

# 飞秒激光直写介电晶体光波导的研究进展

贾曰辰 陈峰

山东大学物理学院, 山东 济南 250100

**摘要** 介电晶体光波导结合了波导紧凑型的结构和介电晶体的诸多优异性质,在集成光子学中具有广泛的应用。飞秒激光直写是一种有效的三维微纳精细加工技术,可以在多种透明光学材料中实现基于波导结构的微小型光子学器件的制备。综述了利用飞秒激光直写晶体/陶瓷材料光波导的制备、表征以及应用,并展望了飞秒激光写入晶体光波导研究的未来发展方向。

**关键词** 集成光学;光波导;飞秒激光直写;介电晶体;波导激光;倍频

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.010001

## Advances in Dielectric Crystal Waveguides Produced by Direct Femtosecond Laser Writing

Jia Yuechen Chen Feng

*School of Physics, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China*

**Abstract** Dielectric crystalline waveguides, with the combination of compact geometry of waveguides and astonishing properties of crystals, have developed as one of the unique platforms for versatile miniature and integrated photonic applications. Femtosecond-laser direct writing is one of the most efficient techniques for three-dimensional microfabrication of miniature photonic devices based on waveguiding structures in transparent optical materials. Focused on crystalline dielectric materials, the state-of-the-art in the fabrication, characterization and applications of femtosecond laser micromachined waveguiding structures in optical crystals and ceramics is reviewed. A brief outlook is presented by focusing on a few potential spotlights.

**Key words** integrated optics; waveguides; femtosecond laser writing; dielectric crystals; waveguide laser; frequency doubling

**OCIS codes** 230.7370; 350.3390; 130.3120

### 1 引言

光波导是集成光子学系统的基本元件,它能够把光波限制在微米量级的微小体积内,从而可以得到很高的腔内光密度<sup>[1]</sup>。而建立在不同性质光学材料基础上的波导结构可以用作实现不同功能的光子学器件,如波导定向耦合器、调制器、光开关、光放大器、波导激光器、频率转换器等<sup>[2]</sup>。由于波导结构的尺寸非常小,理论上,不仅多个波导结构之间可以较好地“对接”,相互匹配,而且波导也易于实现与集成光学、光通信中其他元件(如光纤等)的相互结合,共同组成具有复杂功能的“集成光子芯片”,在较小尺寸上实现多种多样的应用<sup>[3]</sup>。另一方面,与体材料相比,由于波导结构中的光密度较大,许多体材料原有的光学性质(如非线性性质、激光性质等)在波导结构中都能够得到一定的加强,大大拓展了光波导在微小型集成光子学系统中的应用<sup>[3]</sup>。另外,最近的研究表明,波导结构可以作为“集成量子光子学”元件,是实现有效的量子计算、量子存储的重要载体<sup>[4]</sup>;或作为光流变的“Lab-on-a-chip”微型芯片,完成多样化的功能<sup>[5]</sup>。因此,对于光波导的研究具有重要的应用价值和广泛的应用背景,一直是集成光学、光电子学和现代光通信领域的一个研究热点。

收稿日期: 2015-08-28; 收到修改稿日期: 2015-09-13; 网络出版日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(11274203)

作者简介: 贾曰辰(1988—),男,博士研究生,主要从事介电晶体光波导、波导激光以及非线性光学方面的研究。

E-mail: jiyuechen0521@163.com

导师简介: 陈峰(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事介电晶体光波导、激光与物质相互作用、离子束材料改性等方面的研究。E-mail: drfchen@sdu.edu.cn (通信联系人)

飞秒激光直写技术是最近十几年发展起来的一种光波导制备技术,它采用聚焦的飞秒激光脉冲扫描衬底材料,诱导衬底材料中局部区域的折射率发生变化,形成波导结构<sup>[6-7]</sup>。由于飞秒激光脉冲具有极高的峰值功率(约 $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>),在辐照作用区域会发生非线性的多光子吸收过程,从而可以对材料实现微米、亚微米甚至纳米尺度的局域改性<sup>[7]</sup>。另外,飞秒激光脉冲诱导材料产生光损伤的阈值对于材料本身的带隙能量(bandgap energy)依赖性较小,这就使得飞秒激光微加工技术可以适用于绝大多数光学材料,具有独特的优势,因而自1994年以来迅速发展成为一种相对成熟的微加工方法,在科学研究、生产生活的各个领域发挥着重要的作用<sup>[6-11]</sup>。需要特别提到的是,1996年Davis等<sup>[12]</sup>利用聚焦的飞秒激光脉冲诱导几种玻璃特定区域的折射率增加,形成了光波导器件。这是最早的关于飞秒激光直写技术制备光学材料光波导的研究工作。此后,随着飞秒激光直写技术的日臻成熟,人们在玻璃、透明陶瓷、有机材料、光学晶体等许多透明介质中成功制备了光波导结构,并在其中某些介质中实现了光波导初步的应用<sup>[6,12-18]</sup>。

国内外目前对于飞秒激光写入光波导的研究较多集中在光学玻璃上。自1996年以来,国内外的研究者已经在熔融石英、硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、锆酸盐玻璃、硫化物玻璃、碲化物玻璃等中用多种条件的飞秒脉冲成功制备了光波导结构,并实现了定向分支耦合器、Bragg光栅、波导放大器、激光器等多种应用<sup>[19-24]</sup>。与玻璃光波导研究近些年的较快发展不同,飞秒激光直写光学晶体光波导的研究工作开展得较晚,早期只有非常有限种类的晶体材料得到了研究。最早的飞秒激光写入晶体光波导是由Apostolopoulos等<sup>[25]</sup>于2004年报道的钛宝石(Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)晶体光波导,此后相对比较成功的晶体材料是光学研究领域中最广泛应用的铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体<sup>[26]</sup>和钕铝石榴石(YAG:Nd:YAG等)<sup>[17,27]</sup>。此外,对于周期极化非线性晶体(如PPKTP、PPLN等),国内外的研究者也得到了很好的结果<sup>[28-29]</sup>。自2010年开始,国际上的多个研究组把研究重心放在更多的晶体材料上,取得了一些非常有价值的研究结果。例如,英国赫瑞-瓦特大学的Kar课题组成功制备了KGW、BiBO等晶体光波导<sup>[30-31]</sup>,德国汉堡大学的Huber课题组实现了Pr:SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>晶体光波导<sup>[32]</sup>,在国内,山东大学的陈峰课题组自2009年以来,利用国内介电光学晶体生长与开发的优势,在飞秒激光直写光学晶体光波导的研究取得了许多进展。例如,首次报道了飞秒写入钒酸盐激光晶体(如Nd:YVO<sub>4</sub><sup>[33]</sup>和Nd:GdVO<sub>4</sub><sup>[34]</sup>)光波导的制备,并实现了高效率的波导激光输出(其中,Nd:GdVO<sub>4</sub>波导激光的斜效率高达70%,接近量子缺陷极限76%,是国际上现有报道的Nd波导激光的最大值);制备了如Nd:YVO<sub>4</sub>+KTP混合波导系统<sup>[35]</sup>,可以利用激光晶体和非线性晶体的各自特性,直接实现基于波导结构的绿光输出;在国际上首次报道了Nd:GGG波导的制备与波导激光产生<sup>[36]</sup>和Nd:YAB晶体光波导的自倍频激光输出<sup>[37]</sup>。近几年来,国内外在飞秒激光直写波导方法、波导类型、适用的晶体材料种类以及应用探索方面都取得了一些重要进展,相关的研究内容相当丰富。国际上已有多篇关于飞秒激光直写晶体波导的述评论文发表<sup>[38-40]</sup>。本文拟以简明扼要的方式,介绍该研究领域的基本研究方法和最新研究进展,并对未来有前途的研究方向进行展望。

## 2 基本方法与波导模式类型

### 2.1 飞秒激光诱导的折射率变化

由于在飞秒激光直写过程中激光与衬底材料的相互作用时间极短,飞秒激光在微小区域内对材料进行局部改性时,热效应的影响可以忽略不计。基于这个独特的优点,飞秒激光微加工技术在激光精密加工领域得到了广泛的关注和应用。在加工过程中,聚焦的飞秒激光脉冲通过多光子吸收、隧穿电离和雪崩电离等一系列的非线性过程在极短的时间内将辐照区的材料变成等离子体,等离子体进一步吸收激光能量导致光损伤,从而诱导衬底材料局部区域的折射率发生改变,而这也就是飞秒激光直写光波导形成的核心条件<sup>[6]</sup>。需要指出的是,利用不同条件的飞秒激光直写既可以在激光焦点辐照区引起折射率升高,也可以造成焦点辐照区折射率降低,同时辐照区周围折射率升高<sup>[18]</sup>,这是由材料本身的性质以及应用的飞秒激光参数(包括激光的波长、能量、脉冲宽度、重复频率、偏振以及扫描速率等)两者共同决定的<sup>[39]</sup>。由于介电晶体种类繁多,晶格结构各异,彻底地理解飞秒激光对每种晶格的作用具有很大的困难。一般来说,当飞秒激光辐照能量较低时,会在辐照区域造成具有局部微小折射率变化的“弱损伤”。在这种情况下,对于一些双折射性质较大的晶体材料(如LiNbO<sub>3</sub>晶体),晶格的变化可能会导致其沿着特定方向的较小的折射率(对于LiNbO<sub>3</sub>晶体为非寻常光折射率 $n_o$ )在激光焦点处有一定的升高,同时较大的折射率(对于LiNbO<sub>3</sub>晶体为寻常光折射率 $n_o$ )降低,在飞秒激光直写的痕迹处会形成在 $n_o$ 偏振方向能够支持导波传输的光波导结构<sup>[41-42]</sup>。研究发现,此种

光波导的热稳定性较差,在一定温度下经过退火处理导波性能会有一些降低甚至完全消失。而当飞秒激光辐照能量升高到一定程度时,辐照区域会形成不可逆的晶格“强损伤”(晶格膨胀),造成飞秒激光聚焦痕迹处的折射率降低,而痕迹附近周围区域的晶格被压缩,导致折射率升高,可以形成有效的光波导。需要指出的是,在非常靠近飞秒激光聚焦的区域,虽然折射率升高,但由于存在过多的晶格缺陷,无法形成有效的波导结构,而波导的核心区域一般位于距离飞秒激光聚焦位置更远的区域。另外值得注意的是,此类光波导结构可能会由于晶格压缩的应力场的影响仅仅能够支持一个偏振方向有效的导波的传输,而且波导的导波性能可以通过热退火处理进行优化。

## 2.2 波导的基本类型

利用飞秒激光直写可以在不同晶体材料中制备不同种类的波导结构。根据引起的折射率变化以及制备的波导几何形状不同,可以将飞秒激光直写晶体光波导分为:基于 I 类改性的单线型光波导(辐照区域折射率升高)、基于 II 类改性的双线型光波导(辐照区域折射率降低,而周围区域折射率升高)和基于 II 类改性的 III 类包层光波导(未被加工的波导核心区域被折射率较低的飞秒激光写入痕迹所包围)<sup>[38-39,43]</sup>,图 1 为 3 种晶体光波导的制备示意图。

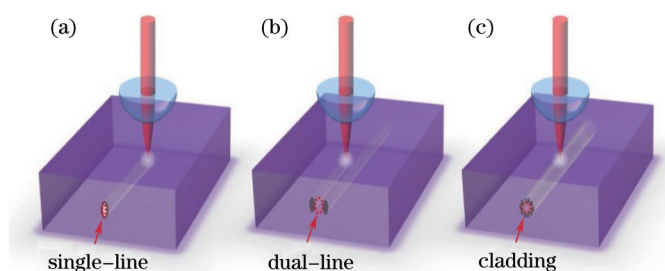


图 1 3 种飞秒激光直写晶体光波导的制备示意图。(a)基于 I 类改性的单线型光波导;  
(b) 基于 II 类改性的双线型光波导;(c) 基于 II 类改性的 III 类包层光波导

Fig.1 Schematic plots of the fabrication of the three categories by femtosecond laser irradiation. (a) Waveguide based on Type I modification in single-line geometry; (b) waveguide based on Type II modification in dual-line geometry; (c) waveguide based on Type II modification in cladding Type III geometry

对于晶体中的 I 类改性,飞秒激光直写痕迹处的折射率升高,飞秒激光能量接近或低于光损伤阈值,属于“弱损伤”。而 II 类改性的机制则属于飞秒激光“强损伤”,飞秒激光直写痕迹处的折射率降低,周围区域折射率升高,是光波导的核心区域。通常情况下,如果有 2 条互相平行的飞秒激光写入痕迹,会在 2 条痕迹之间形成光波导,因此被称为 II 类双线型光波导。III 类包层光波导则是在 II 类飞秒激光改性的基础上,采用了具有类光纤型的包层的结构。这 3 种波导类型各自的优势和缺点详见表 1。另外,表格中还列出了迄今为止已经报道的制备不同波导结构的晶体材料<sup>[39]</sup>。

## 2.3 三维光波导的制备

基于 2.2 节介绍的 3 种飞秒激光直写光波导类型,通过调节飞秒激光焦点在衬底材料中的扫描,可以实现高精度的三维加工,使得制备精细的三维波导器件成为可能。对于 I 类改性机制,由于在飞秒激光聚焦的辐照区折射率升高,很容易实现三维波导器件的制备。但是, I 类改性通常适用于玻璃材料,仅在少数几种晶体材料中实现(见表格 1),大大限制了应用的范围。而对于 II 类改性,由于其波导区域并不位于飞秒激光焦点处,简单直接地实现三维波导器件的制备比较困难,需要借助于对波导几何形状的特殊设计。此外,对于 II 类改性双线型光波导,其在多数晶体材料中仅能够支持一个偏振方向的导波的传输,难以制备有效的三维波导器件。而对于典型的端面形状为圆形或矩形的包层光波导,优良的导波性能保证其在一般的三维通道光波导中能够支持良好的导波传输,但在较为复杂的三维波导结构中,波导与波导之间的连接会变得十分复杂,难以实现有效的传输。为了解决以上困难,近来,本课题组提出并在 Nd:YAG 晶体中制备了一种新颖的六角形类光子晶格包层导波微结构,这种结构是由周期排列成六角形的飞秒激光写入痕迹所构成,导波核心区域没有进行加工<sup>[44]</sup>。通过在微结构中合适的位置进行飞秒激光写入,引入折射率降低的晶格缺陷,可以实现对导波光传输的引导以及对光束光强分布的调控。在此基础上,通过对不同设计的类光子晶格包层导波微结构进行合理的组合,实现了导波分束和三维光束转换的功能<sup>[44]</sup>(如图 2 所示)。此外,通过

表 1 3种光波导的优缺点及已经报道的制备了不同波导结构的晶体材料

Table 1 Advantages and disadvantages of different waveguide configurations in dielectric crystals and summary of reported waveguides with different configurations fabricated in crystals

Configuration	Advantage	Disadvantage	Crystal
Single-line waveguide (Type I geometry)	1. Direct-write for 3D micromachining	1. Distorted lattices with degraded bulk features	LiNbO <sub>3</sub> , Nd:YCOB, ZnSe, Er:YAG, PPLN, LiTaO <sub>3</sub> , BGO
	2. Single-mode guiding structures	2. Weak thermal stabilities	
	3. Longer wavelength guidance by using multi-scan technique	3. Guidance only along one polarization for some crystals	
	4. Relatively short production time for 3D devices	4. Realizable in limited crystals	
Dual-line waveguide (Type II geometry)	1. Well preserved bulk features	1. No guidance at long wavelength (e.g., Mid-IR)	LiNbO <sub>3</sub> , doped LiNbO <sub>3</sub> , doped YAG, Nd:GGG,
	2. Single- or low-order mode structures	2. Guidance only along one polarization in some crystals (e.g., YAG, GGG)	doped vanadates, KTP, BiBO, Nd:YLF, Pr:YLF, Nd:KGW,
	3. Easily achieved in crystals	3. Difficult for 3D waveguides	Yb:KGW, Yb:KYW,
	4. Excellent thermal stabilities	4. Restricted to small size cores	Nd:GdCOB, Nd:YCOB, Pr:SrAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , Nd:YAB, LiTaO <sub>3</sub> , doped LiTaO <sub>3</sub> , BGO, Nd:LGS, Nd:Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PPKTP, PPLN, Ti:Sapphire, Cr:Sapphire, CaF <sub>2</sub> , Nd:CNGG, SBN, KNSBN, KDP
	5. Wide applicability in crystals		
Depressed cladding waveguide (Type III geometry)	1. Well preserved bulk features	1. Highly multimodal structures at shorter wavelength regimes	LiNbO <sub>3</sub> , doped YAG, Nd:GGG, Nd:CNGG, doped vanadates, KTP, BiBO, BGO, Nd:LGS, ZnS, Cr:ZnS, Ti:Sapphire, Nd:YCOB, Nd:GdCOB, Nd:KGW, ZnSe, Cr:ZnSe, LiTaO <sub>3</sub> , doped LiTaO <sub>3</sub> , PPLN, CaF <sub>2</sub> , $\beta$ -BBO, Nd:YAP
	2. Guidance till long wavelengths	2. Relatively long production time for complex structures	
	3. Designed geometry and adjustable diameters	3. Difficult for 3D waveguides	
	4. Very good thermal stabilities		
	5. High coupling efficiency with fibers		
	6. Guidance along any transverse direction		
	7. Wide applicability in crystals		

对单片导波微结构的抽运,实现了连续和调Q脉冲波导激光的产生,这项工作开创了一种在单片晶体材料中制备有源/无源多功能集成光路的新的思路。

#### 2.4 飞秒激光直写波导的基本方法

关于飞秒激光直写波导的制备,基于I类改性的光波导可以利用较低峰值功率的飞秒激光器来实现,例如飞秒激光振荡器。由于所需要的能量较小,而激光系统的重复频率(几十兆赫兹)较大,因此激光扫描速率较高(每秒毫米量级甚至每秒厘米量级),制备时间较短。而基于II类改性的光波导则需要更高的飞秒激光峰值功率(在大部分情况下,需要微焦量级的飞秒激光脉冲能量),相应地,扫描速度较低,制备时间也会较长。

典型的飞秒激光直写制备I类和II类改性光波导的实验装置是相似的。在加工过程中,样品被放置在可进行精密调节的三维机械调节台上,飞秒激光经过显微物镜聚焦在样品表面以下的特定位置,通过调节三维调节台的位置来实现飞秒激光对样品的扫描。另一种相似的方法是固定样品的位置,通过调节一系列的反射镜片改变飞秒激光在样品中的焦点位置,从而实现对样品的加工。前一种方式可称为样品扫描,后一种为激光扫描,在大部分情况下,2种扫描方式中样品的移动方向与飞秒激光的写入方向是垂直的。近期,罗马尼亚

国家激光、等离子体和辐射物理研究所的 Pavel 课题组在 Nd:YAG 陶瓷中制备基于 II 类改性的 III 类包层光波导结构时采用了螺旋状的扫描方式(如图 3 所示),在不影响波导性能的基础上大大降低了制备的周期<sup>[45]</sup>。

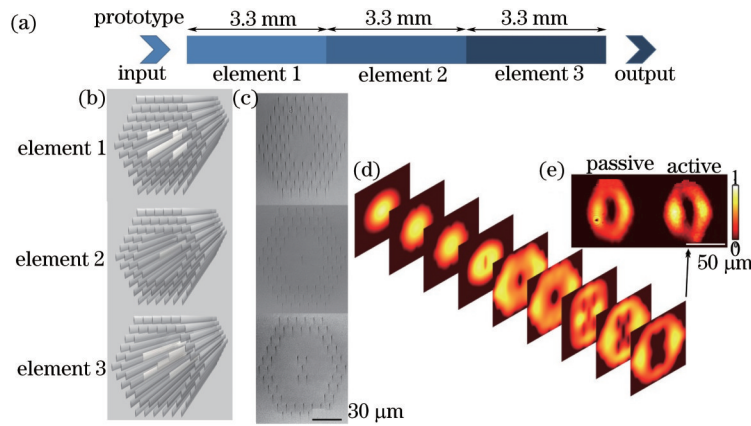


图 2 (a) 3 种不同设计的类光子晶格包层导波微结构的组合示意图, 实现了三维环形光束转换功能; 3 种不同设计结构 (element 1-3) 端面的 (b) 示意图及 (c) 显微镜照片; (d) 在 1064 nm 下导波光在环状微结构中的模式演变图; (e) 有源和无源的情况下 1064 nm 环状微结构的模式分布的实验结果

Fig.2 (a) Design of a 3-element photonic-lattice-like waveguide structure for the evolution from a single Gaussian beam to a ring-shaped beam; (b) schematic and (c) the microscope image of the cross sections of the elements 1 (top), 2 (middle), and 3 (bottom); (d) simulated beam profile evolution as the 1064 nm light propagates along the ring-shaped photonic structure; (e) measured intensity distributions of the ring-shaped structure in both passive and active regimes at 1064 nm

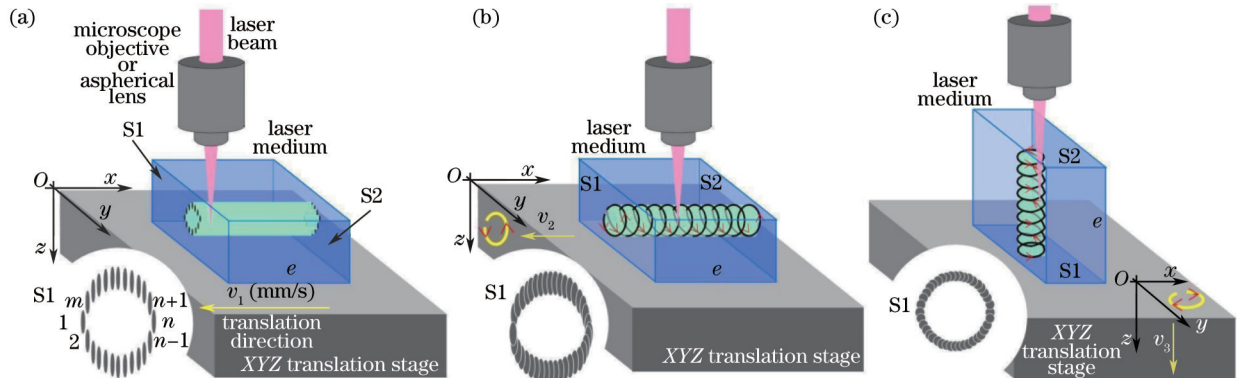


图 3 3 种不同的飞秒激光直写方式。(a) 线性扫描, 写入方向与样品移动方向垂直; (b) 螺旋扫描, 写入方向与样品移动方向垂直; (c) 螺旋扫描, 写入方向与样品移动方向平行

Fig.3 Techniques for direct fs-laser writing are shown. (a) Linear translation, transverse to the laser medium, step-by-step along a defined shape; (b) helical movement, transverse to the laser medium; (c) helical movement, parallel to the laser medium

### 3 介电晶体

迄今为止,飞秒激光加工技术已经在几十种晶体材料中制备了不同种类的光波导结构(见表格 1),下面就按照晶体的种类介绍飞秒激光直写制备晶体光波导的研究进展。

#### 3.1 激光晶体

##### 3.1.1 激活离子掺杂钕铝石榴石(YAG)晶体和陶瓷

激活离子(例如  $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Tm}^{3+}$  等)掺杂的 YAG 晶体和陶瓷是目前最常用的激光基质材料之一。由于 YAG 基质硬度高,具有良好的物理、化学和机械性能,直接制备光波导结构仅能采用离子束辐照和飞秒激光加工的方法。到目前为止,3 种基本的飞秒激光直写光波导结构均已经在 YAG 晶体或陶瓷中实现<sup>[17,27,46-52]</sup>。其中, Rodenas 等<sup>[46]</sup>利用多次扫描的方法在掺 Er 和掺 Ho 离子的 YAG 陶瓷中制备了基于 I 类改性的单线型光波导(折射率分布近似为阶跃型),并在 1.95  $\mu\text{m}$  波长下实现了单模的导波传输。通过研究发现,由于聚焦的飞秒激光脉冲改变了波导区域的晶格结构,体材料原有的微荧光强度在 I 类光波导的波导区域降低了 35%。

在 YAG 晶体/陶瓷中,有关 II 类双线型光波导的报道较多,多个课题组都对 Nd:YAG 和 Yb:YAG 晶体/陶

瓷中光波导的制备、荧光和激光性能进行了研究。研究发现, II类双线型光波导在YAG晶体/陶瓷中仅能够在TM一个偏振方向支持导波的传输,在TE偏振方向下波导的性能很差<sup>[27,47-48]</sup>。Rodenas等<sup>[27]</sup>利用微荧光和微拉曼技术对YAG中II类双线型光波导折射率的变化机制进行了研究,发现折射率变化是飞秒激光脉冲造成的晶格损伤以及应力场效应共同影响的结果(如图4所示)。在波导区域中,体材料原有的荧光性能被很好的保留,为实现波导激光的产生提供了前提。

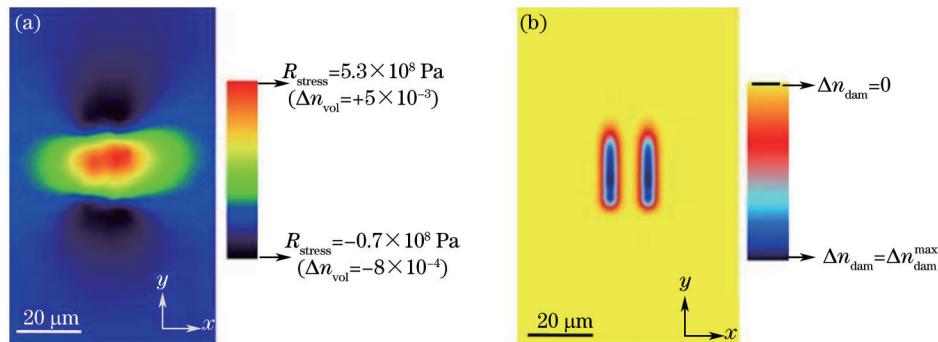


图4 (a) 应力场以及相对应的折射率变化分布; (b) 模拟的晶格损伤引起的折射率变化分布

Fig.4 (a) Spatial dependence of the stress and the corresponding refractive-index change; (b) spatial dependence assumed for the refractive-index decrease caused by the local damage of the Nd:YAG lattice

Okhrimchuk等<sup>[17]</sup>在YAG晶体中制备的III类包层光波导是最早有关包层光波导的报道,其波导的形状为矩形,能够支持单模传输,飞秒激光聚焦区域与波导区域的折射率差约为-0.0004。在这之后,研究人员在掺杂不同离子的YAG晶体/陶瓷中制备了几种具有不同端面形状的包层光波导。Liu等<sup>[50]</sup>在Nd:YAG陶瓷中制备了端面形状为圆形、矩形、六边形和表面梯形的包层光波导结构,通过共聚焦荧光技术发现,体材料原有的荧光性质仅在飞秒激光写入区域发生改变,而在波导区域得到了很好的保留(见图5)。YAG包层光波导另一个特殊的性质是能够在各个偏振方向下支持导波的传输,具有比YAG双线型光波导更加优异的导波性能<sup>[50]</sup>。而且,包层光波导的大小尺寸可以在比较大的范围内进行调控,从而能够在不同的波长下实现单模的传输,这一点已经在Ren等<sup>[51]</sup>报道的Tm:YAG陶瓷包层光波导中得到印证。

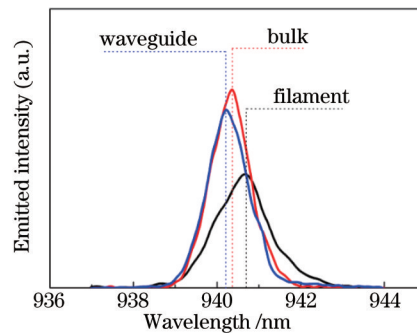


图5 样品中不同位置(波导区、飞秒激光写入区和体材料)的Nd<sup>3+</sup>离子在940 nm附近的发射谱

Fig.5 Spectra of the Nd<sup>3+</sup> emission lines at 940 nm for the three different positions (i.e., waveguide, damage filaments and bulk)

### 3.1.2 钕掺杂钒酸盐晶体

钕掺杂钒酸盐晶体是优良的激光增益介质,是二极管激光抽运的固态激光器理想的选择。迄今为止,研究者已经利用飞秒激光直写技术在多种钕掺杂钒酸盐晶体中制备了光波导结构,包括Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub>、Nd:LuVO<sub>4</sub>等<sup>[39]</sup>。而首个关于飞秒激光直写钒酸盐晶体光波导的报道是Silva等<sup>[51]</sup>在a切Nd:YVO<sub>4</sub>晶体中制备的II类双线型光波导(制备参数:飞秒激光波长为796 nm、脉宽为12 fs、重复频率为1 kHz、扫描速率为50 μm/s),损耗为0.8 dB/cm。该波导的波导区很好地保留了体材料的荧光和拉曼性质,而且与YAG双线型光波导不同的是其能够在TE和TM 2个互相垂直的偏振方向均支持有效的导波传输,。另外,利用重复频率更大的飞秒激光和更快的扫描速度,Tan等<sup>[34]</sup>在Nd:GdVO<sub>4</sub>制备了损耗为0.5 dB/cm的双线型光波导(制备参数:飞秒激光波长为1047 nm、脉宽为350 fs、重复频率为200 kHz、扫描速率为17 mm/s),同时Ren等<sup>[54]</sup>也利用相似的条件在Nd:LuVO<sub>4</sub>晶体中得到了类似的结果,为飞秒激光直写在钒酸盐晶体中制备高质量波导结构提供了一种有

效的途径。此外, Jia 等<sup>[55]</sup>在 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中制备了直径为 100 μm 和 120 μm 的包层光波导结构, 波导在 TE 和 TM 2 个互相垂直的偏振方向下都能够有效地支持导波的传输, 且 2 个偏振方向下波导损耗几乎一致, 仅相差 5%。迄今为止, 还没有关于在钽酸盐晶体中制备 I 类单线型光波导的报道。

### 3.1.3 宝石(Sapphire)

钛宝石(Ti:Sapphire)是性能优良的可调谐激光晶体, 在高功率激光领域具有广泛的应用。目前为止, 研究者已经利用飞秒激光加工技术在 Ti:Sapphire 和 Cr:Sapphire 晶体中制备了基于 II 类改性的光波导结构, 波导位于飞秒激光写入痕迹的临近区域: 在飞秒激光写入痕迹的顶端或底端(单线型), 或者是位于 2 条写入痕迹之间(双线型)<sup>[25,57-60]</sup>。对于 II 类改性单线型光波导, 波导在 TE 和 TM 2 个偏振方向下都能够支持有效的导波传输, 导波性能并不依赖于偏振的影响<sup>[25]</sup>。而在 II 类改性双线型光波导中, 研究者发现了应力引起的双折射效应以及波导性能对于偏振方向的依赖性<sup>[57]</sup>。此外, 对于利用紫外飞秒激光写入在 Cr:Sapphire 晶体中制备的 II 类改性单线型光波导, 研究者发现在低于 600 °C 的退火条件下其导波性能比较稳定, 而退火温度达到 1000 °C 时, 波导的折射率变化和导波性能会消失, 由图 6 所示<sup>[58]</sup>。

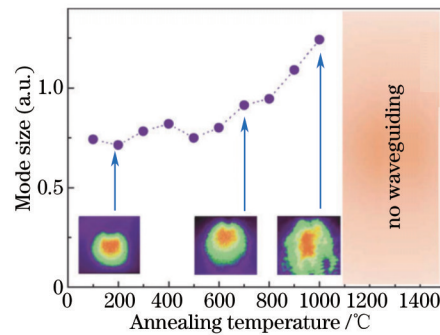


图 6 在不同退火温度下基于 II 类改性 Cr:Sapphire 单线型光波导的模式大小, 插图为波导 632 nm 下的传输模式  
Fig.6 Size of the propagation mode at 632 nm for single-line Type II Cr:Sapphire waveguide at different annealing temperatures. Insets show the waveguide's propagation mode at 632 nm at three different temperatures

## 3.2 非线性晶体

### 3.2.1 铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)

LiNbO<sub>3</sub> 晶体是一种多功能晶体, 具有优良的压电效应、电光效应、声光效应、非线性效应及光折变效应。LiNbO<sub>3</sub> 晶体也是最早被用来制备飞秒激光直写光波导的晶体, 迄今为止, 3 种基本的波导类型均已经在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中得到实现<sup>[18,29,61-71]</sup>。其中, I 类改性和 II 类改性光波导的研究最为广泛, 图 7 展示了 LiNbO<sub>3</sub> 晶体 2 种光波导的折射率和模式分布情况<sup>[62]</sup>。I 类改性光波导在偏振沿着非寻常光折射率( $n_e$ )的方向下

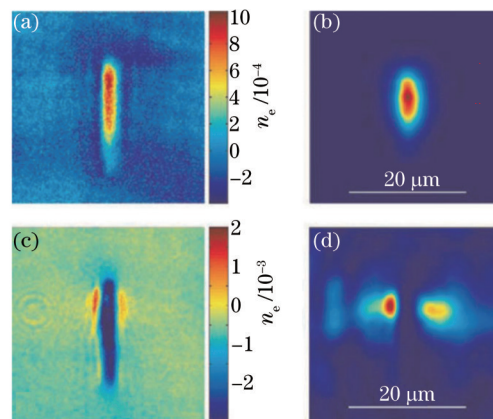


图 7 超快激光直写 LiNbO<sub>3</sub> 光波导(激光脉冲能量为 0.2 μJ)在 633 nm 下, 脉宽为 220 fs 时(a)  $n_e$  和(b) 导波模式的分布 (I 类改性); 脉宽为 1.1 ps 时(c)  $n_e$  和(d) 导波模式的分布 (II 类改性)

Fig.7 Laser-written waveguides in LiNbO<sub>3</sub> at a fixed pulse energy of 0.2 μJ and different pulse widths.  
(a)  $n_e$  profile and (b) guided optical mode at a wavelength of 633 nm for a pulse duration of 220 fs (Type I);  
(c)  $n_e$  profile and (d) guided optical mode for a pulse duration of 1.1 ps (Type II)

能够支持导波传输,而在寻常光折射率( $n_o$ )方向则不能导波,折射率变化( $\Delta n_e$ )一般低于0.001<sup>[40,61-62]</sup>。I类改性LiNbO<sub>3</sub>光波导具有较差的热稳定性,甚至在室温条件下,波导的性能也可能会逐渐衰退<sup>[6]</sup>。此外,由于波导区域位于飞秒激光损伤区域,体材料的性能在波导中会有所降低,大大限制了其潜在的应用<sup>[40]</sup>。不过近来研究者发现,通过精确调整飞秒激光写入的参数,可以尽可能多地在波导区保留体材料原有的性质<sup>[63]</sup>,而且通过利用多次扫描的技术,可以增加波导的端面尺寸,使得波导能够在较长的波长下支持导波的传输<sup>[64]</sup>。例如在I类改性PPLN晶体光波导中,通过利用多次扫描的技术,波导区较好地保存了体材料的非线性性质<sup>[63,65]</sup>。

对于LiNbO<sub>3</sub>晶体中的II类改性双线型光波导, $n_e$ 和 $n_o$ 在飞秒激光写入痕迹处都有所降低,其中 $n_e$ 的变量一般为0.002~0.004,大于I类改性光波导的折射率的改变<sup>[6]</sup>。与I类改性光波导相比,II类改性双线型光波导的波导区较好地保留了衬底材料原有的性质<sup>[66-67]</sup>。迄今为止,II类改性双线型光波导已经在纯LiNbO<sub>3</sub>晶体、离子掺杂LiNbO<sub>3</sub>晶体以及PPLN中实现<sup>[18,29,40,62,68-69]</sup>。此外,基于II类改性双线型结构,研究者还实现了波导阵列结构<sup>[70]</sup>。

在Nd:MgO:LiNbO<sub>3</sub>和纯LiNbO<sub>3</sub>晶体中,研究者还制备了基于II类改性的III类包层光波导,波导能够支持各个偏振方向导波的传输<sup>[69,71]</sup>。值得一提的是,He等<sup>[71]</sup>在纯LiNbO<sub>3</sub>晶体中制备的包层光波导可以支持从可见光波段(632.8 nm)到中红外波段(4  $\mu$ m)较宽波段内的导模的传输,且经过退火处理,波导的损耗降低到0.5 dB/cm,体现了优异的导波性能。

### 3.2.2 磷酸钛氧钾[KTiOPO<sub>4</sub>(KTP)]

KTP晶体具有优良的非线性光学性质,通常被用作倍频晶体,特别是1064~532 nm的双折射相位匹配倍频。目前,研究者们已经利用飞秒激光直写技术在KTP晶体中制备了基于II类改性的双线型和包层光波导结构,而在PPKTP晶体中,仅实现了双线型光波导结构<sup>[28,72-74]</sup>。在KTP晶体中,双线型光波导的损耗为0.8 dB/cm,在TE和TM偏振下均能够支持有效的导波传输,包层光波导的损耗为1.7 dB/cm,导波性能对偏振方向没有依赖性。在PPKTP双线型光波导中,波导在TM偏振方向下(即沿着 $z$ 轴)的损耗为1 dB/cm<sup>[72-74]</sup>。Dong等<sup>[35]</sup>对KTP双线型光波导的微微频性能进行研究发现,体材料原有的倍频性质在波导区域得到很好的保留,这也为KTP光波导能够实现有效的频率转换提供了前提条件。

### 3.2.3 三硼酸铋[BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub>(BiBO)]

BiBO晶体是一种性能优良的非线性光学晶体,可用于实现连续波辐射的二次谐波(SHG)产生(可见光到紫外波段)、光参量放大和光参量振荡,在非线性光学领域中有很好的应用前景。Beecher等<sup>[31]</sup>首次利用飞秒激光直写技术在BiBO晶体中制备了基于II类改性的双线型光波导。不同于一般情况,其波导区的位置随激发波长的变化而不同:当波长是可见光波段时,波导区的位置位于2条飞秒激光写入痕迹之间,仅支持TE模;而当波长是近红外波段时,波导区的位置位于2条写入痕迹之间靠上的位置,且仅支持TM模。为了解决这一问题从而实现波导的倍频,Beecher等<sup>[31]</sup>设计了“Y”四线型的波导,如图8所示。利用这种结构,位于上端的双线型波导的可见光模式与位于下端的双线型波导的近红外模式得以重合,使波导倍频的实现成为可能。但这种结构的损耗较高(5 dB/cm),对倍频的效率有一定的影响。由于III类包层光波导的导波性质与偏振方向无关,是实现波导倍频的更好的选择,Jia等<sup>[75-76]</sup>在BiBO晶体中制备了端面为圆形的包层光波导结构,在TE和TM偏振方向下都显示了良好的导波性能,且损耗较低,为0.6~1.3 dB/cm。

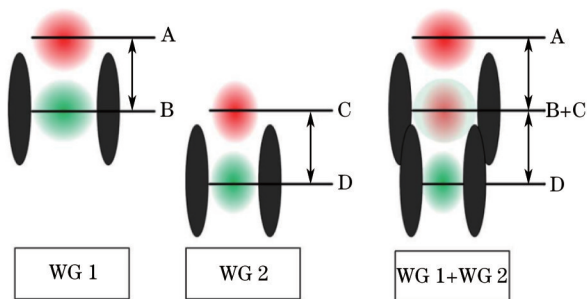


图8 BiBO四线型结构的示意图。波导1的可见光模式B与波导2的近红外模式C在四线型结构中重合

Fig.8 Proposed design of the four-line structure. Visible mode B of waveguide 1 (WG1) is overlapped with the IR mode C of waveguide 2 (WG2) to achieve the guiding of both polarizations B+C (WG 1+2)



### 3.3 其他晶体

SBN 晶体是常用的光折变和铁电晶体,其铁电相变也会对激光辐照引发的折射率改变有一定的影响。Jaque 等<sup>[77]</sup>通过研究发现,在飞秒激光直写制备的 I 类单线型光波导中,非寻常光模式位于飞秒激光写入痕迹处,而寻常光模式位于痕迹两侧,两者的传输损耗分别为 1 dB/cm 和 1.8 dB/cm。此外,当样品处于铁电相(28 °C)、相变(75 °C)和顺电相(120 °C)3 种不同的温度下时,波导模式的位置和导波性能不同,这是由热影响区域和空间电场两者共同作用所导致的。

BGO 晶体是一种性能优良的闪烁晶体材料,Qian 等<sup>[78]</sup>在 BGO 晶体中制备了 II 类改性双线型光波导结构,损耗为 4.2 dB/cm。这之后,He 等<sup>[79]</sup>的工作证实 BGO 双线型光波导在 TM 偏振方向下的导波性能优于 TE 偏振方向,而且退火处理能够明显提升导波性能(损耗 20 dB/cm 降低到 0.5 dB/cm)。此外,He 等<sup>[79]</sup>还制备了 III 类包层光波导结构,其在各个偏振方向下都能够支持导波的传输。

Nd:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(Nd:YAB)晶体是一种自倍频晶体,可以用于直接产生蓝绿激光。Dong 等<sup>[37]</sup>在 Nd:YAB 晶体中首次制备了 II 类改性双线型光波导结构(波导的损耗为 2 dB/cm),在 2 个互相垂直的偏振方向下均能够支持导波的传输,而且端面的共聚焦荧光和微倍频测试结果证明体材料原有的荧光和倍频性质在波导中得到很好的保存,这为实现波导自倍频性质提供了前提条件。

石英晶体不仅是较好的光学材料,而且是重要的压电材料。Gorelik 等<sup>[80]</sup>在石英晶体中制备了基于 II 类改性单线型结构,在飞秒激光写入痕迹的两侧形成了波导结构。其中,飞秒激光的脉冲能量为 14 μJ,波导区的折射率变化约为 +0.01,波导的损耗低于 5 dB/cm。

## 4 应用综述

### 4.1 波导激光

波导激光是微型化的激光光源,与体材料激光相比,波导激光具有较低的激光阈值、较高的激光效率以及更加紧凑的几何结构。迄今为止,波导激光已经在一些飞秒激光直写晶体/陶瓷光波导中实现,波导的类型包括基于 II 类改性双线型和 III 类包层光波导,而基于 I 类改性单线型光波导结构还没有波导激光实现的报道<sup>[39]</sup>。根据激光增益介质掺杂的离子不同,有报道的晶体材料波导激光输出的波长范围为 530 nm~2 μm。其中,530 nm 的波导激光是在 Nd:YAB(II 类双线型光波导)<sup>[37]</sup>和 Nd:YCOB(III 类包层光波导)<sup>[81]</sup>2 种自倍频波导中基于相位匹配产生二次谐波的物理机制实现的,其最大的输出功率为 0.1 mW。利用直接抽运的方法产生可见光波段的波导激光在 Pr 离子掺杂的激光系统中得到实现,采用的是 Pr: SrAl<sub>12</sub>O<sub>18</sub>(644 nm)<sup>[32]</sup>和 Pr: YLF(604 nm)<sup>[82]</sup>2 种晶体中制备的 II 类双线型光波导结构,得到的红光波导激光的最大输出功率为 28 mW,斜效率为 8%。Ti: Sapphire 晶体 II 类双线型光波导的可调谐波导激光的波长范围为 700~870 nm,最大输出功率为 143 mW(波长为 800 nm 时),斜效率为 23.5%<sup>[58]</sup>。目前波导激光的研究大部分集中在 1.06 μm 的 Nd 离子掺杂波导激光系统中,这些激光增益介质包括 Nd:YAG、Nd:GGG、Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub>、Nd:LuVO<sub>4</sub>、Nd:LGS 等晶体/陶瓷。其中,Calmano 等<sup>[49]</sup>在 Nd:YAG 晶体 II 类双线型光波导中实现了最大输出功率为 1.29 W 的波导激光的输出,是目前为止 Nd:YAG 波导系统中激光功率的最高值。Tan 等<sup>[34]</sup>在 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体 II 类双线型光波导实现了斜效率为 70% 的波导激光的输出,是目前飞秒激光直写 Nd 离子掺杂波导激光系统中的最大值。在立方晶体中,II 类双线型光波导通常仅能支持 TM 一个偏振方向下波导激光的产生,而对于钽酸盐晶体,II 类双线型光波导在 TE 和 TM<sub>2</sub> 个偏振方向下均能够产生有效的波导激光。基于 II 类改性的 III 类包层光波导已经在 Nd:YAG<sup>[17,50]</sup>、Nd:YVO<sub>4</sub><sup>[54]</sup>、Nd:GGG<sup>[83]</sup>、Nd:LGS<sup>[84]</sup>和 Nd:YAP<sup>[85]</sup>晶体和陶瓷中实现,与 II 类双线型光波导相比,III 类包层光波导也能够支持 TE 偏振方向的波导激光的输出。图 9 为 Nd:LGS 晶体中 III 类包层光波导中波导激光的输出功率随抽运光的变化,可以看到,包层光波导在 TE 和 TM<sub>2</sub> 个偏振方向下都能够实现波导激光的输出<sup>[84]</sup>。

另外,对于 Yb 离子掺杂的晶体光波导,如 Yb:KGW、Yb:KYW 和 Yb:YAG 中的 II 类双线型光波导,波导激光的波长为 1.02~1.04 μm<sup>[30]</sup>。其中,利用高功率的半导体激光器抽运,在 Yb:YAG 的双线型光波导中得到的激光输出功率最大,为 2.35 W,波长为 1030 nm<sup>[86]</sup>。最近汉堡大学又进一步提高了 Yb:YAG 波导激光的最大输出功率,达到 5 W<sup>[38]</sup>,这也是迄今为止报道的飞秒激光直写波导激光输出功率的最大值。利用 Ti:Sapphire 激光器作为抽运源,在 Yb:YAG 双线型光波导中得到了最高的激光斜效率,为 75%<sup>[86]</sup>。对于较长波

长的波导激光, Ren 等<sup>[51]</sup>在 Tm:YAG 陶瓷包层光波导中, 实现了 1985 nm 的波导激光, 而在这个波段中, II 类双线性光波导是不能支持有效的导波传输的。此外, Tan 等<sup>[55]</sup>在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体双线性光波导中实现了波长为 1064 nm 和 1342 nm 的双波长波导激光的输出, 而 Nie 等<sup>[85]</sup>在 Nd:YAP 晶体包层光波导中实现了 1064 nm 和 1079 nm 的双波长波导激光。

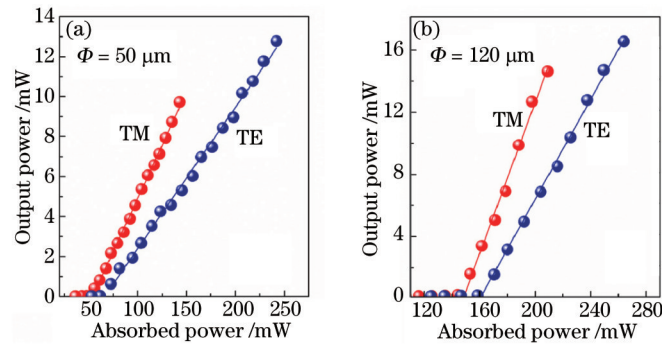


图9 Nd:LGS 晶体包层光波导的激光输出功率随抽运功率的变化, 包层的直径分别为(a) 50  $\mu\text{m}$  和(b) 120  $\mu\text{m}$

Fig.9 Dependence between output laser power and absorbed pump power from (a) 50  $\mu\text{m}$  and (b) 120  $\mu\text{m}$  for Nd:LGS cladding waveguides

以上部分介绍的均是在连续模式下的波导激光, 近期, 研究者们还在飞秒激光直写 Nd:YAG<sup>[87-89]</sup>、Tm:YAG<sup>[90]</sup>、Nd:Cr:YVO<sub>4</sub><sup>[91]</sup>、Nd:GdCOB<sup>[92]</sup> 等几种晶体/陶瓷光波导中实现了调 Q 或锁模脉冲波导激光。其中, Okhrimchuk 等<sup>[87]</sup>利用石墨烯作为可饱和吸收体在 Nd:YAG 晶体包层光波导中实现的连续锁模脉冲波导激光重复频率最高, 为 11.3 GHz, 脉宽为 16 ps, 由图 10 所示。Ren 等<sup>[90]</sup>利用石墨烯作为可饱和吸收体在 Tm:YAG 陶瓷包层光波导中实现了被动调 Q 锁模波导激光(脉冲波导激光的波长为 1943.5 nm, 重复频率为 7.8 GHz, 最大平均输出功率为 6.5 mW)。另外, Tan 等<sup>[91]</sup>在 Nd:Cr:YVO<sub>4</sub> 晶体 II 类双线性光波导中实现了自调 Q 波导激光(脉冲波导激光的波长为 1064 nm, 重复频率为 2.3 MHz, 脉宽为 85 ns, 最大平均输出功率为 57 mW)。

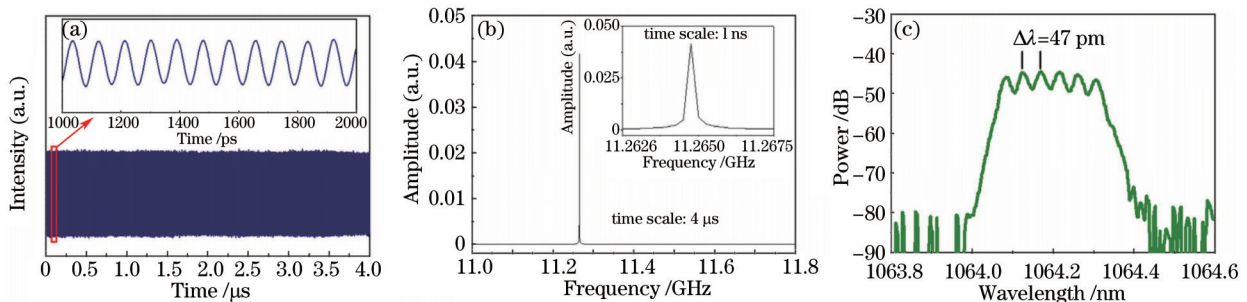


图 10 利用石墨烯为可饱和吸收体在 Nd:YAG 晶体中实现的 11 GHz 连续锁模脉冲波导激光。

(a) 连续锁模波导激光脉冲序列; (b) 重复频率谱图; (c) 激光光谱(分辨率为 0.01 nm)

Fig.10 11-GHz waveguide Nd:YAG laser CW mode-locked with graphene. (a) Trains of CW mode-locked pulses on two different time scales; (b) radio-frequency spectrum; (c) optical spectrum, resolution of 0.01 nm

## 4.2 非线性频率转换

非线性晶体是频率转换器件的核心材料, 在非线性光波导中, 由于波导中的光密度较大, 使得体材料原有的非线性性质得到加强。对于飞秒激光直写非线性光波导, 倍频的产生是近来诸多工作关注的焦点, 迄今为止已经实现了波长在 400~790 nm 范围内的倍频光输出<sup>[39]</sup>。这其中, 由于 I 类单线性光波导仅能够支持一个偏振方向的导模, 因此只能实现基于准相位匹配的倍频。而 II 类双线性光波导有可能支持 2 个互相垂直偏振方向的导模, 可以实现基于准相位匹配和相位匹配 2 种机制的倍频。III 类包层光波导具有更加优异的导波性能, 在各个偏振方向下均能够实现有效的导波传输, 在倍频的实现方面具有一定的优势。

在脉冲基频光的激励下, 波导倍频绿光已经在包括 LiNbO<sub>3</sub>、KTP、PPKTP、BiBO 和 Nd:GdCOB 等几种晶体中实现<sup>[39]</sup>。其中, 对于有报道的基于相位匹配机制的波导倍频绿光, LiNbO<sub>3</sub> 晶体 II 类双线性光波导的转换效率最高(49%)<sup>[18]</sup>, KTP 晶体 III 类包层光波导的峰值功率最大(427 W)<sup>[74]</sup>。通过比较 KTP 晶体中 II 类双线性和 III 类包层光波导的倍频性能发现, II 类双线性光波导的倍频转换效率为 III 类包层光波导的 1/4, 也说明 III 类

包层光波导结构具有更加优异的倍频性能<sup>[74]</sup>。对于基于准相位匹配机制的波导倍频绿光, PPLN 晶体 II 类双线性光波导的转换效率为 58%, 峰值功率为 59 W<sup>[68]</sup>。PPKTP 的转换效率为 47.4%, 峰值功率为 252 W<sup>[29]</sup>。另外, 近红外波长的波导倍频光也已经在 PPLN 晶体 II 类双线性光波导中实现<sup>[93]</sup>。

在连续基频光的激励下, 基于准相位匹配机制, 研究者在 PPKTP 晶体 II 类双线性光波导中实现了波长为 400 nm 的波导倍频光, 转换效率为  $0.02\% \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[28]</sup>。通过对 PPLN 晶体 I 类单线性光波导倍频性质的研究发现, 利用多次扫描技术制备的 I 类单线性光波导具有比单次扫描制备的波导更加优异的倍频性能, 倍频转换效率由  $3 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  提升到了  $6.5\% \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[41]</sup>。此外, 研究者还在在 PPKTP 晶体 I 类单线性光波导中实现了倍频蓝光的产生, 转换效率为  $0.18\% \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[28]</sup>。基于相位匹配机制, Beecher 等<sup>[31, 75]</sup>在 BiBO 晶体中利用 III 类包层光波导实现的倍频绿光转换效率是基于 II 类改性四线性光波导的 50 倍(转换效率由  $0.015\% \text{ W}^{-1}$  提升到了  $0.75\% \text{ W}^{-1}$ ), 这也体现了包层光波导优异的倍频性能。另外, Jia 等<sup>[76]</sup>还在 BiBO 晶体 III 类包层光波导中实现了倍频紫光的产生, 转换效率为  $0.32\% (0.98\% \text{ W}^{-1})$ 。图 11 为 BiBO 晶体包层光波导倍频绿光和倍频紫光输出功率和转换效率随基频光功率的变化<sup>[75-76]</sup>。

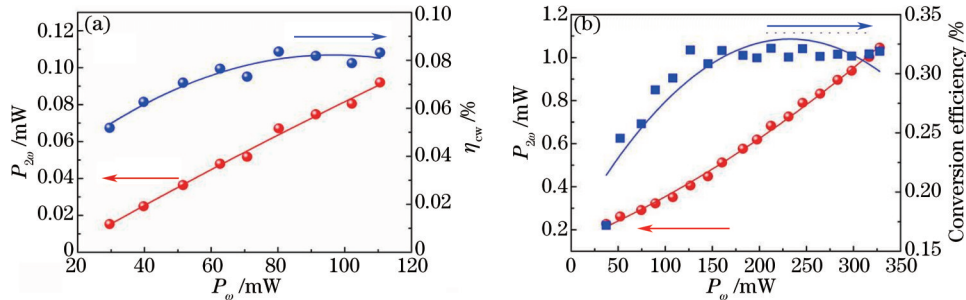


图 11 BiBO 晶体包层光波导(a)倍频绿光和(b)倍频紫光输出功率和转换效率随基频光功率的变化  
Fig.11 SHG output power and conversion efficiency of (a) green and (b) violet light versus the CW fundamental pump power of the cladding waveguides in BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> crystal

### 4.3 三维波导分支

波导分支器是集成光路中的基本元件之一, 它能够将 1 束光束平均分配到多个波导输出端口, 同时不会增加过多的损耗。飞秒激光直写的三维加工特性能够在晶体材料中制备三维波导分支器件。基于 I 类改性, 三维波导分支器可以很容易地在晶体中制备, 并且可以支持从可见光到中红外较宽波段的导波传输。图 12 是 BGO 晶体中制备的 1×4 的三维波导分支结构, 可以发现, 三维波导分支结构能够在 TE 和 TM 2 个偏振方向下支持中红外波段(4 μm)的导波的传输, 其输出端的近场光强分布说明了该结构具有良好的分支功能<sup>[94]</sup>。利用相似的方法在 Lü 等<sup>[95]</sup>在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中也制备了相似的结构, 实现了可见光(632.8 nm)和近红外波段(1064 nm)有效的三维波导分支功能。

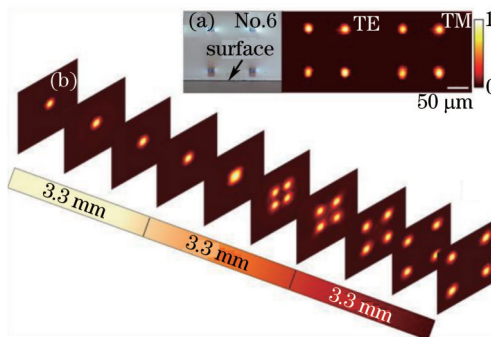


图 12 (a) BGO 晶体中波导分支结构的端面显微镜照片以及在 4 μm 波长下输出端的近场光强分布情况;  
(b) 模拟的 4 μm 的光束在波导分支结构传输过程中的演变过程

Fig.12 (a) Optical microscope image of the cross section and measured near-field intensity distributions at 4 μm of the 1×4 beam splitter in BGO; (b) simulated beam profile evolution for the 4 μm light propagating along beam splitter

对于基于 II 类改性的光波导, 利用六角形的类光子晶格包层导波微结构可以实现三维波导分束功能。图 13 为由 3 个不同的类光子晶格包层导波微结构组合而成的 1×4 三维波导分支结构, 插图 3 为 3 种结构的设计示

意图以及结构两端的模式分布图。可以发现,入射端的高斯光束经过该结构后分支成为4个单模的输出光束。

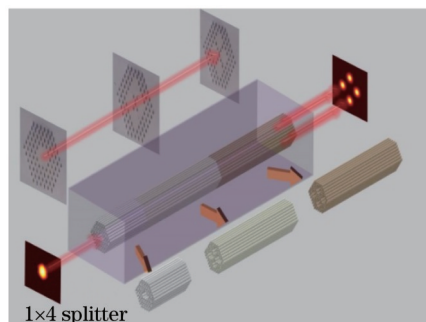


图13 3个类光子晶格包层导波微结构组合而成的1×4三维波导分支结构。插图分别为3种结构的设计示意图以及结构两端的模式分布图

Fig.13 Schematic of the 3-element structure for 1×4 beam splitting in a Nd:YAG crystal by femtosecond laser microfabrication. The insets illustrate the layouts of separate elements and the obtained beam profiles at the output ports

#### 4.4 电光调制

电光调制器可以调节信号光的参数,比如相位、强度和偏振等。基于光波导结构可以实现可集成电光调制器的制备。研究者利用飞秒激光直写LiNbO<sub>3</sub>晶体光波导实现了马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)的功能<sup>[39]</sup>。其中,Liao等<sup>[67]</sup>在x切MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体中制备了基于II类改性双线型光波导结构的MZI波导调制器,其电光重叠积分因子为0.95。Ringleb等<sup>[96]</sup>在单片LiNbO<sub>3</sub>晶体中实现了单片集成的频率转换器和光调幅器,其MZI部分也同样是基于II类双线型光波导结构。此调制器的电光重叠积分因子为0.16,半波电压为23 V。Horn等<sup>[97]</sup>报道了LiNbO<sub>3</sub>晶体中可调谐电光波导布拉格光栅结构的制备,利用II类双线型光波导结构制备的光栅周期为349.6 nm,该波导光栅结构在1550 nm波长下能够实现电光调制功能。

## 5 结论与展望

本文以简明的方式综述了国际上关于飞秒激光直写晶体光波导领域的研究进展。已有的研究表明,利用不同参数的飞秒激光脉冲可以在多种晶体材料中制备不同种类的波导结构,从而研制多功能的集成光子学器件,是实现三维集成光路的有效途径。而如何通过调整飞秒激光直写的参数和写入方法在不同晶体材料中高效地制备低损耗的波导结构一直是该领域中的研究热点。研究人员提出了一系列的方法来改进波导的性能,例如,利用螺旋状的飞秒激光扫描方式使得包层光波导的加工效率显著提高<sup>[46]</sup>,通过对飞秒激光直写光束的整形可以调控波导的模式、降低波导的损耗等<sup>[98-99]</sup>。基于目前的研究成果,通过与其他加工技术相结合,与其他基底介质(如石英玻璃等)相组合,可以实现功能更加强大、结构更加复杂的三维光子芯片,未来的工作可以在诸如空间光子学、光微流体学、量子计算等前沿领域开展。

致 谢 感谢西班牙Salamanca大学Javier R Vázquez de Aldana博士、英国Heriot-Watt大学Ajay K Kar教授对本论文相关研究工作的合作与帮助。

### 参 考 文 献

- 1 M L Calvo. Optical Waveguides: From Theory to Applied Technologies[M]. New York: CRC Press, 2007.
- 2 W Sohler, H Hu, R Ricken, *et al.*. Integrated optical devices in lithium niobate[J]. Opt Photon News, 2008, 19(1): 24-31.
- 3 C Grivas. Optically pumped planar waveguide lasers, part I: Fundamentals and fabrication techniques[J]. Prog Quantum Electron, 2011, 35(6): 159-239.
- 4 J L O'Brien, A Furusawa, J Vuckovic. Photonic quantum technologies[J]. Nat Photon, 2009, 3(12): 687-695.
- 5 H Schmidt, A R Hawkins. The photonic integration of non-solid media using optofluidics[J]. Nat Photon, 2011, 5(10): 598-604.
- 6 R O sellame, G Cerullo, R Ramponi. Femtosecond Laser Micromachining: Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials[M]. Berlin: Springer Press, 2012.
- 7 R R Gattass, E Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nat Photon, 2008, 2(4): 219-225.
- 8 Y Zhang, Q Chen, H Xia, *et al.*. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing[J]. Nano Today, 2010,

- 5(5): 435–448.
- 9 Y Shimotsuma, P G Kazansky, J R Qiu, *et al.*. Self-organized nanograting in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(24): 247405.
- 10 Y Li, Y P Dou, R An, *et al.*. Permanent computer-generated holograms embedded in silica glass by femtosecond laser pulses [J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2433–2438.
- 11 Y Cheng, K Sugioka, K Midorikawa. Microfluidic laser embedded in glass by three-dimensional femtosecond laser microprocessing[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(17): 2007–2009.
- 12 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.
- 13 M Ams, G D Marshall, P Dekker, *et al.*. Ultrafast laser written active devices[J]. *Laser Photon Rev*, 2009, 3(6): 535–544.
- 14 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.
- 15 A Zoubir, C Lopez, M Richardson, *et al.*. Femtosecond laser fabrication of tubular waveguides in poly (methyl methacrylate) [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(16): 1840–1842.
- 16 W Yang, P Kazansky, Y Svirko. Non-reciprocal ultrafast laser writing[J]. *Nat Photon*, 2008, 2(2): 99–104.
- 17 A G Okhrimchuk, A V shestakov, I Khrushchev, *et al.*. Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG: Nd<sup>3+</sup> crystal by femtosecond laser writing[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(17): 2248–2250.
- 18 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.
- 19 Bai Jing, Long Xuewen, Liu Xin, *et al.*. Femtosecond laser written waveguide in Yb<sup>3+</sup> phosphate glass and waveguide lasing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0432003.  
白晶, 龙学文, 刘欣, 等. 飞秒激光在掺 Yb<sup>3+</sup> 磷酸盐玻璃中写入光波导及波导激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0432003.
- 20 H Sun, F He, Z Zhou, *et al.*. Fabrication of microfluidic optical waveguides on glass chips with femtosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1536–1538.
- 21 D G Lancaster, S Gross, H Ebendorff, *et al.*. Fifty percent internal slope efficiency femtosecond direct-written Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN waveguide laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1587–1589.
- 22 G Marshall, A Politi, J Matthews, *et al.*. Laser written waveguide photonic quantum circuits[J]. *Opt Express*, 2009, 17(15): 12546–12554.
- 23 T T Fernandez, S M Eaton, G Della Valle, *et al.*. Femtosecond laser written optical waveguide amplifier in phospho-tellurite glass[J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20289–20297.
- 24 H Zhang, S Eaton, J Li, *et al.*. Femtosecond laser direct writing of multiwavelength Bragg grating waveguides in glass[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(23): 349–351.
- 25 V Apostolopoulos, L Laversenne, T Colomb, *et al.*. Femtosecond-irradiation-induced refractive-index changes and channel waveguiding in bulk Ti<sup>3+</sup>:Sapphire[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(7): 1122–1124.
- 26 L Gui, B 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.
- 27 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.
- 28 S Campbell, R R Thomson, D P Hand, *et al.*. Frequency-doubling in femtosecond laser inscribed periodically-poled potassium titanyl phosphate waveguides[J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 17146–17150.
- 29 S Zhang, J Yao, W Liu, *et al.*. Second-harmonic generation to green using ultrafast fibre source and femtosecond written periodically poled waveguide[J]. *Electron Lett*, 2010, 46(18): 1290–1291.
- 30 F M Bain, A A Lagatsky, R R Thomson, *et al.*. Ultrafast laser inscribed Yb:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> channel waveguide lasers[J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22417–22422.
- 31 S J Beecher, R R Thomson, D T Reid, *et al.*. Strain field manipulation in ultrafast laser inscribed BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> optical waveguides for nonlinear applications[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(23): 4548–4550.
- 32 T Calmano, J Siebenmorgen, F Reichert, *et al.*. Crystalline Pr:SrAl<sub>2</sub>O<sub>9</sub> waveguide laser in the visible spectral region[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(23): 4620–4622.

- 33 Y Jia, F Chen, J R Vazquez de Aldana. Efficient continuous-wave laser operation at 1064 nm in Nd:YVO<sub>4</sub> cladding waveguides produced by femtosecond laser inscription[J]. Opt Express, 2012, 20(15): 16801–16806.
- 34 Y Tan, A Rodenas, F Chen, *et al.*. 70% slope efficiency from an ultrafast laser-written Nd:GdVO<sub>4</sub> channel waveguide laser [J]. Opt Express, 2010, 18(24): 24994–24999.
- 35 N N Dong, Y Tan, A Benayas, *et al.*. Femtosecond laser writing of multifunctional optical waveguides in a Nd:YVO<sub>4</sub>+KTP hybrid system[J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 975–977.
- 36 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.
- 37 N N Dong, J M de Mendivil, E Cantelar, *et al.*. Self-frequency-doubling of ultrafast laser inscribed neodymium doped yttrium aluminum borate waveguides[J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(18): 181103.
- 38 T Calmano, S Müller. Crystalline waveguide lasers in the visible and near-infrared spectral range[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2015, 21(1): 1602213.
- 39 F Chen, J R Vazquez de Aldana. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining[J]. Laser Photon Rev, 2014, 8(2): 251–275.
- 40 D Choudhury, J R Macdonald, A K Kar. Ultrafast laser inscription: Perspectives on future integrated applications[J]. Laser Photon Rev, 2014, 8(6): 827–846.
- 41 J U Thomas, M Heinrich, P Zeil, *et al.*. Laser direct writing: Enabling monolithic and hybrid integrated solutions on the lithium niobate platform[J]. Phys Status Solidi A, 2011, 208(2): 276–283.
- 42 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.
- 43 S Gross, M Dubov, M J Withford. On the use of the Type I and II scheme for classifying ultrafast laser direct-write photonics [J]. Opt Express, 2015, 23(6): 7767–7770.
- 44 Y Jia, C Cheng, J R Vazquez de Aldana, *et al.*. Monolithic crystalline cladding microstructures for efficient light guiding and beam manipulation in passive and active regimes[J]. Sci Rep, 2014, 4:5988.
- 45 G Salamu, F Jipa, M Zamfirescu, *et al.*. Cladding waveguides realized in Nd:YAG ceramic by direct femtosecond-laser writing with a helical movement technique[J]. Opt Mater Express, 2014, 4(4): 790–797.
- 46 A Rodenas, A Benayas, J R Macdonald, *et al.*. Direct laser writing of near-IR step-index buried channel waveguides in rare earth doped YAG[J]. Opt Lett, 2011, 36(17): 3395–3397.
- 47 G A Torchia, A Rodenas, A Benayas, *et al.*. Highly efficient laser action in femtosecond-written Nd:yttrium aluminum garnet ceramic waveguides[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(11): 111103.
- 48 J Siebenmorgen, K Petermann, G Huber, *et al.*. Femtosecond laser written stress-induced Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Nd:YAG) channel waveguide laser[J]. Appl Phys B, 2009, 97(2): 251–255.
- 49 T Calmano, J Siebenmorgen, O Hellmig, *et al.*. Nd:YAG waveguide laser with 1.3 W output power, fabricated by direct femtosecond laser writing[J]. Appl Phys B, 2010, 100(1): 131–135.
- 50 H Liu, Y Jia, J R Vazquez de Aldana, *et al.*. Femtosecond laser inscribed cladding waveguides in Nd:YAG ceramics: Fabrication, fluorescence imaging and laser performance[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 18620–18629.
- 51 Y Ren, G Brown, A Rodenas, *et al.*. Mid-infrared waveguide lasers in rare-earth-doped YAG[J]. Opt Lett, 2012, 37(16): 3339–3341.
- 52 Tang Wenlong, Song Qiongge, Xu Qing'an, *et al.*. Study on writing of double line waveguide in Yb:YAG with ultrafast laser [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1232002.  
唐文龙, 宋琼阁, 徐庆安, 等. 超快激光在 Yb:YAG 内刻写双线型光波导的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1232002.
- 53 W F Silva, C Jacinto, A Benayas, *et al.*. Femtosecond-laser-written, stress-induced Nd:YVO<sub>4</sub> waveguides preserving fluorescence and Raman gain[J]. Opt Lett, 2010, 35(7): 916–918.
- 54 Y Ren, N Dong, J Macdonald, *et al.*. Continuous wave channel waveguide lasers in Nd:LuVO<sub>4</sub> fabricated by direct femtosecond laser writing[J]. Opt Express, 2012, 20(3): 1969–1974.
- 55 Y Jia, F Chen, J R Vazquez de Aldana. Efficient continuous-wave laser operation at 1064 nm in Nd:YVO<sub>4</sub> cladding waveguides produced by femtosecond laser inscription[J]. Opt Express, 2012, 20(15): 16801–16806.
- 56 Y Tan, Y Jia, F Chen, *et al.*. Simultaneous dual-wavelength lasers at 1064 nm and 1342 nm in femtosecond-laser-written Nd:YVO<sub>4</sub> channel waveguides[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(7): 1607–1610.

- 57 J Bai, G Cheng, X Long, *et al.*. Polarization behavior of femtosecond laser written optical waveguides in Ti: Sapphire[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15035–15044.
- 58 A Benayas, D Jaque, B McMillen, *et al.*. Thermal stability of microstructural and optical modifications induced in Sapphire by ultrafast laser filamentation[J]. *J Appl Phys*, 2010, 107(3): 033522.
- 59 C Grivas, C Corbari, G Brambilla, *et al.*. Tunable, continuous-wave Ti: Sapphire channel waveguide lasers written by femtosecond and picosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22): 4630–4632.
- 60 Liu Shuang, Liu Xin, Tang Wenlong, *et al.*. Study of Ti: Sapphire double line waveguide written by femtosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203001.  
刘爽, 刘欣, 唐文龙, 等. 飞秒激光在钛蓝宝石晶体中刻写双线型波导的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203001.
- 61 L Gui, B 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.
- 62 J Burghoff, S Nolte, A Tunnermann. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Appl Phys A*, 2007, 89(1): 127–132.
- 63 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.
- 64 M Tejerina, G A Torchia. MATFESA: Strain and refractive index field estimation after femtosecond laser interaction with transparent material[J]. *Appl Phys A*, 2013, 110(3): 591–594.
- 65 Y L Lee, N E Yu, C Jung, *et al.*. Second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate waveguides fabricated by femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(17): 171103.
- 66 A Rodenas, A H Nejadmalayeri, D Jaque, *et al.*. Confocal Raman imaging of optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub> fabricated by ultrafast high-repetition rate laser-writing[J]. *Opt Express*, 2008, 16(18): 13979–13989.
- 67 Y Liao, J Xu, Y Cheng, *et al.*. Electro-optic integration of embedded electrodes and waveguides in LiNbO<sub>3</sub> using a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(19): 2281–2283.
- 68 J Thomas, M Heinrich, J Burghoff, *et al.*. Femtosecond laser-written quasi-phase-matched waveguides in lithium niobate[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(15): 151108.
- 69 A Rodenas, L M Maestro, M O Ramirez, *et al.*. Anisotropic lattice changes in femtosecond laser inscribed Nd<sup>3+</sup>: MgO: LiNbO<sub>3</sub> optical waveguides[J]. *J Appl Phys*, 2009, 106(1): 013110.
- 70 M Heinrich, A Szameit, F Dreisow, *et al.*. Evanescent coupling in arrays of type II femtosecond laser-written waveguides in bulk-cut lithium niobate[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(10): 101111.
- 71 R He, Q An, Y Jia, *et al.*. Femtosecond laser micromachining of lithium niobate depressed cladding waveguides[J]. *Opt Mater Express*, 2013, 3(9): 1378–1384.
- 72 F Laurell, T Calmano, S Muller, *et al.*. Laser-written waveguides in KTP for broadband Type II second harmonic generation[J]. *Opt Express*, 2012, 20(20): 22308–22313.
- 73 Y Wang, V Petrov, Y J Ding, *et al.*. Ultrafast generation of blue light by efficient second-harmonic generation in periodically-poled bulk and waveguide potassium titanyl phosphate[J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(7): 873–875.
- 74 N Dong, F Chen, J R Vazquez de Aldana. Efficient second harmonic generation by birefringent phase matching in femtosecond laser inscribed KTP cladding waveguides[J]. *Phys Status Solidi Rapid Res Lett*, 2012, 6(7): 306–308.
- 75 Y Jia, J R Vazquez de Aldana, C Romero, *et al.*. Femtosecond-laser-inscribed BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> nonlinear cladding waveguide for second-harmonic generation[J]. *Appl Phys Express*, 2012, 5(7): 072701.
- 76 Y Jia, J R Vazquez de Aldana, Q Lu, *et al.*. Second harmonic generation of violet light in femtosecond-laser-inscribed BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> cladding waveguides[J]. *Opt Mater Express*, 2013, 3(9): 1279–1284.
- 77 D Jaque, N D Psaila, R R Thomson, *et al.*. Ultrafast laser inscription of bistable and reversible waveguides in strontium barium niobate crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(19): 191104.
- 78 B Qian, Y Liao, G Dong, *et al.*. Femtosecond laser-written waveguides in a bismuth germanate single crystal[J]. *Chin Phys Lett*, 2009, 26(7): 070601.
- 79 R He, Q An, J R Vazquez de Aldana, *et al.*. Femtosecond-laser micromachined optical waveguides in Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> crystals[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(16): 3713–3716.
- 80 T Gorelik, M Will, J Burghoff, *et al.*. Transmission electron microscopy studies of femtosecond laser induced modifications in quartz[J]. *Appl Phys A*, 2003, 76(3): 309–311.

- 81 Y Ren, F Chen, J R Vazquez de Aldana. Near-infrared lasers and self-frequency-doubling in Nd:YCOB cladding waveguides [J]. *Opt Express*, 2013, 21(9): 11562–11567.
- 82 S Muller, T Calmano, P Metz, *et al.*. Femtosecond-laser-written diode-pumped Pr:LiYF<sub>4</sub> waveguide laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(24): 5223–5225.
- 83 H Liu, Y Jia, F Chen, *et al.*. Continuous wave laser operation in Nd:GGG depressed tubular cladding waveguides produced by inscription of femtosecond laser pulses[J]. *Opt Mater Express*, 2013, 3(2): 278–283.
- 84 Y Ren, J R Vazquez de Aldana, *et al.*. Channel waveguide lasers in Nd:LGS crystals[J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 6503–6508.
- 85 W Nie, C Cheng, Y Jia, *et al.*. Dual-wavelength waveguide lasers at 1064 and 1079 nm in Nd:YAP crystal by direct femtosecond laser writing[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(10): 2437–2440.
- 86 T Calmano, J Siebenmorgen, A Paschke, *et al.*. Diode pumped high power operation of a femtosecond laser inscribed Yb:YAG waveguide laser[J]. *Opt Mater Express*, 2011, 1(3): 428–433.
- 87 A G Okhrimchuk, P A Obratsov. 11-GHz waveguide Nd:YAG laser CW mode-locked with single-layer grapheme[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 11172.
- 88 Y Tan, Q Luan, F Liu, *et al.*. Q-switched pulse laser generation from doublecladding Nd:YAG ceramics waveguides[J]. *Opt Express*, 2013, 21(16): 18963–18968.
- 89 Y Tan, R He, J Macdonald, *et al.*. Q-switched Nd:YAG channel waveguide laser through evanescent field interaction with surface coated grapheme[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(10): 101111.
- 90 Y Ren, G Brown, R Mary, *et al.*. 7.8 GHz Graphene-based 2 μm monolithic waveguide laser[J]. *IEEE J Sel Top Quant Electron*, 2015, 21(1): 395–400.
- 91 Y Tan, Y Yao, J R Macdonald, *et al.*. Self-Q-switched waveguide laser based on femtosecond laser inscribed Nd:Cr:YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(18): 5289–5292.
- 92 H Liu, Y Tan, J R Vázquez de Aldana, *et al.*. Efficient laser emission from cladding waveguide inscribed in Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal by direct femtosecond laser writing[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(15): 4553–4556.
- 93 Z Huang, C Tu, S Zhang, *et al.*. Femtosecond second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate waveguides written by femtosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(6): 877–879.
- 94 R He, I Hernandez-Palmero, C Romero, *et al.*. Three-dimensional dielectric crystalline waveguide beam splitters in mid-infrared band by direct femtosecond laser writing[J]. *Opt Express*, 2014, 22(25): 31293–31298.
- 95 J Lü, Y Cheng, W Yuan, *et al.*. Three-dimensional femtosecond laser fabrication of waveguide beam splitters in LiNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Opt Mater Express*, 2015, 5(6): 1274–1280.
- 96 S Ringleb, K Rademaker, S Nolte, *et al.*. Monolithically integrated optical frequency converter and amplitude modulator in LiNbO<sub>3</sub> fabricated by femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys B*, 2011, 102(1): 59–63.
- 97 W Horn, S Kroesen, J Herrmann, *et al.*. Electro-optical tunable waveguide Bragg gratings in lithium niobate induced by femtosecond laser writing[J]. *Opt Express*, 2012, 20(24): 26922–26928.
- 98 F He, H Xu, Y Cheng, *et al.*. Fabrication of microfluidic channels with acircular cross section using spatiotemporally focused femtosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(7): 1106–1108.
- 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.

栏目编辑: 王晓琰