

飞秒激光在透明介质中制备波导器件进展

董明明^{1,2} 林耿^{1,2} 赵全忠¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 飞秒激光脉冲通过非线性相互作用可以在透明介质内部诱导载流子的激发、弛豫和折射率改变,从而用于制备光波导器件。飞秒激光无法比拟的高度局域三维加工能力使其在有源和无源波导器件制备中被广泛研究。综述了飞秒激光在多种透明介质中诱导折射率改变的机理、波导器件制备的实验进展和波导性能优化技术,分析了其研究趋势和应用前景。

关键词 光学制造;波导器件;飞秒激光;透明介质;折射率改变

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010002

Progress on Femtosecond Laser-Fabricated Waveguide Devices in Transparent Dielectrics

Dong Mingming^{1,2} Lin Geng^{1,2} Zhao Quanzhong¹

(¹ State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Femtosecond laser pulses can induce carrier excitation, relaxation and refractive index change via nonlinear interaction in transparent dielectrics, which then act as optical waveguide. The fabrication of active and passive optical waveguide devices by femtosecond laser has been extensively researched owing to its unrivaled highly-localized and three-dimensional machining capability. In this paper, three aspects of femtosecond laser-induced waveguide devices are introduced. The mechanisms of femtosecond laser-induced refractive-index change is discussed. Recent experimental progress regarding the fabrication waveguide is reviewed. At last, the future trends and application prospects of femtosecond laser-induced waveguide devices are analyzed.

Key words optical fabrication; waveguide device; femtosecond laser; transparent dielectric; refractive-index change

OCIS codes 220.4000; 130.3120; 350.3850

1 引言

光波导是集成光学器件的基础。目前,光波导可以通过基质表面沉积、表面构造以及内部构造得到^[1],能够在基底内部制作光波导的方法主要有紫外曝光^[2~4]、离子扩散^[5]、离子/中子注入^[4]、离子/中子交换^[6]等。尽管这些方法已经很成功,但是应用范围往往局限于二维平面波导。相对于这些方法,飞秒激光直写光波导具有独特的优势。由于介质对超短脉冲激光吸收的非线性过程以及激光聚焦的能量高度局域性,通过移动介质和光束的相对位置可以实现其他方式无法完成的三维沟道波导,飞秒激光诱导折射率结构的分辨率可以突破聚焦光束的衍射极限,对介质的损伤阈值低,而且几乎可以在任何透明介质中实现波导直写,处于介质内部的波导对于环境变化的容忍度高^[7]。另外,飞秒激光加工波导不需要苛刻的真空和超净环

收稿日期: 2012-09-06; **收到修改稿日期**: 2012-10-09; **网络出版日期**: 2012-11-12

作者简介: 董明明(1988—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲激光微纳加工方面的研究。

E-mail: mmdong@siom.ac.cn

导师简介: 赵全忠(1974—),男,研究员,主要从事超短脉冲激光微纳加工方面的研究。E-mail: zqz@siom.ac.cn

(通信联系人)

境以及复杂的光刻工序^[8]。这对于制作高集成度、高复杂度和低成本的光子器件具有重要应用价值。

自从1996年飞秒激光第一次被证实能够在透明介质内部诱导折射率改变并制备光波导^[9]以来,国内外进行了广泛的研究,已有上千篇文献进行了相关报道。目前,利用飞秒激光已在包括玻璃、晶体、陶瓷和聚合物等多种材料内部制备了光波导。复杂的光波导器件如分束器^[10~14]、耦合器^[15~17]、滤波器^[18]、波导光栅^[19,20]、连接器^[21,22]、环形共振腔^[23]等也能利用该技术实现。除了无源光波导器件外,近年来利用飞秒激光制备有源光波导器件的报道大量涌现,主要是光波导放大器、频率转换器和光波导激光器。

高折射率衬比度(Δn)、低传输损耗^[24]和截面对称是飞秒激光直写波导实用化的必要条件,目前飞秒激光直写波导的折射率衬比度为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$,传输损耗最低可以达到约0.1 dB/cm,为改善波导对称性出现了多种有效方法。在波导制备中,影响光波导质量的主要参数来自光学参数以及材料自身性能参数。光学参数有脉冲能量、扫描速度、波长、聚焦情况、重复频率、脉冲宽度、偏振、移动方向等。材料性能参数包括带隙、晶态、热学性质和力学性质等。本文主要讨论其中对波导性能影响比较敏感的几个光学参数:激光能量、波长、重复频率、脉冲宽度、偏振。虽然材料性能对最终波导性能有决定性的影响,但是,这部分内容的深度和广度远远超出了一篇文章所能覆盖的范围,所以本文只是简单比较飞秒激光在晶体、玻璃、陶瓷和聚合物这四种透明材料中所获得的波导的性能。

2 飞秒激光诱导透明材料折射率改变机理

尽管飞秒激光对透明材料的折射率修饰已被大量研究,但是仍然没有完整的理论模型可以描述激光诱导材料折射率改变机理。现有的模型倾向于将折射率改变分为载流子激发和引起的折射率最终改变的后续弛豫过程。加工参数和材料性质对激光和物质相互作用的物理机制有重要的影响,导致多样化理论模型的出现。

2.1 载流子激发

用于制作光波导的介质对于飞秒激光通常是透明的,而目前商用飞秒激光聚焦后的峰值功率密度很容易达到介质非线性效应阈值(约 10^{13} W/cm²)^[25],从而透明介质对激光能量的吸收是强非线性的,诱导的折射率改变在焦点处高度局域,这为高精度三维光子器件制备提供了便利。

多光子电离(MPI)、隧穿电离和雪崩电离被认为是宽带隙介质的超短脉冲激发通道^[8,26~28]。多光子电离是价带电子同时吸收多个低能量光子跃迁到导带,所需吸收的光子(光子能量为 $h\nu$)数目 N 和介质带隙 E_g 关系必须满足 $Nh\nu > E_g$,多光子电离率可表示为 dI^N ,其中 I 为功率密度, σ 为多光子吸收截面^[26]。另外,多光子吸收截面也是和激光参数有关的,如偏振^[29,30]。介质在圆偏振和线偏振光作用下的多光子电离截面分别用 σ_c 和 σ_l 表示,则 σ_c 和 σ_l 相对大小对多光子级数 N 的依赖关系可以概括为: $N=1,2$ 时 $\sigma_c/\sigma_l \approx 1$; $N=3,4$ 时 $\sigma_c/\sigma_l > 1$; $N \geq 5$ 时 $\sigma_c/\sigma_l < 1$ ^[29]。

激光辐射场很强时,约束价带电子的原子库仑场受到严重扰动,瞬时电场将原子势垒宽度压缩,从而价带电子在电场方向改变前可能通过隧穿效应摆脱势垒束缚而电离,这个过程被称为隧穿电离。

非线性光电离过程同时包括多光子电离和隧穿电离,两者是相互竞争的过程,图1为两者的相对贡献随辐射照度的变化。判断多光子电离和隧穿电离相对强弱的参数是Keldysh参数 $\gamma = (E_g/2U_p)^{1/2}$ ^[31~33],其中 $U_p = \frac{e^2}{8\pi^2 c^3 \epsilon_0 m^* n} I \lambda^2$ 为有质动力势能,表示电离的电子在光电场作用下振荡的周期平均动能。当 $\gamma > 1$ 时多光子电离占

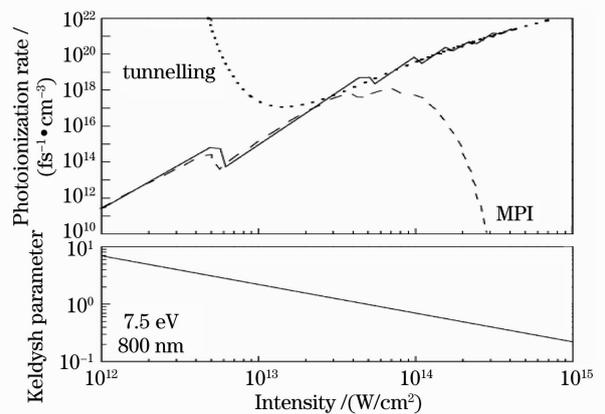


图1 熔融石英玻璃(7.5 eV带隙宽度)中的光电离率(实线)和Keldysh参数随800 nm光辐照强度变化^[32]
Fig. 1 Photoionization rate (the solid line) and Keldysh parameter as functions of laser intensity for 800 nm light in fused silica (7.5 eV band-gap)^[32]

主导,当 $\gamma < 1$ 时隧穿电离占主导。例如,激光作用于熔融石英($E_g \approx 7$ eV)和硼硅酸盐玻璃($E_g \approx 4$ eV),使用钛宝石振荡器(25~30 fs, 2.6 nJ, 80 MHz, 800 nm 倍频光)时,多光子电离为主;使用钛宝石放大激光器(40 fs, 30 μ J, 20 kHz, 800 nm)时,隧穿电离为主^[33]。带隙为 3.3~10.2 eV 的玻璃在 110 fs 激光作用下发生损伤时,对于 800 nm 激光隧穿电离占主导,而 400 nm 激光激发下多光子电离占主导^[32]。一般情况下,直写波导时,激光辐射照度较低,多光子电离作用大于隧穿电离^[8]。

导带电子通过连续吸收多个低能光子而加速,当其动能高于禁带宽度时可能通过碰撞过程使另一个价带电子电离,而自身弛豫到导带底,这个过程重复进行,导致导带电子数目呈指数增加,这就是雪崩电离。雪崩电离需要初始电子作为种子电子,由于杂质热激发的电子浓度很少^[34],所以非线性电离是种子电子的主要来源。雪崩电离是激光作用下载流子的累积过程,从而短脉冲激光(对于石英玻璃短于 10 fs, 硼硅酸盐玻璃短于 100 fs)和介质作用时雪崩电离的作用可以忽略^[31];宽带隙材料中,非线性电离更加困难,雪崩电离相对增强^[32]。

光激发导致导带载流子数目持续增加,直到载流子密度达到临界值(约 10^{21} cm⁻³)时,等离子体频率达到激光频率形成共振,此后大部分激光能量将被吸收,激光损伤形成^[26]。

2.2 折射率改变

激光诱导的介质修饰对激光的能量和脉冲宽度具有很大依赖性,图 2 显示的是不同脉冲宽度和脉冲能量决定的 3 种不同材料修饰。在较低脉冲能量和较短脉冲宽度作用下,激光作用区域折射率平滑改变,在较高脉冲能量和较长脉冲宽度作用下介质发生破坏性损伤,而在脉冲能量和脉冲宽度介于上述水平之间时可能出现纳米微结构。

2.2.1 I 型折射率改变

根据所使用的激光强度的不同,将折射率增加分为两种类型^[36~39]。当激光脉冲能量高于介质的电离阈值但低于或接近自聚焦阈值时,能量可以均匀地沉积到透明介质内部,激发的载流子等离子体密度适中^[35]。激光作用区域未出现损伤且折射率增大,可以直接作为光波导,这种情况被广泛称为 I 型折射率改变。

对于 I 型修饰中激光作用区域折射率增大的原因众说纷纭,这也和不同材料及加工参数下折射率改变机理的差异有关。总结如下:

1) 致密化:使用原子力显微镜(AFM)观察飞秒激光在玻璃中诱导的波导端面,发现波导相对玻璃表面发生凹陷收缩,如图 3 所示,从而证明波导区域发生致密化^[40, 41]。直写后的拉曼谱频移显示化学结构变化(如石英玻璃中部分 5,6 元环变为 3,4 元环^[42]以及 Si-O 键长增加和 Si-O-Si 平均键角减小^[43],As₄₀S₆₀玻璃中部分 As-S 键断裂,而 As-As、S-S 键增多^[44],磷酸盐玻璃中 P-O 键长减小^[45])可能是致密化形成的原因。通过低能量飞秒脉冲辐照的石英玻璃的拉曼谱(D2 峰)频移可以估计密度增加约 8%,比使用机械方法获得的致密化低得多^[46]。致密化导致的体积变化会使周围产生应力双折射,但从硼硅酸盐和石英玻璃的双折射光斑推测的折射率改变比实际小一个量级,从而推断折射率增加不应该只是由致密化导致^[33]。

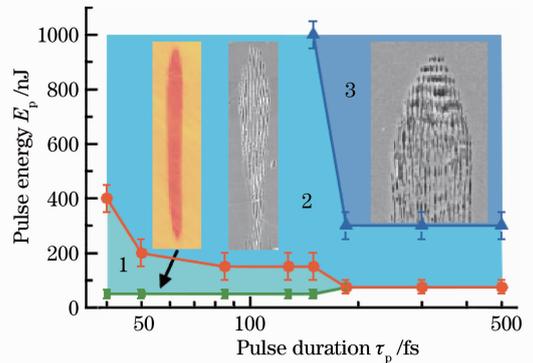


图 2 使用数值孔径 $NA=0.65$ 的显微物镜,不同能量和脉冲宽度决定的三种材料修饰类别图^[35]
Fig. 2 Graph of pulse energy versus pulse duration defining three regimes of material modification using a $NA=0.65$ microscopic objective^[35]

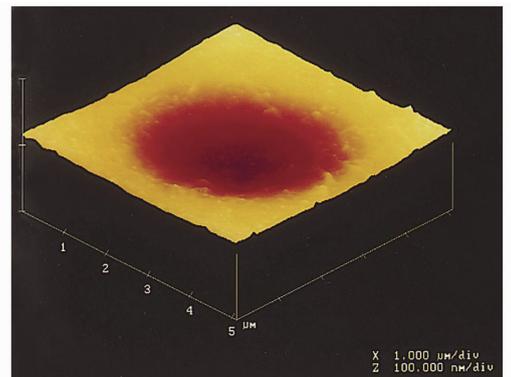


图 3 石英玻璃波导端面的原子力显微镜^[41]
Fig. 3 AFM image of the surface of a core end of waveguide on silica glass^[41]

2) 粘流化:玻璃在不同的退火温度和冷却速度下,最终形成的结构等价于温度为 T_f 的平衡态玻璃, T_f 就是玻璃的粘流化温度。快速冷却使分子结构在达到平衡前被冻结,冷却速度越快,粘流化温度越高^[47]。对于普通氧化物,如 GeO_2 、硅酸盐玻璃等,粘流化温度越高,折射率和密度越小^[48,49],但石英玻璃却表现出反常行为^[42,47,48]。

激光激发的高温等离子体在脉冲结束后被快速淬灭^[50],所形成结构的粘流化温度升高,从而导致折射率增大(反常粘流化温度行为)或减小(正常粘流化温度行为)。但是这种基于热效应的粘流化温度模型却遭到质疑,因为使用具有热累积效应的高重复频率激光和单脉冲效应的低重复频率激光获得的温度相差很大(可达 1000 K),但所得的波导折射率改变差别并不明显^[28,33]。由于飞秒激光的强场作用已经不止是影响材料的分子结构排列,原子激发、化学键断裂、载流子弛豫等这些普通热处理中不显著的过程在飞秒激光作用下却很容易发生,因此我们认为,以粘流化温度作为量度的分子结构弛豫过程在飞秒激光材料改性中的贡献是有限的。

3) 色心形成:在超短脉冲激光作用下,光子、载流子和声子发生相互耦合,自捕获激子^[51]造成等离子体发生辐射跃迁(室温下寿命为纳秒量级)、无辐射跃迁(和晶格声子耦合)或转化为点缺陷等弛豫过程^[52]。拉曼谱和电子自旋共振谱分析表明,和紫外激光一样,在飞秒激光作用下介质内出现了色心缺陷,如石英玻璃中的过氧根、 $\text{Si E}'$ 色心、非桥氧空穴中心^[41],氟化物晶体中的 F_2 、 F_3^+ 等色心^[53,54],钠钙硅玻璃中的 H_3^+ 色心^[55]等。位于激光作用区浓度足够高的色心缺陷可通过 Kramers-Kronig (K-K) 机制导致折射率改变^[33]。但是,退火实验表明退火温度增加时色心减少速度比折射率改变减少速度大得多^[33,56,57],说明色心并不是产生折射率变化的唯一原因。由于色心的热稳定性差,会导致波导器件性能退化,所以为了获得长寿命稳定波导器件应该先对波导器件进行热退火或光漂白处理^[58]。

4) 光折变:Burghoff 等^[59~61]发现光折变材料 LiNbO_3 中诱导的波导只有 n_e 显著增加,而且在 150 °C 退火温度下就消失,从而折射率增加被认为是光折变引起的。非线性电离产生的自由载流子由于光伏效应沿晶体光轴移动,空间电荷分布通过电光效应使折射率发生改变,光折变效应可以使折射率增加也可以减小。由于电光系数的不同, Δn_e 比 Δn_o 大几倍。但是飞秒激光要产生光折变效应的时间是分钟量级,这与实际不符。而且在光折变效应小一个量级的 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体内得到相似的波导,得到的波导在均匀光照下折射率并没有减小,从而证明光折变的贡献可以忽略。

5) 离子重分布:在中高重复频率(大于 100 kHz)飞秒激光作用下,焦点附近玻璃组成元素发生重分布的现象已经被多次报道^[62~65]。图 4 是冕牌玻璃(SiO_2 质量分数 67.3%)受飞秒激光(200 kHz, 120 fs)辐照 1 s 后的 6 种离子的相对浓度分布,焦点中心网络形成元素(Si、O)相对浓度增加,网络修饰元素(K、Na、Ca、Zn)相对浓度减小,这可能是由于后者的化学键强度比前者小得多,所以在激光作用下更容易发生断裂并使元素向周围扩散。热累积效应导致的温度梯度被认为是元素重分布的主要原因^[66, 67]。元素重分布导致的

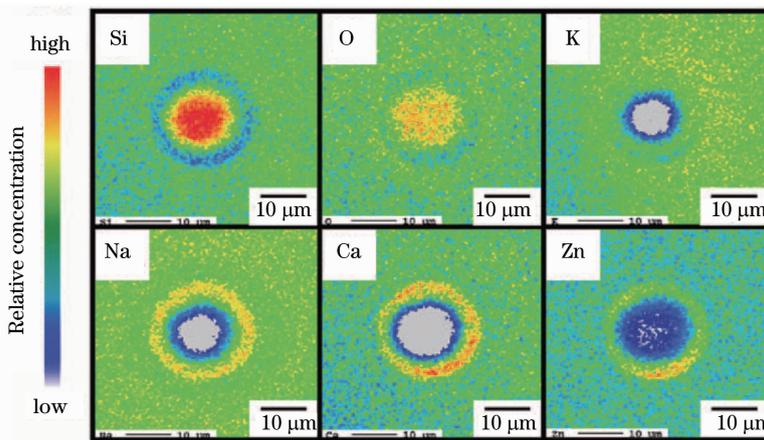


图 4 冕牌玻璃在激光作用后的六种离子相对浓度分布^[65]

Fig. 4 Relative concentration distributions of six kinds of ions in crown glass after laser irradiation^[65]

化学组分变化会改变介质的光学性质,且元素分布和折射率分布具有很强的相关性^[67]。但是在大多数飞秒激光制备波导器件过程中,要求扫描速度比较快,而且所用的激光也不尽是具有热累积效应的,所以元素重分布导致的折射率变化在多数情况下应该很有限。元素重分布要求高重复频率激光在单点的平均辐照时间较长(约 1 s),而从前面的实验回顾中可以看出高重复频率时移动速度很快,单点作用时间很短(如半径为 2 μm 的焦斑,移动速度为 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,单点平均作用时间只有 20 ms)。

目前对于激光作用区折射率升高的理解并不深入,以上各种机制被认为对折射率改变都有贡献,在不同条件下其相对大小会有所不同。由于折射率改变的机理对提高波导性能具有指导意义,所以这方面还值得进一步深入研究。

虽然 I 型折射率升高最早被用于制备波导,但这种方法不是普适的,因为并不是在任何材料中激光作用区域都会产生折射率增加,对于具有完善结构的晶体,激光引起的晶格损伤和缺陷通常会导致密度减小^[68]。事实上在晶体中制作 I 型波导比在玻璃中更加困难,因为所需的激光能量密度更高,而在高能量下晶体中的非线性传播和非线性吸收会导致能量发散而无法有效沉积到焦点,降低激光能量只会使波导折射率的改变变弱^[69],采用长激光脉冲(约 1 ps)圆偏振光可以减小自聚焦和激光成丝的影响^[70,71]。另外,在陶瓷中制作 I 型波导也存在困难^[72]。目前只在少数晶体中获得了 I 型波导,如 LiNbO_3 ^[14,37,69,73]、 ZnSe 多晶^[74] 和硼酸盐晶体 $[\text{Nd}^{3+}:\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3]$ ^[75],且这些 I 型晶体波导只能传输 TM 偏振模式(偏振垂直于晶体表面)。由于波导区和激光直接作用区重合,晶格损伤会降低波导的非线性和电光性质^[60],形成的波导热稳定性差^[69]。甚至在一些玻璃内,如磷酸盐^[45,76]、硅酸盐(IQG-10)^[77]、钠钙硅玻璃^[50]等,在激光直接作用区域密度和折射率也会减小,只在周围的区域才产生折射率增加,虽然有些报道称在特定的参数下也能产生折射率增加,但是至少可以说明要在这些材料中产生正折射率变化的加工参数窗口很窄^[78,79]。

2.2.2 II 型折射率改变

高功率时,激光能量快速沉积产生高密度等离子体,库仑排斥和高温高压将物质和能量以冲击波形式从焦点向外输送,导致稀疏化或微爆炸^[80~82],最终使焦点处折射率减小或形成空洞。而焦点周围的介质由于受到挤压,密度(从而折射率)会增大^[68,83]。对于各向异性晶体,压力场将造成双折射现象。将激光直接作用区域作为包层或应力场区域作为芯层也可以形成波导,这种折射率修饰被称为 II 型。这和 I 型波导区域非线性系数减小的情况不同,II 型波导的激光损伤区域和波导区域不重合,从而波导的增益、荧光、电光和非线性性质基本不会退化。如在 LiTaO_3 晶体中激光损伤区上方和下方产生波导,而且波导区的二次谐波信

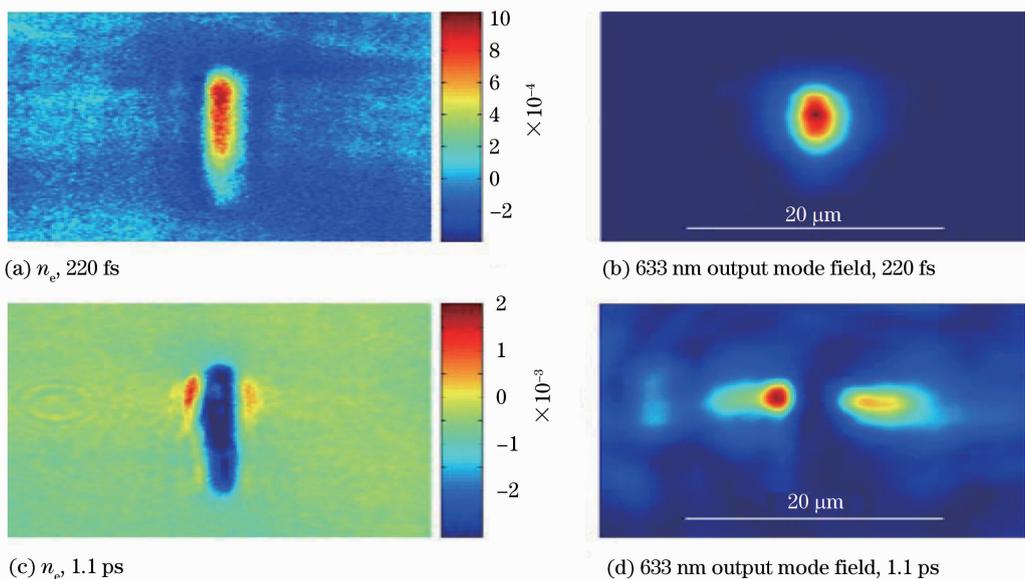


图 5 相同能量(0.2 μJ)下不同脉冲宽度的激光在 LiNbO_3 晶体(x -切割)中形成两种类型的波导^[61]

Fig. 5 Two types of waveguides in x -cut LiNbO_3 at a fixed pulse energy of 0.2 μJ and different pulse widths^[61]

号增加^[84]。使用长脉冲(约 1 ps)可以减小脉冲光在介质中的非线性传输,减小能量发散,利于使焦点处产生空洞损伤^[61]。图 5 是在相同脉冲能量不同脉冲宽度下 LiNbO₃ 晶体中形成的两种类型波导折射率和模场分布,图 5(a)、(b)和(c)、(d)分别对应脉冲宽度为 220 fs 和 1.1 ps 的实验结果,前者属于 I 型波导,而后者属于 II 型波导。图 5(a)、(c)是 n_e 分布,图 5(b)、(d)是 633 nm 输出模场。

2.2.3 双折射结构

当飞秒激光能量介于 I、II 型折射率修饰中间时^[85,86],在一些材料中(石英玻璃^[85,87,88]、硼硅酸盐玻璃^[88]等)会诱导自组织纳米结构。Shimotsuma 等^[87]在掺锗石英玻璃中使用线偏振飞秒激光诱导出 20 nm 宽、周期为波长量级的纳米条纹结构,条纹和激光偏振方向垂直,条纹周期随脉冲数增加而变小,俄歇谱显示条纹处氧元素浓度减小,条纹形成原因被认为是入射光波和等离子体波干涉导致。Bricchi 等^[86]发现石英玻璃中诱导的周期性条纹是由折射率增加(宽, $\Delta n \approx 0.01$)和减少(窄, $\Delta n \approx -0.1$)区域交替形成。Bhardwaj 等^[85]发现在任意角度线偏振光辐照下慢慢移动样品,自组织周期纳米结构可以维持到宏观尺度,条纹周期为 $\lambda_0/2n$ (λ_0 为自由空间波长, n 为石英玻璃折射率),并提出局域场增强效应解释条纹形成原因。图 6 显示线偏振(偏振和移动方向平行或垂直)和圆偏振飞秒激光(数值孔径 $NA=0.65$, $E_p=300$ nJ, $f=100$ kHz, $v=30$ $\mu\text{m/s}$)诱导的纳米结构,可以看出线偏振光诱导的条纹始终和偏振方向垂直,而圆偏振光诱导的结构则是无序的。尽管微结构形成的动力学过程并不完全清楚,但是,这些微结构却被发现具有特殊的光学性质,如各向异性光散射^[89]、双折射、各向异性反射、负折射率改变等^[86]。利用飞秒激光诱导的周期性结构可以实现具有特殊功能的波导,如偏振相关光波导^[82,90]和偏振分束器或耦合器^[91]等。

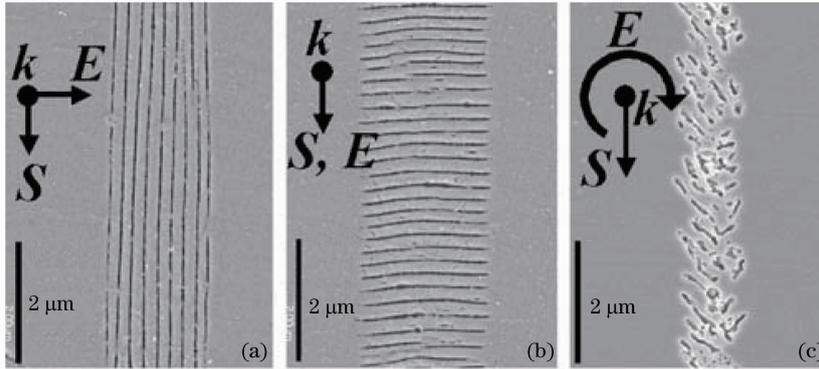


图 6 飞秒激光直写形成的偏振相关纳米结构^[88]

Fig. 6 Polarization-dependent nanostructure formation with femtosecond laser writing^[88]

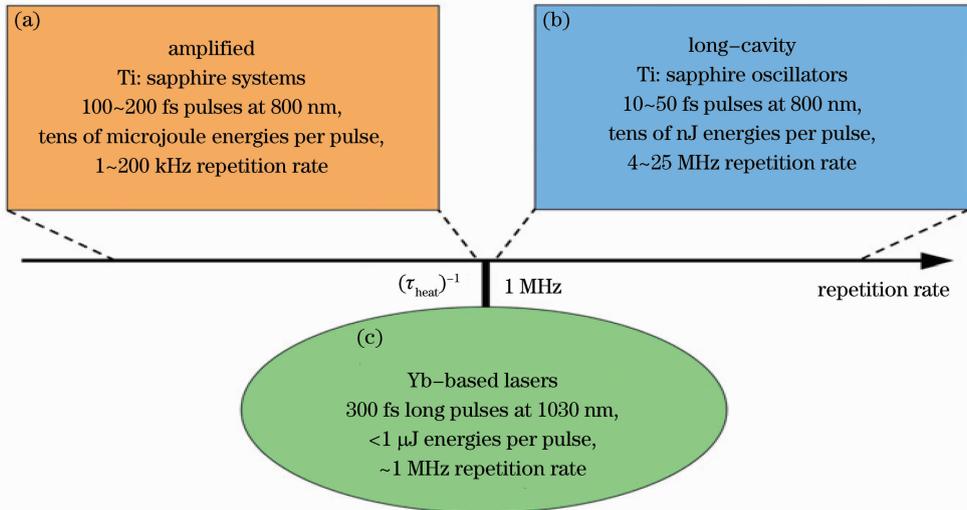
3 飞秒激光制备光波导

3.1 激光系统

目前用于制备波导的飞秒激光系统主要有 3 种,如图 7 所示,高能量(微焦至毫焦)低重复频率(1~250 kHz)再生放大钛宝石激光器、高重复频率(约 10 MHz)低能量(几十纳焦)延长腔钛宝石振荡器、中等能量(纳焦至微焦)高重复频率(兆赫兹级)掺镱光纤激光器和 Yb:KY(WO₄)₂(Yb:KYW)腔倒空激光振荡器^[8,9,28]。第一种能量高,可以加工几乎所有介质,但是低重复频率制约了加工速度,且放大器复杂昂贵;第二种重复频率高,能量低,需要使用紧聚焦物镜,但高倍物镜极短的工作距离降低了激光三维加工的能力,对高损伤阈值的晶体和宽带隙材料(如石英玻璃和磷酸盐玻璃^[92])加工困难;第三种激光系统具有以上两种系统的优点,波导加工质量高,速度快,且系统结构紧凑,价格便宜,适于工业应用。

3.2 直写形式

飞秒激光经过物镜聚焦到达样品内部,移动样品可对其实现选择性修饰。根据激光传播方向和样品移动方向是垂直还是平行可以将激光波导加工分为横向和纵向直写^[85]。如图 8 所示, S 表示光束相对样品的移动方向, k 表示光束传播方向,图 8(a)表示横向直写,图 8(b)和(c)分别表示从上到下和从下到上纵向直写。

图7 直写波导最重要的飞秒激光系统^[9]Fig. 7 Most relevant femtosecond laser systems^[9] for directly written waveguides

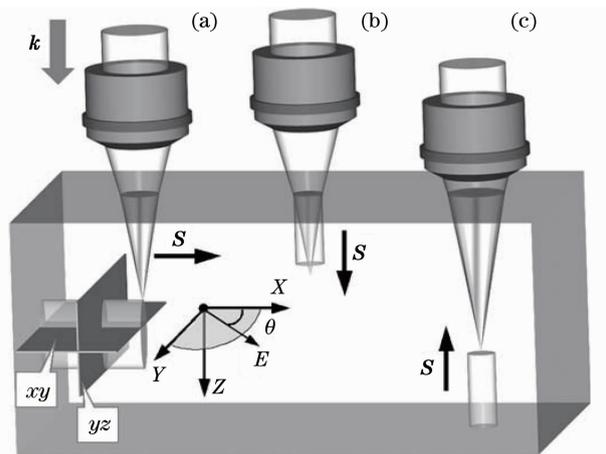
横向直写时样品横向移动范围远大于纵向移动范围,所以对聚焦物镜的工作距离要求小,高倍率和低倍率物镜都适用该方法,而且方便三维加工。但在不采取任何措施的情况下,由于球差(紧聚焦)^[93,94]和自聚焦(弱聚焦)^[95,96]的影响,聚焦光斑纵向尺寸会大于横向尺寸,得到的波导截面是沿激光传播方向拉长的扁长结构,不利于制作对称截面波导。而使用纵向直写得到的波导截面则是高度对称的圆形,但是不同聚焦深度下球差的不同会导致波导直径不均匀,而且物镜有限的工作距离会限制波导的加工长度。使用中可以根据需要选择合适的方式或者进一步采取光束整形方法。另外, Yang 等^[97]观察到在非中心对称介质中,直写激光的传播方向和样品移动方向对波导结构具有重要影响,所以在晶体中制备波导时还需要考虑这种不可逆效应。

3.3 无源波导

无源波导是集成光子器件的基础,目前已经有大量使用飞秒激光在不同介质中制作无源波导的报道。如石英玻璃波导的折射率衬比度(Δn)可以达到 10^{-2} ,传输损耗可以达到 0.1 dB/cm ^[41,98];磷酸盐玻璃波导折射率衬比度较小(10^{-4}),但损耗较低(约 0.1 dB/cm)^[99];而在硅酸盐^[100]、硼酸盐^[75]、硼硅酸盐^[101,102]玻璃中 Δn 则可以大 $1\sim 2$ 个量级^[100];第一个晶体波导是在石英晶体中获得的^[68],其 Δn 与在石英玻璃中的结果相当,但损耗大几十倍;在 LiNbO_3 晶体中则易于实现高衬比度、低损耗波导^[14,103];另外在聚合物材料 PMMA 中也获得了光波导^[15,104],性能和晶体波导相当;在 YAG 多晶陶瓷中的波导损耗可以达到 1 dB/cm ,但 Δn 较小(10^{-4})^[105,106]。

3.4 波导器件

通过聚焦飞秒激光,结合三维精密移动平台可以制备出特殊二维及三维波导器件。Homoelle 等^[11]在石英玻璃中制作出 Y 型分束器。Streltsov 等^[16]使用 80 MHz 飞秒振荡器在硼硅酸盐玻璃中制作出方向耦合器($\Delta n \approx 0.0045$)。Minoshima 等^[17]使用 4 MHz 飞秒激光振荡器在 Corning 0215 玻璃中制作出 X 型光束耦合器($\Delta n \approx 0.01$)。Florea 等^[19]使用 200 kHz 再生放大钛宝石激光器制作出非对称 Mach-Zehnder 波长交错滤波器。Nolte 等^[12]在纯石英玻璃中制作出 1×3 分束器,出射端不在同一平面,这是第一个飞秒直写的严格意义的三维光子器件。Li 等^[107]使用 238 kHz 钛宝石激光器在石英玻璃中制作出 Mach-Zehnder 干涉仪,并用热极化产生二阶非线性系数,在其中一个臂加上电压后使其成为电光调制器。Zhang 等^[108]使用

图8 飞秒激光直写波导示意图^[85]Fig. 8 Schematic diagram of femtosecond laser direct-written waveguide^[85]

声光调制器对高重复频率飞秒激光进行强度调制直写出布拉格光栅(光栅周期 535.6 nm , $\lambda_B \approx 1550\text{ nm}$), 利用这种方波调制脉冲在其他材料中也得到相似结果^[20,109], 使用低重复频率非交叠脉冲也能获得布拉格光栅^[110~112]。Marshall 等^[113]将飞秒激光直写技术用于制作复杂光子回路(如图 9 所示)。Fernandes 等^[91,114]在纯石英玻璃中制作出低传输损耗(0.5 dB/cm)的偏振分束器(分光抑制比分别为 -19 dB 和 -24 dB)以及双折射波导($\Delta n = n_v - n_h = 10^{-5} \sim 10^{-4}$)。

3.5 有源波导

近年来, 飞秒激光制备光波导的研究主要集中在有源波导。Sikorski 等^[115]用飞秒激光在掺铈硅酸盐玻璃中制作出波导放大器(1054 nm 处净增益为 1.5 dB/cm), 这是第一个飞秒激光直写得到的波导有源器件。Osellame 等^[116]使用 166 kHz 腔倒空掺镱玻璃振荡器在钕共掺磷酸盐玻璃中得到 1533 nm (C band)处净增益为 1.2 dB 的波导放大器。Burghoff 等^[59]第一次采用双线结构形成波导, 使用 1 kHz 钛宝石激光在 LiNbO_3 晶体中获得高效倍频光波导(1064 nm 基频光倍频效率达 49%)。Thomson 等^[117]用 500 kHz 激光在掺铈钽酸盐玻璃中获得 1533 nm 处净增益为 16 dB 的波导放大器。Choi 等^[118]使用高重复频率飞秒激光在含有银离子的光敏玻璃中诱导银离子还原、分离、扩散, 不同价态离子团簇形成的纳米颗粒在激光纵向直写波导的横截面通过径向分布产生径向电场。图 10(a)是在 405 nm 光激发下的共焦荧光图像, 产生的径向永久电场(E_{dc})和玻璃的三阶非线性系数发生作用产生二阶非线性极化率(约 1.2 pm/V), 利用该方法可以在中心对称玻璃内制备二阶非线性波导。

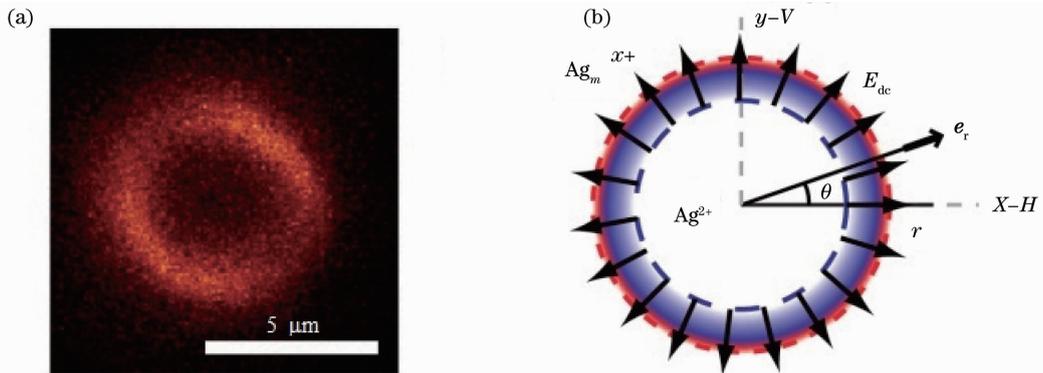


图 10 (a) 激光诱导环形结构的共焦荧光图像; (b) 银离子在环内可能的径向分布示意图^[118]

Fig. 10 (a) Confocal fluorescence image of a photo-induced ring structure; (b) schematic representation of a possible radial distribution of the silver species inside the ring^[118]

除此之外, 利用飞秒激光单次扫描。已经在多种稀土类掺杂增益介质中制作出了波导激光器, 其中斜率效率最高可达到 75% ^[119], 而抽运阈值最低可达约 10 mW ^[120]。

4 波导制备优化技术

4.1 改善波导对称性

波导的截面形状决定着导模的模场分布, 横截面对称的波导结构和标准光纤能够实现模式匹配从而减小耦合损耗。为了改善波导截面对称性已经出现了几种有效的方法。

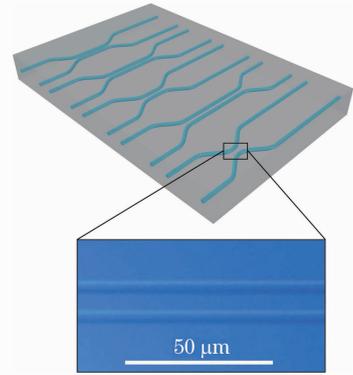


图 9 使用飞秒激光在单个石英片上直写的方向耦合器阵列, 中心耦合区间距为 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[113]

Fig. 9 Schematic of an array of directional couplers fabricated by femtosecond laser direct writing in a single fused silica chip with central coupling region separated by $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[113]

4.1.1 纵向直写

如前所述,横向直写导致波导截面对称性较差,使用紧聚焦虽然可以提高对称性,但是物镜工作距离减小很多,如 20 倍($NA=0.3$)物镜的工作距离是 10 mm^[121]量级,而高数值孔径的油浸物镜的工作距离只有几百微米^[122]。图 11(a)是采用纵向直写方法获得的波导,其截面近似为圆形,而图 11(b)是横向直写获得的波导截面,其对称性较差。

4.1.2 使用高重复频率激光

超强激光对介质作用结束时,形成的等离子体处于高度非平衡态,根据下个脉冲激发是否发生在热弛豫完成之后,可将飞秒激光和介质的作用分为热扩散方式和热累积方式^[123]。

若焦点处的热量通过电子-声子散射将热量耗散到晶格以后下个脉冲才到来,则每个脉冲对介质的作用是相互独立的,形成的结构尺寸由聚焦光斑的大小决定。

若相邻脉冲间隔比等离子体弛豫时间短,脉冲产生的热量将发生累积,激光焦点在介质内部成为点热源。尽管激光激发过程是非线性的,但是折射率改变涉及热效应,形成的结构尺寸比实际光斑大小可以大一个量级^[57]。

区别这两种机制的临界激光频率 $f_{cr} = D_{thermal} / d_{laser}^2$ ^[1],其中 $D_{thermal}$ 为介质热扩散系数, d_{laser} 为诱导结构的直径。 f_{cr} 为 0.1~1.0 MHz^[124] 与介质的种类和聚焦情况有关。图 12 是使用 450 nJ, 1045 nm 的飞秒激光在硼硅酸盐玻璃中诱导的结构,玻璃的热膨胀系数为 0.008 m²/s, $d_{laser} = 2 \mu\text{m}$ 时,计算可得 $f_{cr} = 200 \text{ kHz}$ 。而从图中可以看出,200 kHz 时随着脉冲数目增加,激光诱导的结构逐渐变大,说明热累积效应开始出现。另外热累积效应发生还和单脉冲能量有关,如在硼硅酸盐玻璃中,200kHz 重复频率发生热累积要求单脉冲能量达到 900 nJ 左右,而对于 2 MHz 重复频率只需要 80 nJ 左右^[123]。

相邻脉冲发生热累积时,各向同性的热扩散特性保证了波导截面具有较好的对称性。而且,伴随热累积的快退火过程可以减少散射中心和微损伤的形成,从而可以减小传输损耗^[103],色心缺陷也能在热退火中减少^[126]。另外,高重复频率激光能保证更高的移动速度以及更平滑的折射率改变^[103,123]。

使用高重复频率激光的限制主要是其较低的脉冲能量(小于 1 μJ),因而在宽带隙、高损伤阈值材料中(如石英和磷酸盐玻璃等)难以获得高质量波导^[33]。另外,激光重复频率过高可能会带来新的负面效果,如热累积使激光作用区域尺寸增大,降低了激光加工的空间分辨率^[127]; Graf 等^[128]发现使用 10 MHz 高脉冲能量(大于 27 nJ)钛宝石振荡器在石英玻璃中将导致周期和移动速度几乎无关的“珍珠链”结构,这对于波导直写是不利的。

4.1.3 柱形棱镜对光束整形

Cerullo 等^[129,130]提出在聚焦物镜前加上柱形棱镜对从而获得椭圆高斯光束以改善波导截面对称性,图 13 为柱形棱镜对用于像差校正的装置^[129]。在横向直写时,为了获得截面对称的波导,应该减小 Z 方向的尺寸,增大 Y 方向的尺寸。在 X 方向使用紧聚焦使 XZ 平面光束发散角度增加,导致激光能量密度快速降至非

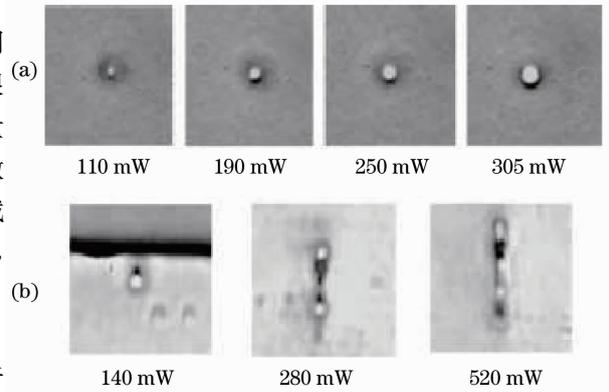


图 11 使用不同功率的 200 kHz 钛宝石激光器(a)横向和(b)纵向直写获得的波导截面^[27]

Fig. 11 Cross sections of waveguides written with (a) longitudinal and (b) transverse writing geometry using 200 kHz femtosecond pulses with different power^[27]

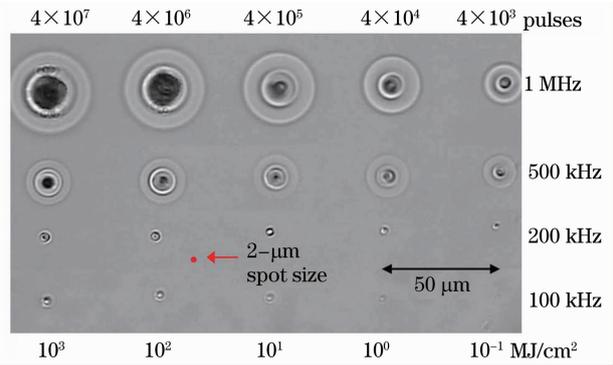


图 12 不同重复频率和脉冲数目的飞秒激光脉冲在硼硅酸盐玻璃中热影响区域的显微图像^[125]

Fig. 12 Optical microscopic images showing heat-affected zones created in borosilicate glass by femtosecond laser pulses with different repetition rates and exposure levels^[125]

线性作用阈值以下,使该方向的瑞利长度 Z_{Rx} 减小,从而波导沿 Z 方向的尺寸减小。而 Y 方向的尺寸可以使用一对柱形棱镜来控制,通过调节其中一个棱镜位置偏移使进入物镜的光束沿 Y 方向发散,则可以增加 Y 方向的尺寸。图 14 是使用柱形棱镜整形过的脉冲光束制备的波导,波导截面和传输模场都是对称的。

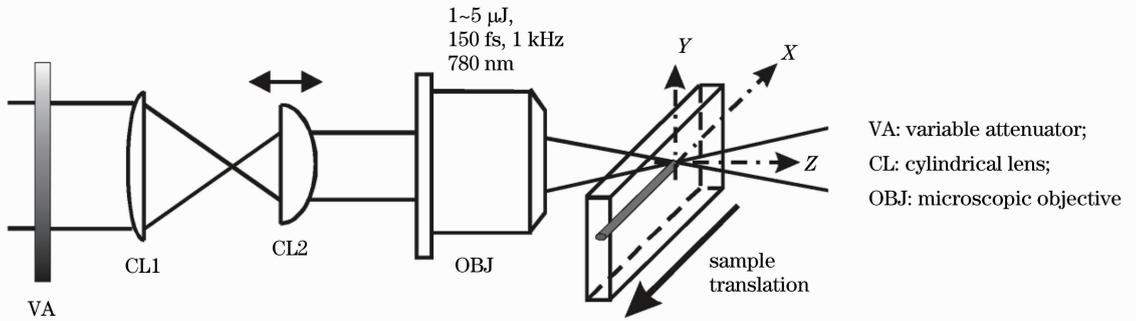


图 13 柱形棱镜对用于像差校正装置^[129]

Fig. 13 Setup for producing astigmatic focus with cylindrical-lens telescope^[129]

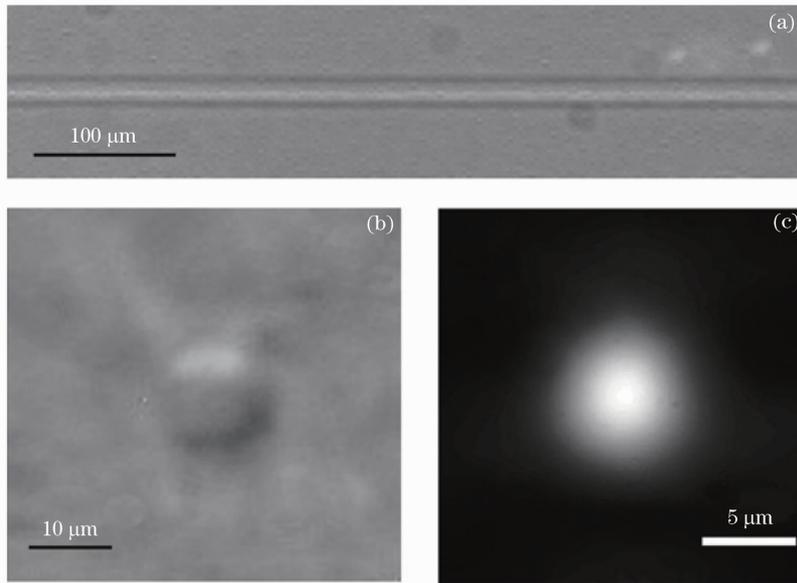


图 14 经过柱形棱镜整形后的激光在石英玻璃中直写的波导^[131]

Fig. 14 A waveguide written in silica glass by laser beam shaped with cylindrical-lens telescope^[131]

4.1.4 狭缝光束整形

Cheng 等^[132]提出使用矩形狭缝也可以获得和柱形棱镜相同的效果。如图 15(a)所示,狭缝被放置在物镜前方且长度方向和样品移动方向平行,入射光束由于衍射在狭缝宽度方向被展宽^[133],聚焦后的光斑是椭

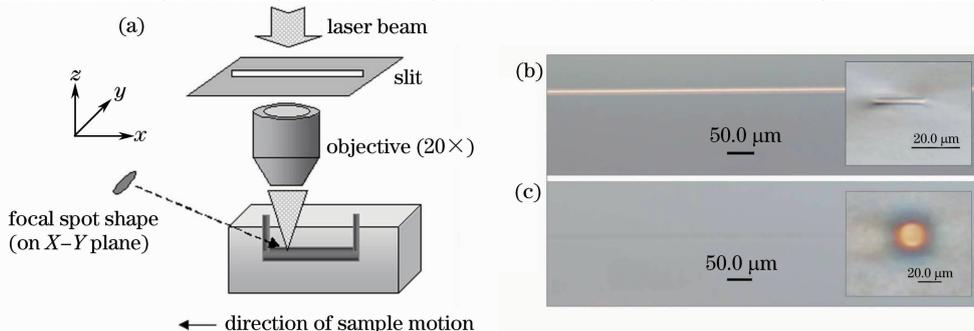


图 15 (a)狭缝光束整形装置^[132]; (b)未使用和(c)使用狭缝得到的横向直写波导^[99]

Fig. 15 (a) Slit beam shaping setup^[132]; transversely directly written waveguide (b) without and (c) with a slit^[99]

圆高斯型,和柱形棱镜对相似,形成的波导或微流通道截面对称性得到改善,如图 15(b)、(c)所示。从图 16 看出,通过调节狭缝宽度可以调节截面纵横比。另外,在直写波导时,狭缝和物镜距离也会对波导的损耗产生影响^[99]。

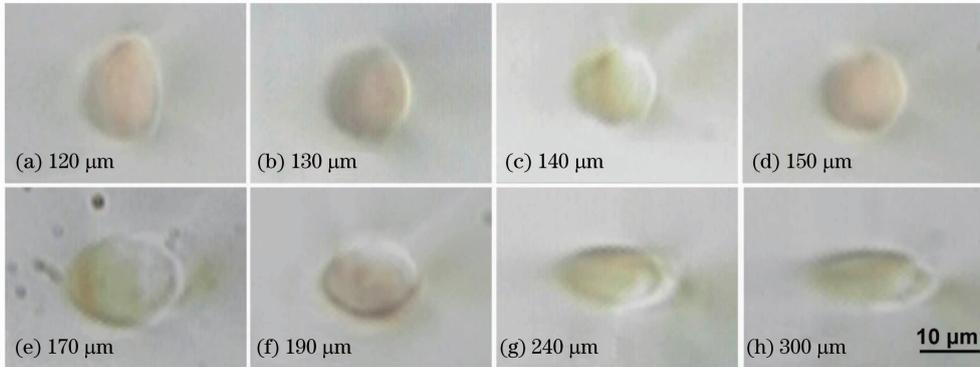


图 16 不同狭缝宽度获得的直写结构显微图,光束从左侧入射^[133]

Fig. 16 Typical optical microscopic images of the written profiles with different slit width. Beam enters from left^[133]

4.1.5 多次扫描方法

即使不考虑光束的非线性传播和球差的影响,聚焦光束的瑞利长度(共焦参数) b 和光束直径 $2\omega_0$ 的较大差异($b/2\omega_0 = 1/NA$)^[56]也会使单次扫描所得的波导截面呈现近椭圆的不对称结构。对于非油浸物镜($NA < 1$),所得光斑都是沿纵向拉长的。

为了得到纵向和横向尺寸相近的波导,Liu 等^[98]提出采用纵向平行多次扫描方法,每次扫描间隔很小(约 $1 \mu\text{m}$),利用多个相互交叠并列的单波导形成矩形截面波导。最终波导插入损耗、衍射损耗和传播损耗都大大减小,并且可以通过控制扫描速度和次数获得单模和多模波导。但是获得的波导折射率改变的纵向分布近似为高斯型,而横向分布却近似阶跃型。单次扫描和多次扫描得到的波导结构对比,如图 17 所示。

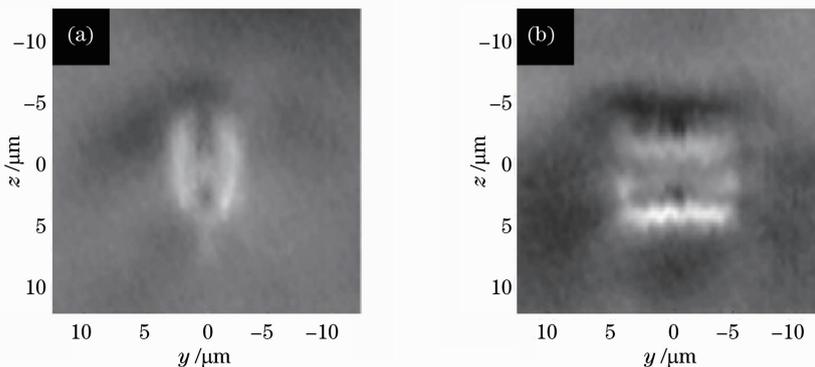


图 17 (a) 单次扫描波导; (b) 多次扫描波导^[134]

Fig. 17 (a) Cross section of single scan waveguide; (b) cross section of multi-scan waveguide^[134]

利用多次扫描方法,出现了低传输损耗(0.34 dB/cm)和低耦合损耗(0.1 dB/point)的波导连接器^[22]、具有内增益(1537 nm 处 1.7 dB)的低传输损耗(0.1 dB/cm)掺铟氟氧硅酸盐玻璃波导^[135]、波导放大器(1537 nm 处净增益 0.72 dB)^[136]和波导激光器以及高强度(大于 30 dB)硼硅酸盐玻璃一阶布拉格光栅^[109]。

多次扫描技术的优点在于控制波导截面形状的参数独立于控制折射率改变的参数,条件优化更加灵活;但是,由于是基于 I 型折射率修饰,所以难以在大多数晶体和陶瓷内部使用多次扫描的方法获得波导,而且激光作用区域通常会发生非线性和电光效应退化的现象,这对于制作波导功能器件是不利的。

最近出现了利用多次扫描获得晶体波导的报道,如周期性极化 LiNbO_3 晶体倍频波导(1567 nm 处倍频效率 $18\%/W$)^[69]和高衬比度硼酸盐晶体波导($3.39 \mu\text{m}$ 时 $\Delta n \approx 0.005$, $1.94 \mu\text{m}$ 时 $\Delta n \approx 0.01$)^[75],但是获得的波导只能传导垂直偏振光(TM 模),前者非线性性质良好但高温热稳定性差,后者高温热稳定性未知但电光性质退化,这种热稳定性和波导光学性质难以兼得的情况是 I 型波导面临的重要问题。

4.1.6 应力场方法

激光损伤区域由于折射率减小可以作为包层形成波导^[137],另外还可以进一步利用激光损伤周围区域的折射率增加对光场进行约束。Burghoff^[59]等首次利用双线结构在LiNbO₃晶体中产生波导,这种结构利用双线之间应力场导致的折射率增高区域作为芯层而激光损伤导致的折射率减小区域作为包层形成波导。图18(a)是在YAG晶体中制作的双线波导截面显微图像,明亮区域折射率较高,应力场使周围区域产生双折射。双线结构具有和多次扫描方法一样的参数优化灵活性,而且加工速度更快。由于激光作用区域和波导区域不重合,波导区域晶格未受显著损伤,形成的波导热稳定性好,在玻璃、陶瓷、晶体等材料中都可以实现,且材料的性质如掺杂离子的荧光谱^[138]、非线性系数^[38]等不会发生明显退化^[120]因而在功能波导和有源波导制备中得到广泛应用。

基于这种应力场一包层波导,出现了几种变形结构。Benayas等^[139]在双线波导结构的垂直方向再制作出两条损伤直线,如图18(b)所示,所形成的波导热稳定性及光约束能力提高,但由于增加了损伤结构,散射损耗会增加,而且这种结构在加工上困难得多。Lancaster等^[140]用多条纵向直写获得的直线作为包层围成圆形波导结构,如图18(c)所示;Beckmann等^[141]使用纵向直写方法获得任意截面形状的波导结构,如图18(d)所示。这两种方法有利于控制模场分布,但是三维加工能力欠缺。另外,由于使用应力场方法获得的波导对传输模式具有很强的约束能力,限制了波导间的倏逝波耦合,这对于很多波导器件是不利的。

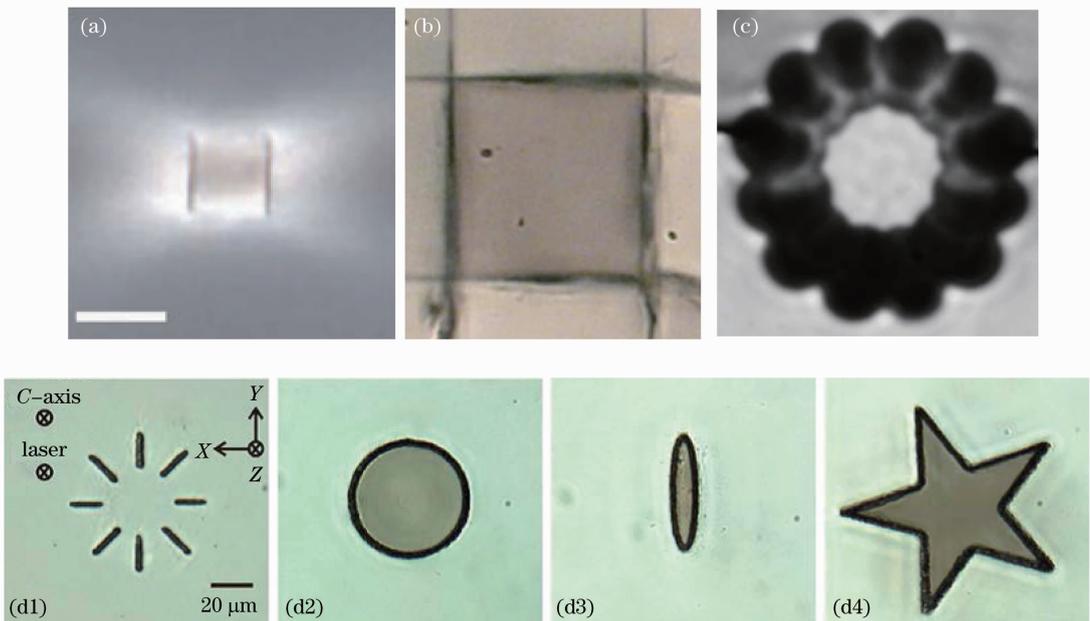


图18 (a)双线波导^[142]; (b)交叉成丝波导^[139]; (c)包层受抑波导^[140]; (d1)~(d4)任意包层形状波导^[141]

Fig. 18 (a) Double-line waveguide^[142]; (b) crossing filaments waveguide^[139]; (c) depressed cladding waveguide^[140]; (d1)~(d4) waveguides of arbitrary cladding geometry^[141]

4.1.7 空间光束调制

由于飞秒激光直写过程中形成的波导结构是随加工条件变化的,如球差随聚焦深度变化,而自适应光学是对光束能量的空间分布进行动态调整的有效办法,故目前已出现了很多利用空间光束调制器改变光束形状的报道。如Sanner等^[143]使用非像素光寻址液晶光阀作为可编程波前校正器件,波前传感器收集经过相位调制的光束作为反馈,计算机处理后驱动投影仪对光阀进行光寻址从而校正波前,图19为利用这种方法获得的特殊形状的聚焦光斑。Mauclair等^[144]用相似的方法校正纵向直写波导时的球差。Mermillod-Blondin等^[145]使用液晶脉冲整形装置对脉冲的时间包络进行自适应优化从而控制非线性相互作用过程。Thomson等^[146]采用二维可变形反射镜对脉冲空间分布进行调整。de la Cruz等^[147]用液晶空间光调制器获得像散光束,且通过改变调制器和物镜的距离可以改变弧矢焦点和子午焦点的能量配比,抑制其中一个就可以获得截面可控波导。

4.2 提高波导制备速度

实际的光波导系统含有大量的波导元件,为了达到合理的制作效率必须提高激光制备的速度,可以通过提高样品移动速度或者采用并行直写的方法来实现。

4.2.1 非交叠脉冲

在几乎所有波导制备的报道中,相邻脉冲都有交叠以产生低损耗高衬比度波导,这就要求样品移动的速度足够慢,尤其是在使用 1 kHz 低重复频率时(最快每秒几百微米)。但是 Zhang 等^[70]发现,当扫描速度很快以至于相邻脉冲所产生的结构不交叠时,也能得到低传输损耗波导,光波通过倏逝波耦合在非连续波导中传输。他们使用 1 kHz 飞秒激光在石英玻璃中产生的光斑直径为 $1\ \mu\text{m}$,当移动速度大于 1 mm/s 时产生的结构不重叠,但波导的损耗未显著增高(1 mm/s 时 0.2 dB/cm),如图 20 所示。

4.2.2 并行直写

并行直写的关键在于将入射激光束分成能量、状态相同的多束,目前已经出现了很多并行直写微结构的报道,如:计算全息衍射光学元件获得任意静态微聚焦图案^[148];液晶计算全息图获得任意、可变、平行光束^[149];液晶菲涅耳透镜获得任意、可变、平行、峰值均匀光束^[150];液晶二值相位掩模板^[151]和周期性矩形相位光栅^[152]获得两束间距可变光束,并制作出基于倏逝波耦合的三维分束器和耦合器;液晶计算全息图获得多束间距连续可变光束,并制作出三维连续 1×4 分束器^[153]。如图 21 所示,基于液晶的空间光调制器可被计算机寻址,所以能在直写过程中动态改变光束能量的空间分布,方便实现单次快速并行直写波导器件。

4.3 偏振选择

波导制备过程中激光的偏振态可能影响波导的性能。Ams 等^[154]分别用圆偏振和线偏振飞秒激光在石英玻璃中直写光波导,发现使用圆偏振光比使用线偏振光得到的波导损耗更低,衬比度更大,并将可能的原因归结为线偏振光诱导的周期性结构所致。对于铌酸锂晶体波导,圆偏振光效果也更好^[71,103]。然而,Cheng 等^[90]在石英晶体的纵向直写中发现线偏振光可以诱导波导,而圆偏振不可以,他们认为圆偏振造成的不规则结构造成的。Temnov 等^[30]用 $10\ \text{TW}/\text{cm}^2$ 飞秒激光作用在 6 光子吸收的石英玻璃和蓝宝石晶体时发现线偏振光比圆偏振光引起的折射率变化更大。Little 等^[155]发现当飞秒激光在石英玻璃中的低峰值辐照度时(小于 $38\ \text{TW}/\text{cm}^2$)线偏振光导致的折射率变化比圆偏振光大,而在高峰值辐照度时(大于 $42\ \text{TW}/\text{cm}^2$)情况则正好相反,并且圆偏振光比线偏振光诱导的折射率变化可以大一倍,他们认为这可能是由于不同条件下光电离率的差别。另外,偏振方向

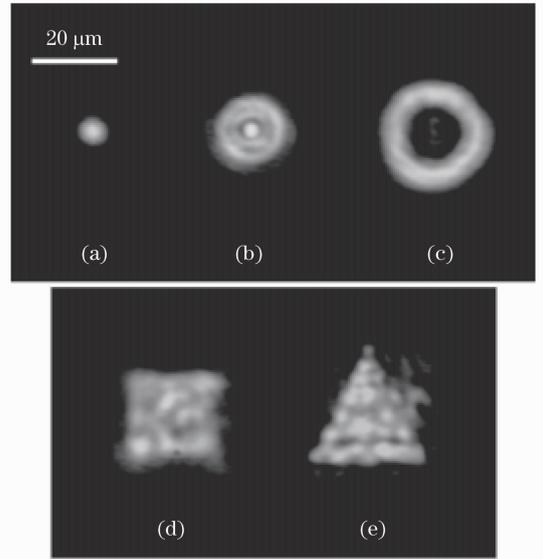


图 19 基于自适应空间光调制方法获得的聚焦光斑^[143]

Fig. 19 Focal-spot shaping based on adaptive spatial light modulation^[143]

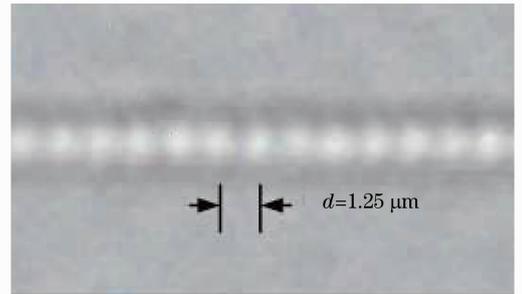


图 20 快速加工形成的脉冲非交叠低损耗波导^[70]

Fig. 20 A low-loss waveguide fast written with non-overlapping pulses^[70]

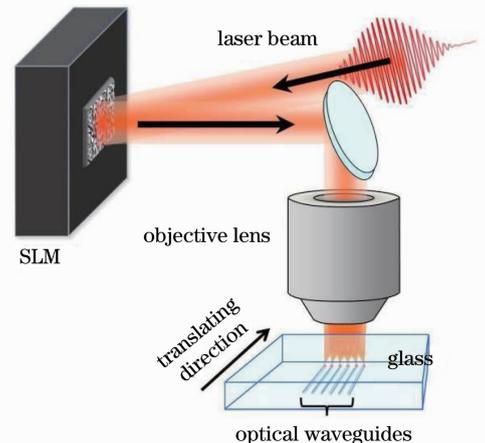


图 21 使用空间光调制器并行直写波导器件^[153]

Fig. 21 Parallel waveguide written using spatial light modulator^[153]

分别与波导平行和垂直的线偏振光在其他条件相同时,形成的波导也会有差异^[46,82,87]。

在 2.1 节中已经介绍了在多光子吸收占主导地位时,电离截面 σ_c 和 σ_i 相对大小对多光子吸收级数 N 的依赖关系。Little 等^[29]综合上述实验结果,提出在选择直写光的偏振态时,需要同时考虑多光子电离和隧穿电离的贡献。使用参数 $N' \langle (2E_g - U_p) / 2E_{\text{photon}} \rangle$ (其中 $\langle \rangle$ 表示向上取整) 代替 N , 则关于 2.1 节中偏振电离截面的判断准则依然近似成立。

一般情况下,窄带隙介质形成的波导对诱导激光的偏振是不敏感的,如硫系玻璃;而宽带隙介质,为了获得更高衬比度的波导,则要考虑偏振的选择,如石英玻璃、晶体等(相对 800 nm 激光而言)。

5 结束语

经过十多年的研究,飞秒激光已经被证明是制作无源光波导器件、有源光波导器件以及非线性功能光波导器件的有效工具。大量的理论和实验研究已经为该技术的实用化奠定了坚实的基础。

今后,针对波导材料、传输特性、集成度、制备速度等影响光波导实用化的研究仍需持续。具有特殊偏振、非线性、电光、增益等特性的功能波导器件正在丰富着飞秒激光加工波导的内容,为系统全激光加工提供可能,因而应该继续深化这方面的研究。此外,由于光波导是集成光学的基础元件,这也预示着飞秒激光制备波导器件的相互集成以及和其他微光学器件的集成将是下一步需要研究的课题。值得欣慰的是,已有大量研究证实了该技术实现的波导具有较好的兼容性。最后,通过飞秒激光制备的光波导器件与微通道、微流体器件、光子晶体等的结合同样可以引起新的研究热潮。

尽管利用飞秒激光加工波导器件技术还不够完善,但是,考虑到该技术所具有的明显优势和对其进行的深入持续研究,相信其在光通信、集成光学、生物化学等领域将有重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 M. Pollnau, C. Grivas, L. Laversenne *et al.*. Ti:sapphire waveguide lasers [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(8): 560~571
- 2 Ren Yitao, Huang Yin, Ding Xinren *et al.*. Core index measurement and calculation of the ultraviolet-written optical channel waveguides [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s108006
任一涛, 黄寅, 丁心仁等. 紫外写入条形光波导芯区折射率的测算[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s108006
- 3 Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013002
恽斌峰, 胡国华, 崔一平. 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1013002
- 4 Y. C. Yao, N. N. Dong, F. Chen *et al.*. Proton beam writing of Nd:GGG crystals as new waveguide laser sources [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(21): 4173~4175
- 5 Chen Fang, Liu Ruipeng, Qi Zhimei. Design, fabrication and characterization of LiNbO₃-based integrated optical waveguide Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0513001
陈方, 刘瑞鹏, 祁志美. 铌酸锂基集成光波导马赫-曾德尔干涉仪的设计、制备及其特性的初步测试[J]. 光学学报, 2010, **31**(5): 0513001
- 6 Xiang Wei, Zheng Weiwei, Jiang Shuhang *et al.*. Study of ion-exchanged glass-based multimode optical power splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100302
向微, 郑伟伟, 江舒杭等. 玻璃基离子交换型多模光功率分器研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(s1): s100302
- 7 M. Ams, G. D. Marshall, P. Dekker *et al.*. Ultrafast laser written active devices [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2009, **3**(6): 535~544
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 S. Nolte, M. Will, J. Burghoff *et al.*. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated

- optics [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**(1): 109~111
- 12 W. Watanabe, T. Asano, K. Yamada *et al.*. Wavelength division with three-dimensional couplers fabricated by filamentation of femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24): 2491~2493
- 13 L. Gui, B. X. Xu, T. C. Chong. Microstructure in lithium niobate by use of focused femtosecond laser pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1337~1339
- 14 S. Sowa, W. Watanabe, T. Tamaki *et al.*. Symmetric waveguides in poly (methyl methacrylate) fabricated by femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 291~297
- 15 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
- 16 K. Minoshima, A. M. Kowalevich, I. Hartl *et al.*. Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials processing with a femtosecond laser oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(19): 1516~1518
- 17 W. J. Chen, S. M. Eaton, H. B. Zhang *et al.*. Broadband directional couplers fabricated in bulk glass with high repetition rate femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11470~11480
- 18 C. Florea, K. A. Winick. Fabrication and characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 246~253
- 19 G. D. Marshall, P. Dekker, M. Ams *et al.*. Directly written monolithic waveguide laser incorporating a distributed feedback waveguide-Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 956~958
- 20 M. Ams, P. Dekker, G. D. Marshall *et al.*. Monolithic 100 mW Yb waveguide laser fabricated using the femtosecond-laser direct-write technique [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 247~249
- 21 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
- 22 Y. Nasu, M. Kohtoku, Y. Hibino *et al.*. Waveguide interconnection in silica-based planar lightwave circuit using femtosecond laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(18): 4033~4039
- 23 A. M. Kowalevich, V. Sharma, E. P. Ippen *et al.*. Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 1060~1062
- 24 A. Benayas, W. F. Silva, A. Rodenas *et al.*. Ultrafast laser writing of optical waveguides in ceramic Yb:YAG; a study of thermal and non-thermal regimes [J]. *Appl. Phys. A*, 2011, **104**(1): 301~309
- 25 D. M. Rayner, A. Naumov, P. B. Corkum. Ultrashort pulse non-linear optical absorption in transparent media [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(9): 3208~3217
- 26 S. S. Mao, F. Quere, S. Guizard *et al.*. Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **79**(7): 1695~1709
- 27 J. R. Qiu. Femtosecond laser-induced microstructures in glasses and applications in micro-optics [J]. *Chem. Rec.*, 2004, **4**(1): 50~58
- 28 M. Ams, G. D. Marshall, P. Dekker *et al.*. Investigation of ultrafast laser-photonic material interactions; challenges for directly written glass photonics [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(5): 1370~1381
- 29 D. J. Little, M. Ams, M. J. Withford. Influence of bandgap and polarization on photoionization; guidelines for ultrafast laser inscription [J]. *Opt. Mater. Express*, 2011, **1**(4): 670~677
- 30 V. V. Temnov, K. Sokolowski-Tinten, P. Zhou *et al.*. Multiphoton ionization in dielectrics; comparison of circular and linear polarization [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(23): 237403
- 31 M. Lenzner, J. Kruger, S. Sartania *et al.*. Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(18): 4076~4079
- 32 C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(11): 1784~1794
- 33 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
- 34 B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman *et al.*. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **53**(4): 1749~1761
- 35 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
- 36 A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco *et al.*. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(12): 125435

- 37 R. R. Thomson, S. Campbell, I. J. Blewett *et al.*. Optical waveguide fabrication in z -cut lithium niobate (LiNbO_3) using femtosecond pulses in the low repetition rate regime [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(11): 111109
- 38 C. H. Tu, Z. C. Huang, S. G. Zhang *et al.*. Second harmonic generation by femtosecond Yb-doped fiber laser source based on PPKTP waveguide fabricated by femtosecond laser direct writing [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(1): 455~459
- 39 Zhang Ling, Miao Fei, Feng Dejun *et al.*. Exposure experiment study of fiber Bragg grating by femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505006
张玲, 苗飞, 冯德军等. 飞秒激光对光纤布拉格光栅的曝光实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0505006
- 40 K. Miura, J. R. Qiu, H. Inouye *et al.*. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(23): 3329~3331
- 41 K. Hirao, K. Miura. Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1998, **239**(1-3): 91~95
- 42 J. W. Chan, H. 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
- 43 C. W. Ponader, J. F. Schroeder, A. M. Streltsov. Origin of the refractive-index increase in laser-written waveguides in glasses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(6): 063516
- 44 O. M. Efimov, L. B. Glebov, K. A. Richardson *et al.*. Waveguide writing in chalcogenide glasses by a train of femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Mater.*, 2001, **17**(3): 379~386
- 45 L. B. Fletcher, J. J. Witcher, W. B. Reichman *et al.*. Changes to the network structure of Er-Yb doped phosphate glass induced by femtosecond laser pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(8): 083107
- 46 Y. Bellouard, E. Barthel, A. A. Said *et al.*. Scanning thermal microscopy and Raman analysis of bulk fused silica exposed to low-energy femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19520~19534
- 47 U. Haken, O. Humbach, S. Ortner *et al.*. Refractive index of silica glass; influence of fictive temperature [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2000, **265**(1-2): 9~18
- 48 T. M. Gross, M. Tomozawa. Fictive temperature of GeO_2 glass; its determination by IR method and its effects on density and refractive index [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2007, **353**(52-54): 4762~4766
- 49 L. Bressel, D. de Ligny, C. Sonnevile *et al.*. Femtosecond laser induced density changes in GeO_2 and SiO_2 glasses; fictive temperature effect [J]. *Opt. Mater. Express*, 2011, **1**(4): 605~613
- 50 W. Reichman, C. A. Click, D. M. Krol. Femtosecond laser writing of waveguide structures in sodium calcium silicate glasses [C]. *SPIE*, 2005, **5714**: 238~244
- 51 G. Petite, S. Guizard, P. Martin *et al.*. Comment on "Ultrafast electron dynamics in femtosecond optical breakdown of dielectrics" [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(24): 5182~5182
- 52 B. Poumellec, M. Lancry, A. Chahid-Erraji *et al.*. Modification thresholds in femtosecond laser processing of pure silica: review of dependencies on laser parameters [J]. *Opt. Mater. Express*, 2011, **1**(4): 766~782
- 53 T. Kurobori, K. Kawamura, M. Hirano *et al.*. Simultaneous fabrication of laser-active colour centres and permanent microgratings in lithium fluoride by a single femtosecond pulse [J]. *J. Phys. Condens. Mat.*, 2003, **15**(25): L399~L405
- 54 S. L. Baldochi, L. C. Courrol, R. E. Samad *et al.*. Fluoride crystals growth and color center production by high intensity ultra short laser pulses [J]. *Phys. Stat. Sol. C*, 2007, **4**(3): 1060~1065
- 55 J. B. Lonzaga, S. M. Avanesyan, S. C. Langford *et al.*. Color center formation in soda-lime glass with femtosecond laser pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(7): 4332~4340
- 56 M. Will, S. Nolte, B. N. Chichkov *et al.*. Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(21): 4360~4364
- 57 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
- 58 P. Dekker, M. Ams, G. D. Marshall *et al.*. Annealing dynamics of waveguide Bragg gratings: evidence of femtosecond laser induced colour centres [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3274~3283
- 59 J. Burghoff, C. Grebing, S. Nolte *et al.*. Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(8): 081108
- 60 J. Burghoff, H. Hartung, S. Nolte *et al.*. Structural properties of femtosecond laser-induced modifications in LiNbO_3 [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **86**(2): 165~170
- 61 J. Burghoff, S. Nolte, A. Tuennermann. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO_3 [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **89**(1): 127~132

- 62 F. F. Luo, B. Qian, G. Lin *et al.*. Redistribution of elements in glass induced by a high-repetition-rate femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 6262~6269
- 63 Y. Liu, M. Shimizu, B. Zhu *et al.*. Micromodification of element distribution in glass using femtosecond laser irradiation [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 136~138
- 64 Y. Liu, B. Zhu, L. Wang *et al.*. Femtosecond laser induced coordination transformation and migration of ions in sodium borate glasses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(12): 121113
- 65 S. Kanehira, K. Miura, K. Hirao. Ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(2): 023112
- 66 M. Sakakura, M. Shimizu, Y. Shimotsuma *et al.*. Temperature distribution and modification mechanism inside glass with heat accumulation during 250 kHz irradiation of femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(23): 231112
- 67 M. Shimizu, M. Sakakura, S. Kanehira *et al.*. Formation mechanism of element distribution in glass under femtosecond laser irradiation [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(11): 2161~2163
- 68 T. Gorelik, M. Will, S. Nolte *et al.*. Transmission electron microscopy studies of femtosecond laser induced modifications in quartz [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **76**(3): 309~311
- 69 R. Osellame, M. Lobino, N. Chiodo *et al.*. Femtosecond laser writing of waveguides in periodically poled lithium niobate preserving the nonlinear coefficient [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(24): 241107
- 70 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
- 71 A. H. Nejadmalayeri, P. R. Herman. Ultrafast laser waveguide writing: lithium niobate and the role of circular polarization and picosecond pulse width [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 2987~2989
- 72 E. Ramsay, R. R. Thomson, N. D. Psaila *et al.*. Laser action from an ultrafast laser inscribed Nd-doped silicate glass waveguide [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(11): 742~744
- 73 H. T. Bookey, R. R. Thomson, N. D. Psaila *et al.*. Femtosecond laser inscription of low insertion loss waveguides in Z-cut lithium niobate [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(9-12): 892~894
- 74 J. R. Macdonald, R. R. Thomson, S. J. Beecher *et al.*. Ultrafast laser inscription of near-infrared waveguides in polycrystalline ZnSe [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(23): 4036~4038
- 75 A. Rodenas, A. K. Kar. High-contrast step-index waveguides in borate nonlinear laser crystals by 3D laser writing [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(18): 17820~17833
- 76 J. W. Chan, T. R. Huser, S. H. Risbud *et al.*. Waveguide fabrication in phosphate glasses using femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(15): 2371~2373
- 77 R. Osellame, N. Chiodo, V. Maselli *et al.*. Optical properties of waveguides written by a 26 MHz stretched cavity Ti:sapphire femtosecond oscillator [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(2): 612~620
- 78 R. Stoian, G. Cheng, C. Mauclair *et al.*. 3D adaptive spatio-temporal control of laser-induced refractive index changes in optical glasses [J]. *SPIE*, 2011, **7921**: 79210H
- 79 J. A. Dharmadhikari, A. K. Dharmadhikari, A. Bhatnagar *et al.*. Writing low-loss waveguides in borosilicate (BK7) glass with a low-repetition-rate femtosecond laser [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(2): 630~634
- 80 S. Juodkazis, K. Nishimura, S. Tanaka *et al.*. Laser-induced microexplosion confined in the bulk of a sapphire crystal: evidence of multimegabar pressures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(16): 166101
- 81 A. Mermillod-Blondin, J. Bonse, A. Rosenfeld *et al.*. Dynamics of femtosecond laser induced voidlike structures in fused silica [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(4): 041911
- 82 K. Mishchik, G. Cheng, G. Huo *et al.*. Nanosize structural modifications with polarization functions in ultrafast laser irradiated bulk fused silica [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(24): 24809~24824
- 83 F. M. Bain, W. F. Silva, A. A. Lagatsky *et al.*. Microspectroscopy of ultrafast laser inscribed channel waveguides in Yb:tungstate crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(14): 141108
- 84 B. McMillen, K. P. Chen, H. L. An *et al.*. Waveguiding and nonlinear optical properties of three-dimensional waveguides in LiTaO₃ written by high-repetition rate ultrafast laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(11): 111106
- 85 V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. P. Rajeev *et al.*. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(5): 057404
- 86 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
- 87 Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. R. Qiu *et al.*. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light

- pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(24): 247405
- 88 C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova *et al.*. Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching [J]. *Appl. Phys. A*, 2006, **84**(1-2): 47~61
- 89 P. G. Kazansky, H. Inouye, T. Mitsuyu *et al.*. Anomalous anisotropic light scattering in Ge-doped silica glass [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(10): 2199~2202
- 90 G. Cheng, K. Mishchik, C. Maclair *et al.*. Ultrafast laser photoinscription of polarization sensitive devices in bulk silica glass [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9515~9525
- 91 L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman *et al.*. Femtosecond laser fabrication of birefringent directional couplers as polarization beam splitters in fused silica [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 11992~11999
- 92 R. Osellame, N. Chiodo, G. Della Valle *et al.*. Waveguide lasers in the C-band fabricated by laser inscription with a compact femtosecond oscillator [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2): 277~285
- 93 N. Huot, R. Stoian, A. Mermillod-Blondin *et al.*. Analysis of the effects of spherical aberration on ultrafast laser-induced refractive index variation in glass [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19): 12395~12408
- 94 A. Marcinkevicius, V. Mizeikis, S. Juodkazis *et al.*. Effect of refractive index-mismatch on laser microfabrication in silica glass [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **76**(2): 257~260
- 95 A. Couairon, A. Mysyrowicz. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Phys. Rep.*, 2007, **441**(2-4): 47~189
- 96 R. R. Gattass, E. Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(4): 219~225
- 97 W. J. Yang, P. G. Kazansky, Y. P. Svirko. Non-reciprocal ultrafast laser writing [J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(2): 99~104
- 98 J. R. Liu, Z. Y. Zhang, C. Flueraru *et al.*. Waveguide shaping and writing in fused silica using a femtosecond laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(1): 169~173
- 99 M. Ams, G. D. Marshall, D. J. Spence *et al.*. Slit beam shaping method for femtosecond laser direct-write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(15): 5676~5681
- 100 L. M. Tong, R. R. Gattass, I. Maxwell *et al.*. Optical loss measurements in femtosecond laser written waveguides in glass [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 626~630
- 101 S. M. Eaton, M. L. Ng, J. Bonse *et al.*. Low-loss waveguides fabricated in BK7 glass by high repetition rate femtosecond fiber laser [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(12): 2098~2102
- 102 T. Allsop, M. Dubov, V. Mezentsev *et al.*. Inscription and characterization of waveguides written into borosilicate glass by a high-repetition-rate femtosecond laser at 800 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(10): 1938~1950
- 103 A. H. Nejadmalayeri, P. R. Herman. Rapid thermal annealing in high repetition rate ultrafast laser waveguide writing in lithium niobate [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17): 10842~10854
- 104 C. R. Mendonca, L. R. Cerami, T. Shih *et al.*. Femtosecond laser waveguide micromachining of PMMA films with azoaromatic chromophores [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 200~206
- 105 G. A. Torchia, P. F. Meilan, A. Rodenas *et al.*. Femtosecond laser written surface waveguides fabricated in Nd:YAG ceramics [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13266~13271
- 106 A. Rodenas, G. A. Torchia, G. Lifante *et al.*. Refractive index change mechanisms in femtosecond laser written ceramic Nd:YAG waveguides: micro-spectroscopy experiments and beam propagation calculations [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(1): 85~96
- 107 G. Y. Li, K. A. Winick, A. A. Said *et al.*. Waveguide electro-optic modulator in fused silica fabricated by femtosecond laser direct writing and thermal poling [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 739~741
- 108 H. B. Zhang, S. M. Eaton, P. R. Herman. Single-step writing of Bragg grating waveguides in fused silica with an externally modulated femtosecond fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2559~2561
- 109 G. Brown, R. R. Thomson, A. K. Kar *et al.*. Ultrafast laser inscription of Bragg-grating waveguides using the multiscan technique [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 491~493
- 110 H. B. Zhang, S. M. Eaton, J. Z. Li *et al.*. Type II high-strength Bragg grating waveguides photowritten with ultrashort laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 4182~4191
- 111 A. J. Lee, A. Rahmani, J. M. Dawes *et al.*. Point-by-point inscription of narrow-band gratings in polymer ridge waveguides [J]. *Appl. Phys. A*, 2008, **90**(2): 273~276
- 112 N. Jovanovic, J. Thomas, R. J. Williams *et al.*. Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings

- enable simple, linearly polarized fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6082~6095
- 113 G. D. Marshall, A. Politi, J. C. F. Matthews *et al.*. Laser written waveguide photonic quantum circuits [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12546~12554
- 114 L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman *et al.*. Femtosecond laser writing of waveguide retarders in fused silica for polarization control in optical circuits [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18294~18301
- 115 Y. Sikorski, A. A. Said, P. Bado *et al.*. Optical waveguide amplifier in Nd-doped glass written with near-IR femtosecond laser pulses [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(3): 226~227
- 116 R. Osellame, N. Chiodo, G. Della Valle *et al.*. Optical waveguide writing with a diode-pumped femtosecond oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1900~1902
- 117 R. R. Thomson, N. D. Psaila, S. J. Beecher *et al.*. Ultrafast laser inscription of a high-gain Er-doped bismuthate glass waveguide amplifier [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 13212~13219
- 118 J. Choi, M. Bellec, A. Royon *et al.*. Three-dimensional direct femtosecond laser writing of second-order nonlinearities in glass [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(6): 1029~1031
- 119 J. Siebenmorgen, T. Calmano, K. Petermann *et al.*. Highly efficient Yb:YAG channel waveguide laser written with a femtosecond-laser [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16035~16041
- 120 Y. Tan, F. Chen, J. R. V. de Aldana *et al.*. Continuous wave laser generation at 1064 nm in femtosecond laser inscribed Nd:YVO₄ channel waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(3): 031119
- 121 N. Huot, N. Sanner, E. Audouard. Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses and their application to micromachining [C]. *SPIE*, 2006, **6400**: 6400K
- 122 Z. Wang, K. Sugioka, Y. Hanada *et al.*. Optical waveguide fabrication and integration with a micro-mirror inside photosensitive glass by femtosecond laser direct writing [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **88**(4): 699~704
- 123 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
- 124 M. Shimizu, M. Sakakura, M. Ohnishi *et al.*. Mechanism of heat-modification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(7): 073533
- 125 S. M. Eaton, H. B. Zhang, P. R. Herman. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4708~4716
- 126 W. J. Reichman, D. M. Krol, L. Shah *et al.*. A spectroscopic comparison of femtosecond-laser-modified fused silica using kilohertz and megahertz laser systems [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(12): 123112
- 127 D. J. Little, M. Ams, S. Gross *et al.*. Structural changes in BK7 glass upon exposure to femtosecond laser pulses [J]. *J. Raman Spectrosc.*, 2011, **42**(4): 715~718
- 128 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
- 129 G. Cerullo, R. Osellame, S. Taccheo *et al.*. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 μm by astigmatic beam focusing [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21): 1938~1940
- 130 R. Osellame, S. Taccheo, M. Marangoni *et al.*. Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(7): 1559~1567
- 131 R. M. Vazquez, R. Osellame, D. Noll *et al.*. Integration of femtosecond laser written optical waveguides in a lab-on-chip [J]. *Lab. Chip.*, 2009, **9**(1): 91~96
- 132 Y. Cheng, K. Sugioka, K. Midorikawa *et al.*. Control of the cross-sectional shape of a hollow microchannel embedded in photostructurable glass by use of a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(1): 55~57
- 133 K. J. Moh, Y. Y. Tan, X. C. Yuan *et al.*. Influence of diffraction by a rectangular aperture on the aspect ratio of femtosecond direct-write waveguides [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7288~7297
- 134 N. D. Psaila, R. R. Thomson, H. T. Bookey *et al.*. Femtosecond laser inscription of optical waveguides in bismuth ion doped glass [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10452~10459
- 135 R. R. Thomson, H. T. Bookey, N. Psaila *et al.*. Internal gain from an erbium-doped oxyfluoride-silicate glass waveguide fabricated using femtosecond waveguide inscription [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13-16): 1515~1517
- 136 N. D. Psaila, R. R. Thomson, H. T. Bookey *et al.*. Er:Yb-doped oxyfluoride silicate glass waveguide amplifier fabricated using femtosecond laser inscription [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(13): 131102
- 137 A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov, I. Khrushchev *et al.*. Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG:Nd³⁺ crystal by femtosecond laser writing [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2248~2250

- 138 C. Zhang, N. 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
- 139 A. Benayas, W. F. Silva, C. Jacinto *et al.*. Thermally resistant waveguides fabricated in Nd:YAG ceramics by crossing femtosecond damage filaments [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 330~332
- 140 D. G. Lancaster, S. Gross, H. Ebendorff-Heidepriem *et al.*. Fifty percent internal slope efficiency femtosecond direct-written Tm³⁺:ZBLAN waveguide laser [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1587~1589
- 141 D. Beckmann, D. Schnitzler, D. Schaefer *et al.*. Beam shaping of laser diode radiation by waveguides with arbitrary cladding geometry written with fs-laser radiation [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(25): 25418~25425
- 142 T. Calmano, A. G. Paschke, J. Siebenmorgen *et al.*. Characterization of an Yb:YAG ceramic waveguide laser, fabricated by the direct femtosecond-laser writing technique [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **103**(1): 1~4
- 143 N. Sanner, N. Huot, E. Audouard *et al.*. Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1479~1481
- 144 C. Maclair, A. Mermillod-Blondin, N. Huot *et al.*. Ultrafast laser writing of homogeneous longitudinal waveguides in glasses using dynamic wavefront correction [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5481~5492
- 145 A. Mermillod-Blondin, C. Maclair, A. Rosenfeld *et al.*. Size correction in ultrafast laser processing of fused silica by temporal pulse shaping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(2): 021921
- 146 R. R. Thomson, A. S. Bockelt, E. Ramsay *et al.*. Shaping ultrafast laser inscribed optical waveguides using a deformable mirror [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12786~12793
- 147 A. R. de la Cruz, A. Ferrer, W. Gawelda *et al.*. Independent control of beam astigmatism and ellipticity using a SLM for fs-laser waveguide writing [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(23): 20853~20859
- 148 Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita *et al.*. Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9): 1908~1915
- 149 Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita *et al.*. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(3): 031101
- 150 S. Hasegawa, Y. Hayasaki, N. Nishida. Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1705~1707
- 151 C. Maclair, G. Cheng, N. Huot *et al.*. Dynamic ultrafast laser spatial tailoring for parallel micromachining of photonic devices in transparent materials [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3531~3542
- 152 M. Pospiech, M. Emons, B. Vaeckenstedt *et al.*. Single-sweep laser writing of 3D-waveguide devices [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 6994~7001
- 153 M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma *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
- 154 M. Ams, G. D. Marshall, M. J. Withford. Study of the influence of femtosecond laser polarisation on direct writing of waveguides [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26): 13158~13163
- 155 D. J. Little, M. Ams, P. Dekker *et al.*. Femtosecond laser modification of fused silica: the effect of writing polarization on Si-O ring structure [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 20029~20037