

引用格式: WANG Yingde, YU Yanhao, TIAN Zhennan, et al. Influence of Laser Pulse Width on the Performance of Glass Waveguide(Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650108

王映德,于颜豪,田振男,等.激光脉宽对玻璃波导性能的影响(特邀)[J].光子学报,2021,50(6):0650108

激光脉宽对玻璃波导性能的影响(特邀)

王映德,于颜豪,田振男,陈歧岱

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 长春 130012)

摘 要:改变激光脉宽,在硼铝硅酸盐玻璃内直写光波导,研究了脉冲宽度对光波导截面形貌、模场大小及定向耦合器透射比的影响。实验中,采用脉宽为 239 fs 单模/多模临界功率的激光制备光波导,其截面大小由 $5.4\ \mu\text{m}\times 4.2\ \mu\text{m}$ (239 fs) 变为 $5.1\ \mu\text{m}\times 2.4\ \mu\text{m}$ (700 fs);模场大小由 $6.2\ \mu\text{m}\times 6\ \mu\text{m}$ (239 fs) 变为 $5.8\ \mu\text{m}\times 4.8\ \mu\text{m}$ (700 fs) 且传输模式均为单模,模场形状逐渐从圆形变成椭圆形;定向耦合器的透射比在水平偏振下由 97.8% (239 fs) 变化为 70.2% (700 fs),在垂直偏振下由 99.2% (239 fs) 变化为 79.7% (700 fs)。实验发现脉宽在 600 fs 以上的激光不利于制备性能稳定的玻璃波导。

关键词:飞秒激光;脉冲宽度;能量耦合;玻璃波导;定向耦合器

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215006.0650108

Influence of Laser Pulse Width on the Performance of Glass Waveguide (Invited)

WANG Yingde, YU Yanhao, TIAN Zhennan, CHEN Qidai

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: By changing the laser pulse width, the optical waveguide is directly written in borosilicate glass, and the effects of the pulse width on the section morphology of the optical waveguide, the size of the mode field and the transmission ratio of the directional coupler are studied. In the experiment, a single mode/multi-mode critical power laser with a pulse width of 239 fs is used to fabricate the waveguide. The cross section size of the waveguide changes from $5.4\ \mu\text{m}\times 4.2\ \mu\text{m}$ (239 fs) to $5.1\ \mu\text{m}\times 2.4\ \mu\text{m}$ (700 fs). The size of the mode field changed from $6.2\ \mu\text{m}\times 6\ \mu\text{m}$ (239 fs) to $5.8\ \mu\text{m}\times 4.8\ \mu\text{m}$ (700 fs) and the transmission modes were single mode. The shape of the mode field gradually changed from round to ellipse. The transmission ratio of the directional coupler changes from 97.8% (239 fs) to 70.2% (700 fs) in the horizontal polarization and from 99.2% (239 fs) to 79.7% (700 fs) in the vertical polarization. Experiments have found that the laser with a pulse width of more than 600fs is not conducive to the preparation of waveguides with stable performance.

Key words: Femtosecond laser; Pulse width; Energy coupling; Glass waveguide; Directional coupler

OCIS Codes: 140.3295; 140.3390; 130.2755; 130.3120; 130.2755; 230.1360

0 引言

飞秒激光加工领域^[1-6]现在已经逐渐成为研究热点领域,同时采用飞秒激光加工光波导作为一个新型热门领域,正在受到广泛的关注。这是由于飞秒激光具有超高的加工精度,三维结构快速直写构型能力和圆

基金项目:国家重点研发计划(No. 2017YFB1104600)

第一作者:王映德(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为飞秒激光直写光波导器件及其性能研究。Email: yingde20@mails.jlu.edu.cn

导师(通讯作者):于颜豪(1986—),男,工程师,博士,主要研究方向为激光微纳加工方面的研究。Email: yanhao_yu@jlu.edu.cn

收稿日期:2021-04-15;录用日期:2021-05-19

<http://www.photon.ac.cn>

波导制备能力,克服了掩膜制造光波导过程中只能制备平面波导、工序繁琐,成本开销大等缺点和局限。目前利用飞秒激光制备光波导已经被广泛的应用于光子芯片^[7-10],光流调控^[11],微机械^[12],量子随机行走^[13]等诸多热门领域。基于上述事实,保证波导性能稳定也一直是飞秒激光加工光波导领域里一项富有意义的基础研究。根据波导制备的七维参量空间理论,包括激光波长、重复频率、单脉冲能量、扫描速度、聚焦点的几何形状、偏振方向和脉冲宽度,其中激光重复频率、单脉冲能量和扫描速度影响着波导形成过程中的热积累与热扩散效应^[14]。当热量积累效应超过临界阈值,热扩散效应就会被抑制,并产生低损耗波导,同时热累积效应超过热扩散效应的重频是由介质的热特性来决定的。研究表明当重频在1 MHz以上,热累积效应在玻璃上更强。不仅如此,激光波长也会影响透明材料加工波导的特性,探究激光波长与加工材料带隙特性之间的非线性相互作用也具有极高的研究价值^[15]。与此同时,也有利用改变扫描方式和光束整形技术来对波导性能进行优化的方案,比如最简单的纵向直写法^[16]和狭缝整形技术^[17]或是更复杂的柱面透镜整形技术^[18]及利用空间光调制器整形技术^[19]。上述方法均可以提供更加对称的圆形波导横截面,从而提高波导性能。随着研究的深入,科研人员渐渐发现入射激光的偏振方向会在加工过程中会产生不同的纳米条纹,2007年,KAZANSKY P G通过实验验证了激光的偏振方向和扫描方向的关联性^[20]。目前,除脉冲宽度以外的六个控制波导性能的参量均得到广泛的研究与关注,但关于脉宽对波导性能影响的研究寥寥无几,而脉宽作为激光的一项重要性能指标,它的变化是否会对玻璃波导质量造成影响有待研究。

本文在保证其他6个参量不变的条件下,改变激光脉冲宽度,探究飞秒激光不同脉冲宽度是否会影响波导性能,着重阐述了不同脉宽对波导形貌及模场的改变量大小。在此基础上,测量了不同脉宽激光制备的定向耦合器的透射曲线,最终得到性能稳定且优良的波导制备窗口,为飞秒激光制备的光波导提供了实验支撑。

1 实验设计

本实验是在硼硅酸盐玻璃样品(Eagle 2000, Corning)内部制作光波导,并使用商业集成的飞秒激光加工系统(CARBIDE, Light conversion Ltd.),在中心波长1 030 nm处,激光器以1 MHz重复频率发出单脉冲能量高达240 nJ的高斯激光束,激光偏振方向垂直于直写运动方向。通过改变压缩光栅的距离,在不改变任何其他激光参数的情况下使脉冲宽度从239 fs~10 ps可调。实验中,采用德国APE公司生产的自相关仪(PulseCheck)对脉宽进行精确测量。最终不同脉宽的激光光束经过奥林巴斯物镜(40×, NA=0.75, $F=0.51$ mm; UPlanFLN)聚焦于玻璃表面以下170 μm 深度处,并以40 mm/s的速度在高精度的空气轴承X-Y-Z台(Aerotech Inc., USA)上直写移动。

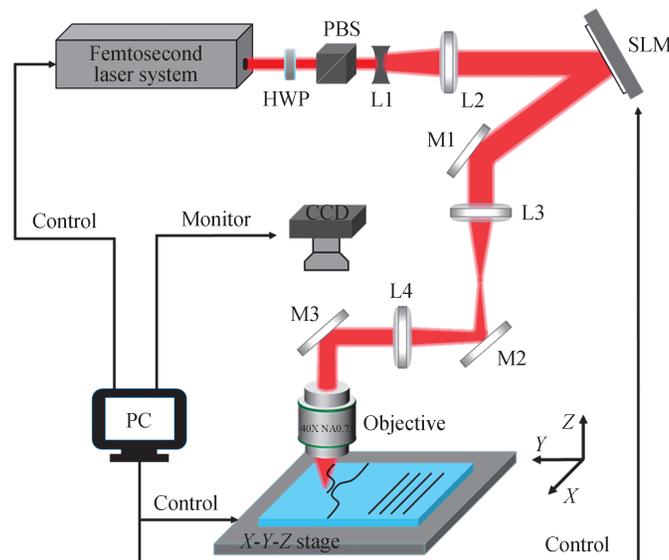


图1 加工光路示意图

Fig.1 Diagram of machining path

整体光路如图1所示,飞秒激光经过半波片(Half Wave Plate, HWP)结合偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)调控功率,由凹透镜(L1)和凸透镜(L2)组成光束放大系统扩束,然后再经过空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)进行调制,并选出1级衍射光,入射到两个凸透镜(L3)和(L4)组成的4F系统内,最后由物镜将光束收集汇聚到样品内部。

实验中,使用的测试激光均为808 nm的连续激光,波导模场直径为 $6.2\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ (239 fs)。制备的DC弯曲半径为40 mm,波导的弯曲损耗基本可以忽略不计。

2 实验结果与分析

2.1 玻璃波导显微镜及模场表征

基于前期实验和工作的基础^[21],发现当激光波长为1 030 nm,重频为1 MHz,单脉冲能量为240 nJ,扫描速度为40 mm/s,激光偏振方向垂直于扫描方向的时候,制备在玻璃170 μm 深处的波导性能优异,不管是双折射还是传输损耗均十分理想。于是本文在上述参数不变的情况下,只改变激光脉冲的宽度,制备了不同脉宽的玻璃波导,如图2(a)所示,当脉冲宽度较短时,可以看到波导的端面形貌为近水滴状,整个波导尺寸为 $5.4\ \mu\text{m} \times 4.2\ \mu\text{m}$,并且在波导芯层形成了一个规则的折射率改变区域,结合模场分析仪可以看到,波导的传播模式为单模,因为波导的模场直径与单模波导的模场直径相近,与光纤端面耦合效率很高,方便后续我们集成器件等工作。从图2(a)~(h)可以观察到,随着激光脉宽的不断增大,波导的形貌发生变化,竖直和水平方向尺寸不断收缩,波导芯层的折射率改变量也逐渐变小,最终700 fs脉宽加工的波导尺寸会缩小到 $5.1\ \mu\text{m} \times 2.4\ \mu\text{m}$ 。使用239 fs~700 fs脉宽加工后的波导均满足单模传输条件,且模场尺寸从 $6.2\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ (239 fs)变为 $5.8\ \mu\text{m} \times 4.8\ \mu\text{m}$ (700 fs)。随着脉宽的增加,模场在水平和竖直方向发生收缩,模场形状也从近圆形变为椭圆形。

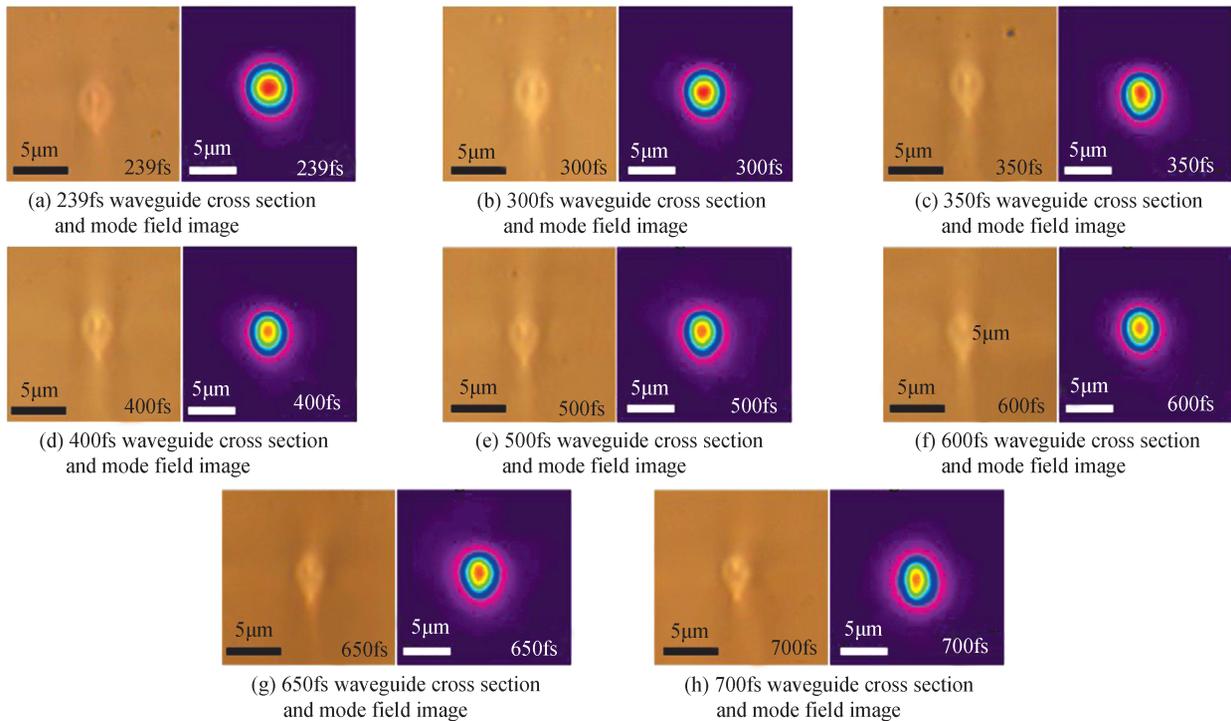


图2 不同脉宽激光制备的直波导断面图及模场图

Fig.2 Cross section images and mode field images of waveguides by lasers with different pulse widths

实验中,还发现随着脉宽的增加,损耗也会逐渐上升,这是因为单脉冲能量的峰值功率会随着脉宽的变化而改变,同时热积累效应也发生了相应变化,从而影响波导的折射率分布。

2.2 波导间耦合特性表征

在保证模场直径和单模条件的同时,波导性能的优越性还取决于波导间的耦合特性。当两根波导间能

量不能完全耦合交换的时候,利用波导制备的分束器件就不能将光完全耦合到其他相邻波导内,这样势必会引起不必要的损耗或者信息丢失。通过制备定向耦合器来表征波导间的耦合特性。当激光从一端输入,经过定向耦合器的耦合区后耦合到另一根波导中,完成分束功能。在定向耦合器输出两端各放置一个功率监测器,最终绘制出输出端光能量随耦合长度变化的曲线(透射比遵循 \sin^2 曲线、反射比遵循 \cos^2 曲线)。如图 3(a)所示,239 fs 直写的定向耦合器的水平偏振光(H)的透射率最高达 99% 以上,且垂直偏振光(V)的透射率也达到了 97.6%,这表明光能量可以在波导间完全耦合交换。同样的,观察图 3(b)可以看出 400 fs 脉宽的激光直写的定向耦合器,针对不同偏振状态的光,也具有和图 3(a)几乎相同的曲线,也表明波导间能量实现了完全的耦合交换。不同的现象出现在 650 fs 加工的波导,发现 650 fs 直写制备的定向耦合器的水平偏振光的透射率最多达到 92%,竖直偏振光的透射率也只有 90%。于是持续加大脉冲宽度,并采用 700 fs 的激光制备的定向耦合器,其透射率只有 79.7%(V)和 70.2%(H)。为了方便观察,绘制了图 3(e)和(f),可以推断透射比下降的拐点发生在 600 fs 和 650 fs 之间。可以预见,随着脉冲宽度的逐渐增加,透射率将越来越低,这意味着波导间的能量不能完全耦合交换,这对于分束器件的影响是巨大的。

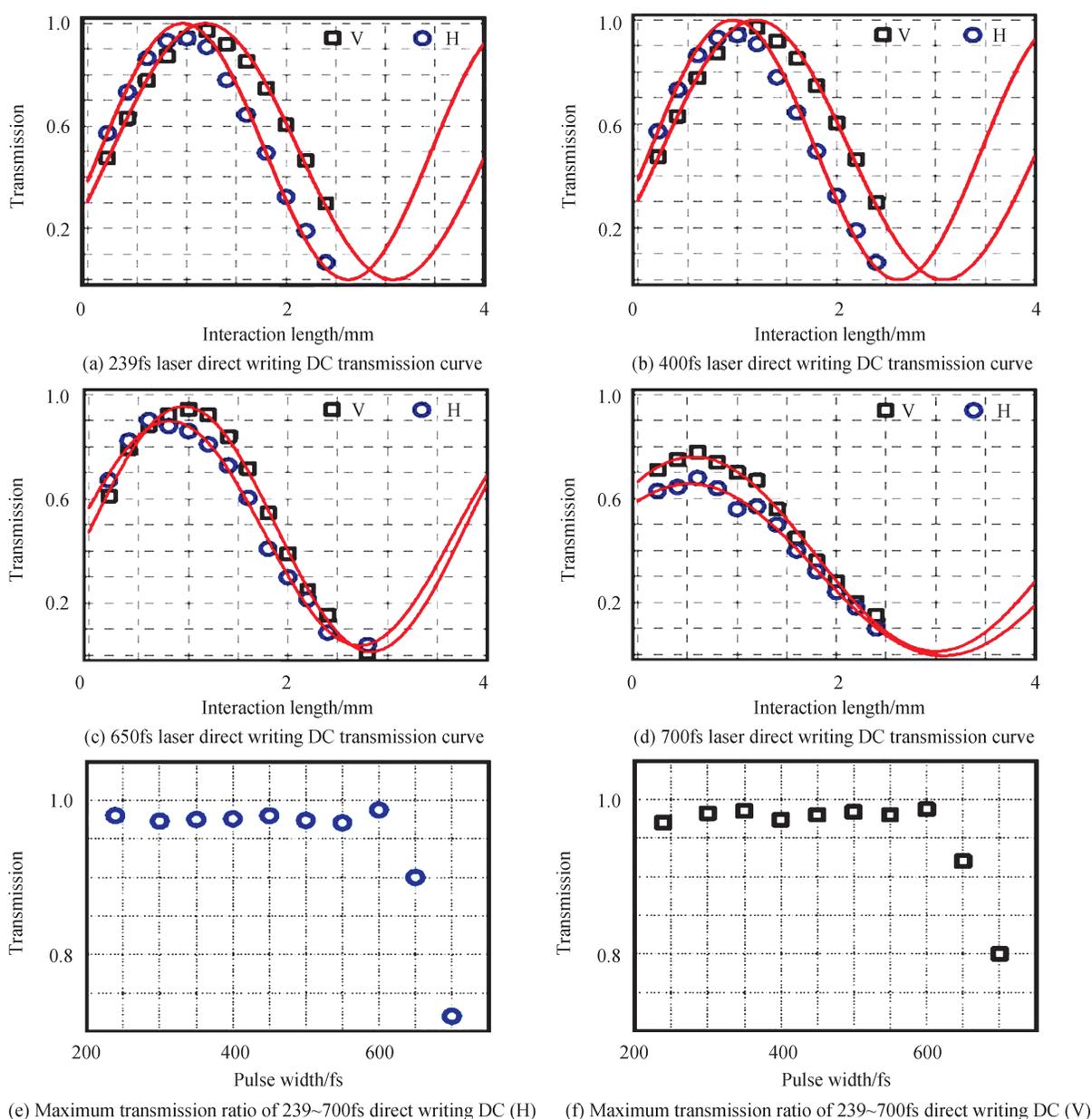


图3 不同脉宽激光制备的DC透射比曲线
Fig.3 Transmission curve of DC prepared by laser with different pulse widths

我们认为出现这样现象是因为热积累和热扩散效应相互竞争造成的。EATON S M通过研究得到^[14],当重脉冲频率为0.5~2 MHz时,热积累占据主导地位,同时热扩散效应被抑制。脉宽较大的激光由于存在很强的热扩散效应,产生的热应力严重时会造成材料炸裂。结合上述理论,随着激光脉宽的逐渐增大,热扩散造成的热应力影响区使第二根加工的波导和第一根加工的波导相互影响,令定向耦合器耦合器的波导间(波导间距8 μm)存在传播常数差。根据耦合方程,当两根发生耦合的光波导导模之间的传播常数差 $\Delta\beta$ 不为零(即相位失配),输入波导的能量就不能完全耦合到另一根波导当中,两者间最大能量转换效率为 $Kc^2/(Kc^2 + \Delta\beta^2)$ 。对照本文实验,我们采用的是1 MHz重频的飞秒脉冲激光,脉宽较小时,热积累效应占据主导,热扩散效应不明显,制备出的定向耦合器的透射率高达97%以上。当脉宽逐渐变大,热扩散效应逐渐增强,热应力也随之逐渐增强,导致耦合区波导的传播常数不同。同时印证了在较宽的脉宽下加工条件下,波导间的透射率降低的实验结果。

3 结论

通过控制激光波长、重频、单脉冲能量、扫描速度、聚焦点的几何形状、重复频率、偏振方向等参量不变,只改变飞秒激光脉宽参数,在玻璃内部直写波导结构。利用光学显微镜、模场分析等技术对加工区域的结构细节进行了表征,发现短脉宽加工的波导直径更接近光纤芯层直径,且随着脉宽的增加,波导直径变小且模场趋于椭球形,降低了器件与光纤的耦合效率。并且我们还尝试了使用脉冲宽度为239 fs~700 fs的激光直写定向耦合器,发现了239 fs~600 fs的激光辐照直写虽会对波导端面形貌带来较大影响,但是这并不影响能量在波导间完全耦合传输;而当脉冲宽度逐渐从600 fs升高至700 fs,能量则不能在波导间完全耦合传输。结果表明,飞秒激光加工玻璃波导的脉宽窗口在600 fs以下且可以制备低损耗和模式良好的玻璃波导。

参考文献

- [1] MALINAUSKAS M, ŽUKAUSKAS A, HASEGAWA S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(8): e16133.
- [2] STIHLER C, JAUREGUI C, TÜNNERMANN A, et al. Modal energy transfer by thermally induced refractive index gratings in Yb-doped fibers[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(59):1-12.
- [3] ZHAO Ruizhe, HUANG Lingling, WANG Yongtian. Recent advances in multi-dimensional metasurfaces holographic technologies[J]. *Photonix*, 2020, 1(20): 1-24.
- [4] ZOU Xiujuan, ZHENG Gaige, YUAN Quan, et al. Imaging based on metalenses[J]. *Photonix*, 2020, 1(2): 1-24.
- [5] MEANY T, GRÄFE M, HEILMANN R, et al. Laser written circuits for quantum photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): 363-384.
- [6] AMS M, MARSHALL G D, DEKKER P, et al. Ultrafast laser written active devices[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(6): 535-544.
- [7] CECCARELLI F, ATZENI S, PENTANGELO C, et al. Low power reconfigurability and reduced crosstalk in integrated photonic circuits fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(10): 2000024.
- [8] CIAMPINI M A, ORIEUX A, PAESANI S, et al. Path-polarization hyperentangled and cluster states of photons on a chip[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(4): e16064.
- [9] CRESPI A, RAMPONI R, OSELLAME R, et al. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits[J]. *Nature Communications*, 2011, 2(566): 1-6.
- [10] FLAMINI F, MAGRINI L, RAB A S, et al. Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e354.
- [11] SEOW Y C, LIM S P, LEE H P. Optofluidic variable-focus lenses for light manipulation[J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(19): 3810-3815.
- [12] SPAGNOLO M, MOTTA R, MEMEO R, et al. Resonant opto-mechanical modulators and switches by femtosecond laser micromachining[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23133-23142.
- [13] TANG Hao, LIN Xiaofeng, FENG Zhen, et al. Experimental two-dimensional quantum walk on a photonic chip[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaat3174.
- [14] EATON S M, ZHANG H, NG M L, et al. Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9443-9458.
- [15] GALLAIS L, DOUTI D B, COMMANDRE M, et al. Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(22): 223103.
- [16] BAI Jing, CHENG Guanghua, LONG Xuewen, et al. Polarization behavior of femtosecond laser written optical

- waveguides in Ti: Sapphire[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15035-15044.
- [17] AMS M, MARSHALL G D, SPENCE D J, et al. Slit beam shaping method for femtosecond laser direct-write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses[J]. Optics Express, 2005, 13(15): 5676-5681.
- [18] OSELLAME R, TACCHEO S, MARANGONI M, et al. Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(7): 1559-1567.
- [19] ZHANG Qian, YANG Dong, QI Jia, et al. Single scan femtosecond laser transverse writing of depressed cladding waveguides enabled by three-dimensional focal field engineering[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13263-13270.
- [20] KAZANSKY P G, YANG W, BRICCHI E, et al. “Quill” writing with ultrashort light pulses in transparent materials[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(15): 151120
- [21] YU Feng, WANG Licheng, CHEN Yang, et al. Polarization independent quantum devices with ultra-low birefringence glass waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(5): 1451-1457.