦点间距与激光通量，实现了 I 型波导阵列从 2×2 到 4×4 规模的可控制备以及轨迹数目从 8 至 16 可调的环形包层光波导加工。所制备波导截面圆度优良，支持任意偏振下的光传输，其中 I 型波导具有偏振无关特性，传输损耗与常规单焦点直写器件相当。进一步地，利用 SLM 全息图的原位动态切换，实现了包层光波导与 I 型波导阵列的级联集成，成功制备出 1×9 分束器，器件在任意偏振下均能实现分光功能，充分体现了该方法的灵活性与高效集成能力。

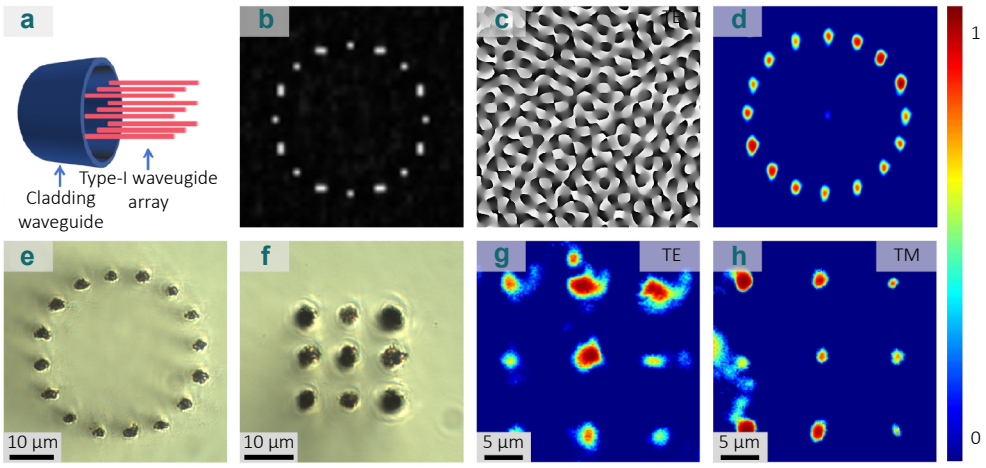


图 6 1×9 分束器的集成制备。(a) 1×9 分束器结构示意图；(b) 输入端包层光波导制备对应的目标光场分布模拟图；(c) 计算全息图；(d) 目标光场实际分布图；(e) 输入端 16 条轨迹构成的包层光波导端面图；(f) 输出端 3×3 I 型光波导阵列端面图；分束器在 (g) TE 偏振和 (h) TM 偏振下的输出模式分布图

Fig. 6 Integrated fabrication of 1×9 beam splitter. (a) Schematic of 1×9 beam splitter; (b) Simulated target light field distribution for fabricating input cladding waveguide; (c) Computed hologram; (d) Actual light field distribution; (e) Cross-sectional view of input cladding waveguide composed of 16 tracks; (f) Output 3×3 type-I waveguide array; Output mode distributions of the beam splitter under (g) TE polarization and (h) TM polarization

表 1 1×9 分束器各输出端口 TE/TM 偏振分光比 (输出端口按照从上至下、从左至右顺序编号)

Table 1 Normalized splitting ratios of each output port of the 1×9 beam splitter (output ports are numbered from top to bottom and left to right)

Port number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Splitting ratio at TE polarization	0.83	0.98	0.91	0.72	1.00	0.68	0.67	0.75	0.71
Splitting ratio at TM polarization	0.96	0.81	0.72	0.64	0.75	0.73	1.00	0.87	0.65

与传统单焦点串行直写相比，本方法将 N 条轨迹波导的加工时间理论上缩减至 $1/N$；与横向多焦点方案相比，纵向加工消除了像差引起的截面畸变，保证了横截面的高度对称性。总体而言，该方法在波导截面对称性、结构灵活性、器件集成便捷性及加工通量方面均具有显著优势。未来工作中，我们将搭建通信波段测试平台开展实验验证，并围绕全息图优化算法以进一步改善焦斑均匀性、拓展该方法至晶体等各向异性介质等方面开展研究，以推动该技术在集成量子光子学、光互连及波导激光器等领域的实用化进程。

作者贡献

白雪：文献调研，进行数据处理，论文写作与修改；宋杨：文献调研，实验设计，论文初稿写作，实验系统搭建，实验数据采集；任莹莹：指导论文选题、论文方法设计。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. Wang J Q, Song D, Qin Z P, et al. Fabrication of optics waveguide device using femtosecond lasers[J]. *Laser Technol*, 2025, **49**(4): 484−494.
2. Li J W, Cao C, Qiu Y W, et al. Optical waveguides fabricated via femtosecond direct laser writing: processes, materials, and devices[J]. *Adv Mater Technol*, 2023, **8**(18): 2300620.
3. Fan B W, Wang Y Y, Hu J C, et al. Deep-nanohole-clad waveguides with depth-to-diameter ratio up to 50 000 in single crystals via femtosecond laser writing[J]. *Light Adv Manuf*, 2026, **7**: 40.
4. Yin J B, Lin Z Y, Ji L F, et al. Femtosecond laser micro/nano-processing via multiple pulses incubation[J]. *Opto-Electron Technol*, 2025, **1**(2): 250003.
5. Li L Q, Kong W J, Chen F. Femtosecond laser-inscribed optical waveguides in dielectric crystals: a concise review and recent advances[J]. *Adv Photonics*, 2022, **4**(2): 024002.
6. Zhang Y Y, Wu J M, Wang L, et al. Femtosecond laser direct writing of Nd: YAG waveguide with Type I modification: Positive refractive index change in track[J]. *Opt Mater*, 2021, **113**: 110844.
7. Ai S W, Ouyang Z Z, Yu M H, et al. On-chip integrated passive devices fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. *Opto-Electron*, 2026: 260001.
   艾斯文, 欧阳珍珠, 于梦涵, 等. 飞秒激光直写无源光子学器件研究进展[J]. 光电, 2026: 260001.
8. Wu B, Zhang B, Liu W J, et al. Recoverable and rewritable waveguide beam splitters fabricated by tailored femtosecond laser writing of lithium tantalate crystal[J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **145**: 107500.
9. Zhang B, Xiong B C, Li Z Q, et al. Mode tailoring of laser written waveguides in $LiNbO_3$ crystals by multi-scan of femtosecond laser pulses[J]. *Opt Mater*, 2018, **86**: 571−575.
10. Jia Y C, Cheng C, Vázquez de Aldana J R, et al. Monolithic crystalline cladding microstructures for efficient light guiding and beam manipulation in passive and active regimes[J]. *Sci Rep*, 2014, **4**: 5988.
11. Zhang B, Yan W C, Chen F. Recent advances in femtosecond laser direct writing of three-dimensional periodic photonic structures in transparent materials[J]. *Adv Photonics*, 2025, **7**(3): 034002.
12. Chen D Y, Chen Z, Yang Y, et al. 3D laser writing of low-loss cross-section-variable type-I optical waveguide passive/active integrated devices in single crystals[J]. *Adv Mater*, 2024, **36**(32): 2404493.
13. Wang Y Y, Zhong L J, Lau K Y, et al. Precise mode control of laser-written waveguides for broadband, low-dispersion 3D integrated optics[J]. *Light Sci Appl*, 2024, **13**: 130.
14. Zhong L J, Wang Y Y, Han X H, et al. Laser direct lithography of large-area three-dimensional integrated photonics: technological challenges and advances[J]. *Chip*, 2025, **4**(4): 100157.
15. Zang X, Liu Z T, Xu Y S, et al. Spatial light modulation for femtosecond laser manufacturing: current developments and challenges[J]. *Sci China Technol Sci*, 2024, **67**(1): 60−72.
16. Cyril Mauclair, Bahia Najih, Vincent Comte, et al. Dynamic spatial beam shaping for ultrafast laser processing: a review[J]. *Opto-Electronic Science*, 2025, **4**(8): 250002.
17. Li Z Z, Li X Y, Yu F, et al. Circular cross section waveguides processed by multi-foci-shaped femtosecond pulses[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(3): 520−523.
18. Sakakura M, Sawano T, Shimotsuma Y, et al. Fabrication of three-dimensional 1×4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(12): 12136−12143.
19. Pospiech M, Emons M, Väckenstedt B, et al. Single-sweep laser writing of 3D-waveguide devices[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(7): 6994−7001.
20. Yin SY, Guo Q, Liu SR et al. Three-dimensional multichannel waveguide grating filters[J]. *Opto-Electron Sci*, 2024, **3**(12): 240003.
21. Liao Y, Qi J, Wang P, et al. Transverse writing of three-dimensional tubular optical waveguides in glass with a slit-shaped femtosecond laser beam[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 28790.
22. Wang P, Qi J, Liu Z M, et al. Fabrication of polarization-independent waveguides deeply buried in lithium niobate crystal using aberration-corrected femtosecond laser direct writing[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 41211.
23. Zhang Q, Yang D, Qi J, et al. Single scan femtosecond laser transverse writing of depressed cladding waveguides enabled by three-dimensional focal field engineering[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(12): 13263−13270.
24. Zhang Q, Li M, Xu J, et al. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering[J]. *Photonics Res*, 2019, **7**(5): 503−507.
25. Long X W, Bai J, Zhao W, et al. Stressed waveguides with tubular depressed-cladding inscribed in phosphate glasses by femtosecond hollow laser beams[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(15): 3138−3140.
26. Di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(4): 1913−1922.
27. Siebenmorgen J, Calmano T, Petermann K, et al. Highly efficient Yb: YAG channel waveguide laser written with a femtosecond-laser[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(15): 16035−16041.

作者简介



白雪 (2003-)，女，硕士研究生，主要从事飞秒激光微纳加工的研究。

E-mail：18856844714@163.com



【通信作者】任莹莹 (1985-)，女，教授，博士生导师，主要从事超快激光微纳加工、离子束材料改性、晶体材料光波导、波导激光等方面的研究。

E-mail：ryywly@sdnu.edu.cn



宋杨 (2001-)，男，硕士研究生，主要从事飞秒激光微纳加工的研究。

E-mail：2023025705@stu.sdnu.edu.cn

Efficient fabrication of optical waveguides in glass via slm-based multi-foci femtosecond laser longitudinal writing

Bai Xue, Song Yang, Ren Yingying*

Shandong Provincial Key Laboratory of Light Field Manipulation Physics and Application, School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250358, China

Abstract

Objective Femtosecond laser direct writing has emerged as a powerful tool for fabricating three-dimensional photonic circuits inside transparent materials. However, conventional transverse writing geometry suffers from aberration-induced cross-sectional distortion, resulting in pronounced polarization sensitivity of the inscribed waveguides. Moreover, the single-focus point-by-point scanning strategy severely limits fabrication throughput when dealing with large-scale waveguide arrays or complex integrated structures. This work aims to develop a high-efficiency, polarization-insensitive waveguide fabrication strategy that simultaneously addresses the symmetry issue of transverse writing and the throughput bottleneck of serial scanning.

Methods A longitudinal femtosecond-laser multi-focus writing (LFLMW) technique based on a reflective phase-only spatial light modulator (SLM) was proposed. The SLM was loaded with computer-generated holograms designed by the GSW algorithm to convert a single incident beam into programmable multi-focus arrays at the focal plane of the objective lens. The sample was translated parallel to the laser propagation direction, ensuring that the axial direction of the multi-focus array coincided with the sample scanning direction. An optical system incorporating a 1030 nm, 300 fs, 76 kHz femtosecond laser amplifier, a 4f imaging system, and a 20× objective (NA = 0.4) was employed. Fused silica substrates with dimensions of 10 mm × 10 mm × 2 mm were used. Through systematic optimization of pulse energy, scanning speed, and inter-focus spacing, Type I waveguide arrays with different channel counts and cladding waveguides with varied track numbers were fabricated in a single longitudinal scan. Free-space end-face coupling at 633 nm was used to characterize the insertion loss, near-field mode profiles, and polarization dependence of the fabricated waveguides. Based on this technique, a 1×9 beam splitter was fabricated by dynamically switching between a ring-shaped hologram for the input cladding waveguide and a rectangular hologram for the output Type I waveguide array.

Results and Discussions Multi-focus arrays including 2×2, 3×3, 4×4 rectangular matrices and ring-shaped patterns with 8 to 16 foci were generated with high fidelity, as verified by CCD imaging at the Fourier plane. For Type I waveguide arrays, a 2×2 array was fabricated with a total pulse energy of 8.4 μJ and a scanning speed of 2 mm/s. The inter-focus spacing of 9 μm effectively suppressed thermal cross-talk between adjacent channels. All waveguides exhibited approximately circular cross-sections with an average mode-field

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2022YFA1404800), National Natural Science Foundation of China(12274271), and Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ZD02, ZR2023QE145, ZR2024MA029)

*Correspondence: Ren Y Y, E-mail: ryywly@sdnu.edu.cn

diameter of ~5 μm. Average propagation losses of 1.1 dB/cm (TE) and 1.0 dB/cm (TM) were achieved. For 3×3 and 4×4 arrays, the total pulse energies were increased to 17.9 μJ and 21.7 μJ, respectively, with a reduced scanning speed of 0.4 mm/s to guarantee sufficient energy deposition at each focal spot. All channels maintained regular matrix arrangement without observable inter-channel distortion. Single-mode guidance was confirmed for both polarizations. The 3×3 array exhibited average losses of 0.4 dB/cm (TE) and 0.5 dB/cm (TM), while the 4×4 array achieved losses as low as 0.1 dB/cm (TE) and 0.2 dB/cm (TM).

Cladding waveguides with 8, 10, 12, 14, and 16 damage tracks were fabricated using a total pulse energy of 21.7 μJ and a scanning speed of 0.4 mm/s. The tighter focal spacing in the ring-shaped arrays induced significantly enhanced cumulative energy deposition through superimposed stress and thermal effects, pushing the local modification beyond the positive refractive index change regime into the negative change region dominated by micro-damage and material rarefaction. All cladding waveguides had a diameter of approximately 32 μm. Single-mode transmission was observed under both TE and TM polarizations for all track numbers. The measured propagation losses ranged from 3.62 to 4.83 dB/cm for TE polarization and from 2.98 to 4.17 dB/cm for TM polarization. Increasing the track number densified the cladding boundary, theoretically enhancing transverse confinement; however, it also introduced additional scattering interfaces, resulting in no monotonic trend in propagation loss as a function of track count.

A 1×9 beam splitter was demonstrated by cascading a 16-track cladding waveguide (core diameter 35 μm) as the input stage with a 3×3 Type I waveguide array as the output splitting stage. Hologram switching was executed without sample repositioning, ensuring precise alignment between the two sections. At 633 nm, total insertion losses of 2.20 dB (TE) and 1.37 dB (TM) were measured.

Conclusions A SLM-based longitudinal femtosecond-laser multi-focus writing technique was successfully developed for parallel and efficient fabrication of optical waveguides and integrated devices in glass. By active wavefront modulation, programmable multi-focus arrays were generated at the objective focal plane, enabling simultaneous inscription of multiple waveguide tracks in a single longitudinal scan. Type I waveguide arrays scaled from 2×2 to 4×4 and cladding waveguides with tunable track numbers from 8 to 16 were fabricated. Type I waveguide exhibited high cross-sectional circularity, polarization-insensitive guidance, and propagation losses comparable to those fabricated by conventional single-focus serial writing. Cladding waveguides shown a slightly larger TE/TM loss difference, while all cladding waveguides maintain stable single-mode guidance under arbitrary polarization. The cascaded integration of a cladding waveguide input and a Type I waveguide array output was achieved through dynamic hologram switching, realizing a 1×9 polarization-independent beam splitter with low insertion loss and high splitting uniformity at 633 nm. Compared with conventional serial writing, the proposed method theoretically reduces the processing time of an N-track structure to $1/N$. Compared with transverse writing approaches, the longitudinal geometry eliminates aberration-induced cross-sectional asymmetry. This technique provides a promising route toward rapid prototyping and scalable manufacturing of high-performance photonic integrated devices for applications in quantum photonics, optical interconnects, and waveguide lasers.

Keywords: femtosecond laser direct writing; multi-foci; optical waveguide; glass

Bai X, Song Y, Ren Y Y. Efficient fabrication of optical waveguides in glass via slm-based multi-foci femtosecond laser longitudinal writing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(7): 260102; DOI: 10.12086/oee.2026.260102

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org
扫描二维码，获取 PDF 全文