

高重复频率飞秒激光烧蚀熔融石英制作单偏振微结构波导

汪月容 李毅 王思佳 何书通 柴路 王清月 胡明列

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 利用中心波长为 1040 nm、脉宽为 190 fs、重复频率在 200~5000 kHz 之间可调的飞秒激光对熔融石英进行微加工。研究了烧蚀阈值随脉冲重复频率、扫描速度的变化规律, 阐明不同参数下热扩散效应及热累积效应对烧蚀过程的主导作用。在最优化条件下, 制作了双线波导, 可以对 1040 nm 激光实现圆形基模传输。进一步制作了椭圆晶胞的六角微结构波导, 对 1040 nm 激光可以输出近高斯强度分布的基模, 模场面积达到 247.48 μm^2 。该微结构波导可实现单偏振传输, 消光比达 9.05, 波导数值孔径约 0.017。

关键词 激光技术; 飞秒激光微纳加工; 波导; 光子晶体

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1203002

Directly Writing Single Polarization Microstructure Waveguide in Fused Silica by High Repetition Rate Femtosecond Laser

Wang Yuerong Li Yi Wang Sijia He Shutong Chai Lu Wang Qingyue Hu Minglie

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science of Ministry of Education, Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Femtosecond laser at 1040 nm centre wavelength with 190 fs pulse width and variable (200~5000 kHz) repetition rate has been applied to microfabricate fused silica. Threshold energy has been measured as a function of the pulse repetition rate and the scan speed. The role of thermal diffusion and heat accumulation effects in forming waveguide is demonstrated. Double-line waveguides with the optimal parameters have been written, where the guided mode is fundamental mode and nearly circular. Hexagonal microstructure waveguide with elliptical cells has been made, where the mode has a nearly Gaussian intensity profile at 1040 nm. The microstructure waveguide has a large mode area about 247.48 μm^2 and single polarization propagation property with extinction ratio about 9.05. The numerical aperture of the waveguide is about 0.017.

Key words laser technique; femtosecond laser micromachining; waveguide; photonic crystal

OCIS codes 140.3390; 140.7090; 320.2250

1 引言

自 1996 年 Davis 等^[1]首次报道利用飞秒激光直写光波导结构以来, 飞秒激光直写技术得到越来越多的重视^[2~4]。相较于离子注入法、热扩散型离

子交换法等目前常用的波导制作工艺, 飞秒激光直写技术具有制作工艺简单、成本低、适用介质广的优势, 而且可实现三维体加工, 在制作复杂的高密度集成光学器件方面展现了巨大的潜力^[2]。目前应用最

收稿日期: 2012-06-07; **收到修改稿日期**: 2012-08-13

基金项目: 国家 973 计划(2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金(61078028, 60838004)、全国优秀博士学位论文作者专项资金(2007B34)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110032110056)和强场激光物理国家重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 汪月容(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光微纳加工方面的研究。E-mail: wangyr99@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体光纤及超短脉冲激光技术等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

广泛的飞秒激光加工光源系统是钛宝石激光器,其中钛宝石再生放大系统^[5]输出脉冲重复频率一般较低,限制了加工速度;而钛宝石振荡级^[6]输出单脉冲能量小,需要通过紧聚焦才能达到材料的损伤阈值,限制了加工深度,另外适用材料范围小。此外钛宝石激光系统复杂而昂贵,需要专人维护和专门的超净环境。本研究基于课题组自行搭建的光子晶体光纤飞秒激光放大系统^[7],输出重复频率 200~5000 kHz 可调。在重复频率为 1 MHz 时,输出最高平均功率为 920 mW,直写速度可高达 100 mm/s。

以石英为基底的玻璃、晶体材料是现代光子学器件的基石,因而各科研单位广泛地展开了飞秒激光在熔融石英中刻写波导的研究。2005 年, Nasu 等^[8]在熔融石英刻写波导,实现对 1550 nm 波长传输损耗为 0.1 dB/cm;2009 年, Pospiech 等^[9]利用掺 Yb 光纤放大器输出的 1 MHz 飞秒激光结合空间光调制器(SLM)技术产生多个激光焦点,在熔融石英内部同时制作出双波导结构;同年, Kim 等^[10]利用 1 MHz、523 nm 的光纤飞秒激光器在熔融石英内部制作出微流体通道和光波导,用于单细胞检测;2011 年, Eaton 等^[11]在熔融石英中实现高达 0.022 的折射率改变。随着研究的深入,飞秒激光在石英中刻写波导的性能及功能都得到了极大的提升。

飞秒激光在晶体中刻写波导一般有两类刻写方式: I 类刻写^[3](激光聚焦区域折射率改变量为正,波导区域为聚焦区域)和 II 类刻写^[4](激光聚焦区域折射率改变量为负,聚焦区域周围折射率改变量为正,一般通过刻写双线实现导光,波导区域在双线之间)。本文提出利用 II 类刻写在熔融石英中制作大模场单偏振的类椭圆晶胞光子晶体光纤微结构波导。相较于基于 I 类刻写的单线波导和基于 II 类刻写的双线波导,该微结构波导具有输出光斑模式灵活可控、非线性可控、弯曲损耗小等优点。而且飞秒激光刻蚀线横截面近似椭圆形,以此作为微结构波导的晶胞,能在六角微结构波导中引入高双折射,结合 II 类刻写引入的偏振导光性,对 1040 nm 激光实现了单偏振传输。该微结构波导模场面积达到 $247.48 \mu\text{m}^2$,消光比为 9.05。

2 实验装置

实验装置图如图 1 所示。光子晶体光纤啁啾脉冲放大系统输出中心波长为 1040 nm、脉冲宽度为 190 fs 的线偏振飞秒激光脉冲,重复频率在 200~

5000 kHz 之间可调。经数值孔径(NA)为 0.42 的物镜聚焦后,光斑尺寸为 $1.88 \mu\text{m} \times 2.64 \mu\text{m}$ 。通过 CCD 监控加工效果,实时调整加工参数。飞秒激光定位系统的最小加工速度为 $1 \mu\text{m/s}$,分辨率为 $1 \mu\text{m}$,定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。实验采用横向直写方式,样品移动方向如图 1 中所示。

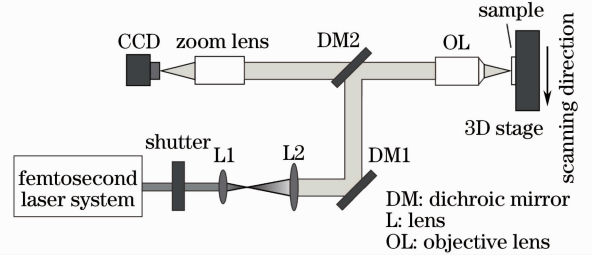


图 1 飞秒激光微加工系统示意图

Fig. 1 Femtosecond laser micromachining experimental setup

实验选取尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的熔融石英(Corning 7980-0F)样品,使用的脉冲重复频率分别为 0.5、0.65、1、1.5 和 2 MHz,扫描速度分别为 0.01、0.1、1、10、100 mm/s。激光聚焦在样品表面以下 $600 \mu\text{m}$ 处。

波导性能由自行搭建的测试系统进行测试:由掺镱光纤锁模激光器输出 1040 nm 光经偏振分光棱镜(PBS)输出水平偏振光,由半波片($\lambda/2$)调整输出偏振方向,经焦距分别为 50 mm 和 100 mm 的透镜对扩束后,用 NA 为 0.1 的物镜耦合至波导中,输出光束由 NA 为 0.65 的物镜成像至 CCD。通过该方法可以测量波导的输出光斑模式、模场直径、远场发散角、传输损耗等参数。

3 实验结果及分析

3.1 飞秒激光直写基本理论与实验验证

飞秒激光在透明电解质中写制光波导有 I 类刻写和 II 类刻写两种方式,目前已有多种理论解释这两类刻写方式诱导折射率变化的机理,包括色心形成^[12]、热致^[13]或光致结构变化^[14]、纳米平面阵列形成^[15,16]和晶格缺陷^[17]等。其中,文献^[17]中认为飞秒激光聚焦引入晶格缺陷,诱导聚焦区域及其周围产生折射率变化。该文中建立晶格缺陷模型,假设晶格缺陷会降低晶体自然极化率,离子移动与晶格缺陷紧密相关,晶体结构严重无序化导致体积变化。该模型较全面地解释了激光诱导晶体折射率变化:激光能量较低时,聚焦区域体积变化可忽略,自然极化率降低导致折射率增加,即 I 类刻写;激光能量较

高时,体积变化大,忽略其他因素,聚焦区域体积膨胀导致折射率减小,周围区域受应力影响导致折射率增加,即Ⅱ类刻写。

实验结果验证了上述结论,图2所示为不同脉冲重复频率激光以不同扫描速度在石英中直写形成的波导结构。在任意重复频率,较低激光能量飞秒激光作用下,以低扫描速度直写时,产生亮线结构,即Ⅰ类刻写,如图2(a)所示,直写参数为重复频率 f 2 MHz,激光脉冲能量 E 185 nJ,扫描速度 v 0.01 mm/s。在较低重复频率飞秒激光脉冲作用下,提高激光脉冲能量到材料破坏阈值以上时,直写产生暗线结构,即Ⅱ类刻写,如图2(b)所示,直写参数为重复频率 650 kHz,激光脉冲能量 230 nJ,扫描速度 0.01 mm/s。如果以较高重复频率飞秒激光脉冲直写,提高激光脉冲能量时,容易产生珍珠链结构^[18,19],如图2(c)所示,直写参数为重复频率2 MHz,激光脉冲能量 210 nJ,扫描速度 0.01 mm/s。通过上述系统实验可以获得形成Ⅱ类刻写的飞秒激光脉冲和扫描速度参数。

为了获得最佳的加工条件,实验研究了脉冲重复频率、扫描速度对Ⅱ类刻写阈值的影响。固定扫描速度($v=1$ mm/s),测量不同脉冲重复频率下的烧蚀阈值,结果如图3(a)所示。由低重复频率500 kHz到高重复频率1.5 MHz时,烧蚀过程逐渐从热扩散作用占主导变为热累积作用占主导^[20],即随重复频率增加,阈值能量逐渐降低。固定脉冲重复频率(650 kHz),进一步研究扫描速度对损伤阈

值的影响,如图3(b)所示。低扫描速度时,烧蚀阈值随扫描速度增加而迅速增长;高扫描速度时,烧蚀阈值增加速度逐渐变缓,达到饱和。由于多脉冲效应,低速扫描时累积脉冲数较多,脉冲数目变化引起阈值变化较大;高速扫描时累积脉冲数少,脉冲数目变化对阈值影响较小^[21]。

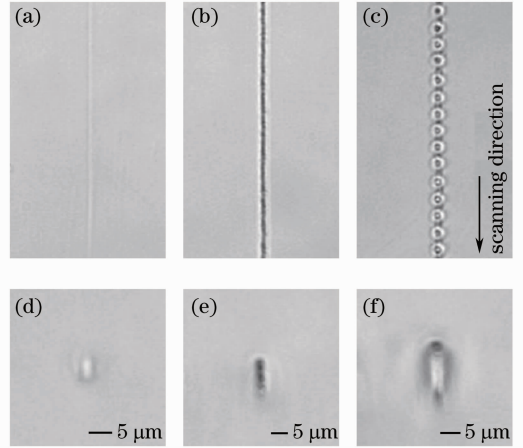


图2 飞秒激光在熔融石英内部诱导损伤的三种典型结构正面图及横截面图。(a)亮线结构及(d)截面图; (b)暗线结构及(e)截面图;(c)珍珠链结构及(f)截面图

Fig. 2 Top side images and cross-section images of three typical damage structures fabricated in fused silica by focusing femtosecond laser. (a) Light line structure and (d) its sectional view; (b) dark line structure and (e) its sectional view; (c) pearl chain structure and (f) its sectional view

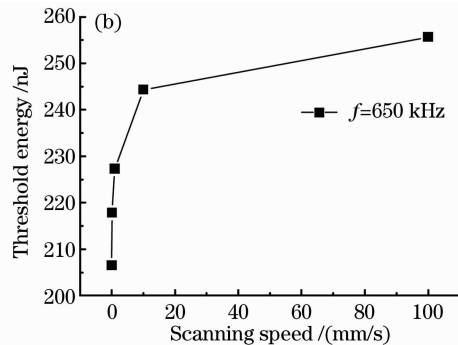
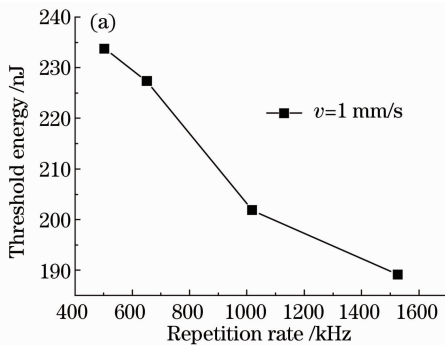


图3 Ⅱ类刻写阈值脉冲能量随脉冲重复频率(a)和扫描速度(b)的变化关系

Fig. 3 Threshold pulse energy of type II modification as a function of (a) pulse repetition rate and (b) scanning speed

3.2 双线波导

根据上述系统实验结果,选择合适的系统参数刻写双线波导:固定重复频率为 650 kHz,扫描速度为 1 mm/s,实验刻写了脉冲能量 E 为 267、287、328 nJ,距离 d 为 10、15、20、25、30 μm 的双线波导,

波导长 9.5 mm。不同脉冲能量、双线距离为 30 μm 的波导横截面及导光模式的近场如图4所示,激光入射方向及偏振方向在图4(c)中由箭头标出。随着脉冲能量增加,烧蚀区尺寸逐渐增大,整体形状不变,其中激光脉冲能量为 328 nJ 时得到的暗线结构

尺寸约为 $4.55 \mu\text{m} \times 13.96 \mu\text{m}$;随着脉冲能量增加,光在竖直方向和水平方向上的泄漏减少,这是由于脉冲能量增大导致烧蚀区尺寸和波导区折射率改变量增大,波导对光束束缚作用增强。

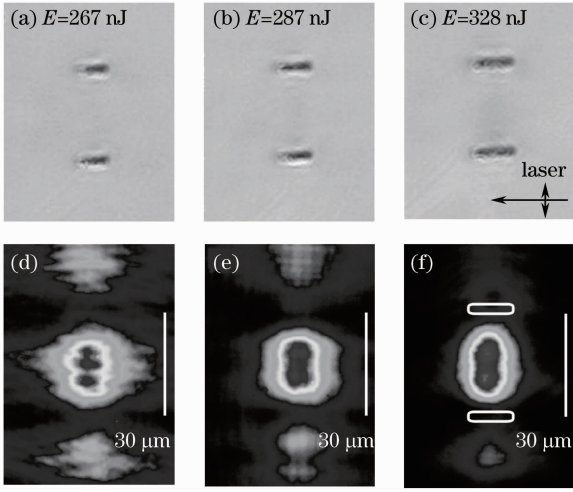


图4 双线波导横截面图及对应导光模式。(a)~(c) $E=267, 287, 328 \text{ nJ}$, $d=30 \mu\text{m}$ 的双线波导横截面图,激光传输方向及偏振方向在图(c)中由箭头标出;(d)~(f)与图(a)~(c)对应的双线结构导光模式,双线结构位置在图(f)中由白线标出

Fig. 4 Microscope images of cross-section and near field images of guided mode of double-line waveguide. (a)~(c) Cross-section images of double-line waveguide with $E = 267, 287, 328 \text{ nJ}$ and $d = 30 \mu\text{m}$, transmission direction and polarization of laser are marked by arrows in (c); (d)~(f) near field images of guided mode of double-line waveguide corresponding to (a)~(c), location of double line structure is marked by white line in Fig. (f)

改变双线距离会引起输出光斑形状发生变化,如图5所示。双线距离较大时,输出光斑呈长椭圆形形状。随双线距离减小,光斑形状逐渐变圆。进一步减小双线距离,光斑形状逐渐变为扁椭圆,光泄漏变得严重,最后将无法导光。其中写制脉冲能量为 328 nJ 、双线距离为 $20 \mu\text{m}$ 的波导输出光斑形状最佳,模场尺寸为 $17.4 \mu\text{m} \times 16.4 \mu\text{m}$ 。

双线波导具有单偏振传输特性, 1040 nm 水平偏振光入射时(即与刻写波导激光偏振垂直)导光最强,竖直偏振光无法传输,消光比约为 4.54 ,与文献[5,17]报道一致。采取阶跃型折射率分布近似^[22],估算波导的等效折射率改变量及数值孔径。对于脉冲能量为 328 nJ 、距离为 $20 \mu\text{m}$ 的双线结构,计算得到波导区数值孔径约为 0.015 ,折射率改变量为 8×10^{-5} 。

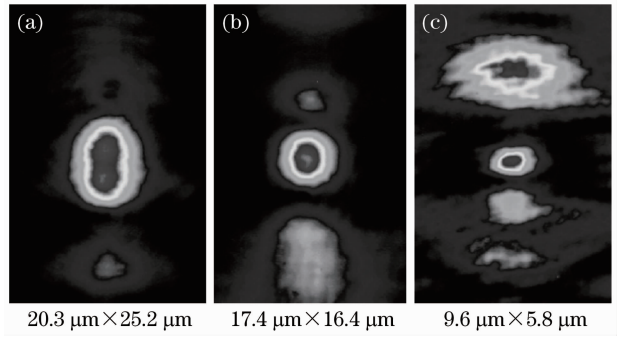


图5 (a)~(c)脉冲能量为 328 nJ ,双线距离分别为 $30, 20, 10 \mu\text{m}$ 时的双线波导导光模式
Fig. 5 (a)~(c) Near field images of guided mode of double-line waveguide when pulse energy is 328 nJ and separations of double line are $30, 20, 10 \mu\text{m}$, respectively

3.3 光子晶体波导

对光子晶体光纤的研究显示椭圆晶胞光子晶体结构能够增强双折射效应,对光纤色散及群速度分离有很大影响,可以实现光波在光子晶体结构中保偏^[23]、超低超平坦色散^[24]、零走离^[25]的传输。飞秒激光刻蚀线的横截面近似为椭圆形,可以直接用于制作类椭圆晶胞光子晶体光纤微结构波导,具有快速成型、自由度高的优势。

根据上面的激光参数,利用飞秒激光直写了椭圆晶胞微结构波导。实验选择激光脉冲能量为 267 nJ ,扫描速度为 1 mm/s ,单线尺寸为 $3.69 \mu\text{m} \times 9.95 \mu\text{m}$ 。刻写了 $d=12 \mu\text{m}$ 、 $d=24 \mu\text{m}$ 的双线结构,横向距离 $\Lambda_x=15 \mu\text{m}$ 、纵向距离 $\Lambda_y=12 \mu\text{m}$ 的单层六角结构和 $\Lambda_x=15 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda_y=12 \mu\text{m}$ 的三层六角结构,四种结构横截面及导光模式如图6所示。双线结构的光斑模式为水平偏振光入射的结果,单层六角结构、三层六角结构的光斑模式为竖直偏振光入射的结果。四种结构导光模式对比显示,单层六角结构对光的限制作用比双线结构强,三层六角结构对光的限制作用比单层六角结构强。三层六角结构输出光斑形状较好,与六角光子晶体光纤输出光斑形状类似,而且具有近高斯基模的强度分布。

这种六角微结构波导对 1040 nm 波段的激光具有单偏振传输特性。竖直偏振激光入射时,波导输出基模,光强最强,水平偏振激光无法通过,消光比为 9.05 。在一定范围内调整激光耦合位置,竖直偏振光入射仍产生基模,水平偏振光入射可产生 TEM_{01} 高阶模。基模模式具有近高斯的强度分布,光斑尺寸为 $21.5 \mu\text{m} \times 14.7 \mu\text{m}$,模场面积约为 $247.48 \mu\text{m}^2$ 。

采用折射率阶跃波导分布近似^[22],估算得该波导结构数值孔径为0.017,等效折射率改变量为 1×10^{-4} 。进一步通过在两块不同长度(9.5 mm、

19.5 mm)的熔融石英样品上使用相同系统参数刻写该波导结构,并进行导光实验,测得该波导结构传输损耗约为3.1 dB/cm。

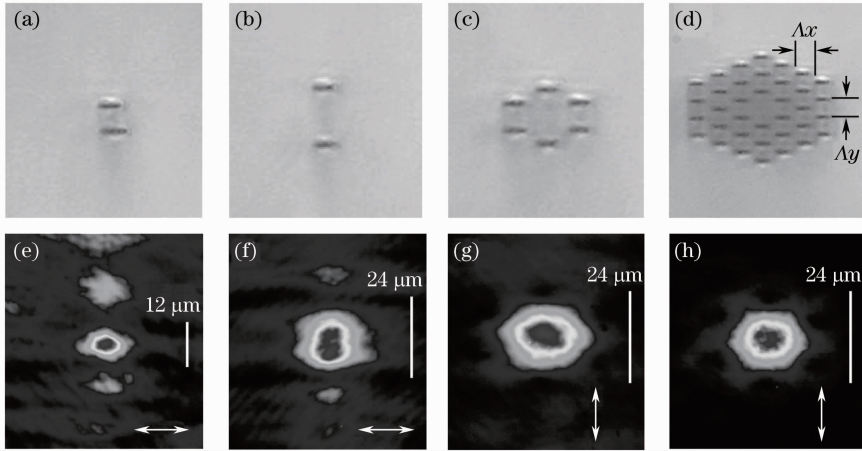


图6 各结构横截面及导光模式对比。(a), (e) $d=12 \mu\text{m}$ 双线结构;(b), (f) $d=24 \mu\text{m}$ 双线结构;(c), (g) $\Delta_x=15 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_y=12 \mu\text{m}$ 单层六角结构;(d), (h) $\Delta_x=15 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_y=12 \mu\text{m}$ 三层六角结构;测试激光偏振方向在各图中由箭头标出

Fig. 6 Microscope images of cross-section and near field images of guided mode of different structures. (a), (e) Double line structure with $d=12 \mu\text{m}$; (b), (f) double line structure with $d=24 \mu\text{m}$; (c), (g) single-decker hexagonal structure with $\Delta_x=15 \mu\text{m}$ and $\Delta_y=12 \mu\text{m}$; (d), (h) triple-decker hexagonal structure with $\Delta_x=15 \mu\text{m}$ and $\Delta_y=12 \mu\text{m}$; polarization of testing laser is marked by arrows

4 结 论

研究了飞秒激光对熔融石英的三种刻写效果及相应的系统参数,测量了烧蚀阈值随扫描速度、脉冲重复频率的变化关系,阐明了热累积效应、热扩散效应及多脉冲效应对阈值的影响。成功制作了不同脉冲能量、不同距离的双线结构波导,并研究了脉冲能量和双线距离对双线波导导光效果的影响。进一步选择合适参数制作了大模场单偏振三层六角椭圆晶胞微结构波导,其晶胞横向距离为 $15 \mu\text{m}$ 、纵向距离为 $12 \mu\text{m}$ 。中心波长为 1040 nm 的激光在该微结构波导传输具有近高斯基模的强度分布,模场面积为 $247.48 \mu\text{m}^2$ 。该结构具有单偏振传输特性,消光比达9.05。波导数值孔径约为0.017,折射率改变量约为 1×10^{-4} 。该波导结构传输损耗较大,约为3.1 dB/cm。下一步工作将集中在优化参数减小波导传输损耗、制作弯曲微结构波导上。

参 考 文 献

- 1 K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1729~1731
- 2 R. R. Gattass, E. Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**: 219~225
- 3 M. Ams, G. D. Marshall, P. Dekker *et al.*. Ultrafast laser written active devices[J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2009, **3**(6):

535~544

- 4 G. Della Valle, R. Osellame, P. Laporta. Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(1): 013001
- 5 C. Zhang, N. Dong, J. Yang *et al.*. Channel waveguide lasers in Nd:GGG crystals fabricated by femtosecond laser inscription[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 12503~12508
- 6 A. M. Streltsov, N. F. Borrelli. Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(1): 42~43
- 7 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 8 Y. Nasu, M. Kohtoku, Y. Hibino. Low-loss waveguides written with a femtosecond laser for flexible interconnection in a planar light-wave circuit[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 723~725
- 9 M. Pospiech, M. Emons, A. Steinmann *et al.*. Double waveguide couplers produced by simultaneous femtosecond writing[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3555~3563
- 10 M. Kim, D. J. Hwang, H. Jeon *et al.*. Single cell detection using a glass-based optofluidic device fabricated by femtosecond laser pulses[J]. *Lab Chip*, 2009, **9**(2): 311~318
- 11 S. M. Eaton, M. L. Ng, R. Osellame *et al.*. High refractive index contrast in fused silica waveguides by tightly focused, high-repetition rate femtosecond laser[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, **357**(11-13): 2387~2391
- 12 A. M. Streltsov, N. F. Borrelli. Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2496~2504
- 13 C. B. Schaffer, J. F. Garcia, E. Mazur. Bulk heating of transparent materials using a high-repetition-rate femtosecond laser[J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **76**(3): 351~354

- 14 J. W. Chan, T. Huser, S. Risbud *et al.*. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1726~1728
- 15 E. Bricchi, B. G. Klappauf, P. G. Kazansky. Form birefringence and negative index change created by femtosecond direct writing in transparent materials[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 119~121
- 16 R. Taylor, C. Hnatovsky, E. Simova. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass[J]. *Laser Photon. Rev.*, 2008, **2**(1-2): 26~46
- 17 J. Burghoff, S. Nolte, A. Tunnermann. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **89**(1): 127~132
- 18 R. Graf, A. Fernandez, M. Dubov *et al.*. Pearl-chain waveguides written at megahertz repetition rate[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **87**(1): 21~27
- 19 H. Zhang, S. M. Eaton, P. R. Herman. Low-loss Type II waveguide writing in fused silica with single picosecond laser pulses[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 4826~4834
- 20 S. M. Eaton, H. Zhang, M. L. Ng *et al.*. Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical waveguides[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9443~9458
- 21 B. Pommellec, M. Lancry, A. Chahid-Erraji *et al.*. Modification thresholds in femtosecond laser processing of pure silica; review of dependencies on laser parameters[invited][J]. *Opt. Materials Express*, 2011, **1**(4): 766~782
- 22 D. Homoelle, S. Wielandy, A. L. Gaeta *et al.*. Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(18): 1311~1313
- 23 Y. Yue, G. Kai, Z. Wang *et al.*. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 469~471
- 24 J. Wang, C. Jiang, W. Hu *et al.*. Dispersion and polarization properties of elliptical air-hole-containing photonic crystal fibers [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(5): 913~917
- 25 M. J. Steel, R. M. Osgood, Jr. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(4): 229~231

栏目编辑:宋梅梅