

飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究

廖常锐, 何俊, 王义平*

深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 光纤布拉格光栅具有体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、传感灵敏度高、可实现准分布式测量等优点, 是一种重要的光纤传感器件。传统紫外激光制备光纤布拉格光栅时需要将光纤进行载氢预处理, 这种方法制备的光纤光栅热稳定较差, 无法用于极端高温环境。近年来, 随着飞秒激光在玻璃材料微加工领域研究的深入, 研究人员开始将飞秒激光应用于光纤光栅的研制, 飞秒激光制备光纤光栅具有更好的加工灵活性, 无需对光纤进行载氢预处理, 也无需剥除光纤涂覆层, 而且飞秒激光光栅具有极佳的高温稳定性。介绍了光纤光栅的飞秒激光加工机理, 以及三种典型的光纤光栅飞秒激光制备方法, 综述了飞秒光纤布拉格光栅在高温传感领域的研究进展。

关键词 传感器; 激光材料处理; 超快激光; 光纤布拉格光栅; 光纤传感器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328009

Study on High Temperature Sensors Based on Fiber Bragg Gratings Fabricated by Femtosecond Laser

Liao Changrui, He Jun, Wang Yiping

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province,
College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Fiber Bragg grating is an important optical fiber sensor, which has the advantages of small size, corrosion resistance, anti-electromagnetic interference, high sensitivity and quasi-distributed measurement. Traditional fiber Bragg gratings fabricated by ultraviolet laser usually require hydrogen loading to the fiber and their poor thermal stability restricts the use in extremely high temperature environment. In recent years, with the research development in the field of femtosecond laser micromachining of glass, researchers begin to use femtosecond laser to fabricate fiber gratings. Fiber grating inscription by femtosecond laser shows good machining flexibility, no requirement of hydrogen loading and polymer coating stripping, and more importantly, femtosecond laser inscribed fiber grating shows excellent high temperature stability. The machining mechanism of femtosecond laser inscription for fiber grating and three typical optical fiber Bragg grating femtosecond laser preparation methods are introduced. At last, the research progress of high temperature sensors based on femtosecond laser induced fiber Bragg gratings is reviewed.

Key words sensors; laser materials processing; ultrafast lasers; fiber Bragg gratings; fiber optical sensors

OCIS codes 280.3420; 060.2370; 060.3735; 140.3390; 320.7090

1 引 言

加拿大通信研究中心的 Hill 等^[1]于 1978 年研制出世界上第一支光纤布拉格光栅(FBG)。经过近 40 年的技术发展, 光纤布拉格光栅已广泛应用于光通信网络、光纤激光器和光纤传感等多个领域, 获得了极大的应用价值和商业价值。传统紫外激光制备

的光纤布拉格光栅热稳定性差, 高温条件下易被擦除, 需要繁琐的光纤载氢预处理, 因此难以满足极端高温环境中的应用需求。为了提升光纤布拉格光栅的高温性能, 研究人员一直在探索和改进光纤布拉格光栅的制备工艺, 高功率飞秒激光一直被广泛应用于对玻璃材料的微纳加工, 因其具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率, 可以在玻璃材料中诱导产

收稿日期: 2017-11-18; 收到修改稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61425007, 61635007, 61575128)

作者简介: 廖常锐(1984—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感、飞秒激光微纳加工、光微流、光波导等方面的研究。E-mail: cliao@szu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ypwang@szu.edu.cn

生较大的折射率调制。飞秒激光于 2001 年首次被用于光纤布拉格光栅的制备^[2],自此飞秒激光制备光纤布拉格光栅的研究得到快速发展。本文从光纤布拉格光栅的飞秒激光加工机理、飞秒激光加工方法和高温传感应用这三个方面对近年来国内外的相关研究工作进行综述,并展望飞秒激光制备光纤布拉格光栅传感器的未来发展方向。

2 光纤光栅的飞秒激光加工机理

传统光纤布拉格光栅是借助空间调制的紫外激光束照射载氢的光敏光纤而获得,而飞秒激光脉冲借助极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,可以在石英光纤内诱导获得较大的折射率调制从而形成光纤光栅。图 1 描述了飞秒激光在玻璃内诱导产生折射率调制的加工机理^[3]。当飞秒激光通过高数值孔径 (NA) 的物镜聚焦在玻璃内部,激光焦点处极强的激光场将引发玻璃对激光的非线性吸收(非线性场

电离和雪崩电离),导致在激光焦点处聚集大量的电子-离子等离子体,随着等离子体的结合和能量消耗,玻璃内就形成了永久性的折射率调制。折射率调制类型与入射激光光强相关:

1) 当入射光强较低时,激光作用区材料会发生局部熔化并迅速凝固,材料改性表现为一种各向同性的折射率调制,激光作用区材料的折射率和密度将有所增加,利用这一性质可以在玻璃内部直写光波导;

2) 当入射光强较高时,激光作用区会发生等离子体爆炸从而形成微孔或裂纹,材料改性表现为一种中空且四周密度高的腔型结构;

3) 当入射光强介于两者之间时,激光作用区域会形成一种折射率呈亚波长周期分布的有序结构,通常称之为纳米光栅,纳米光栅的条纹方向与飞秒激光偏振方向相互垂直,材料改性表现出显著的光学双折射效应。

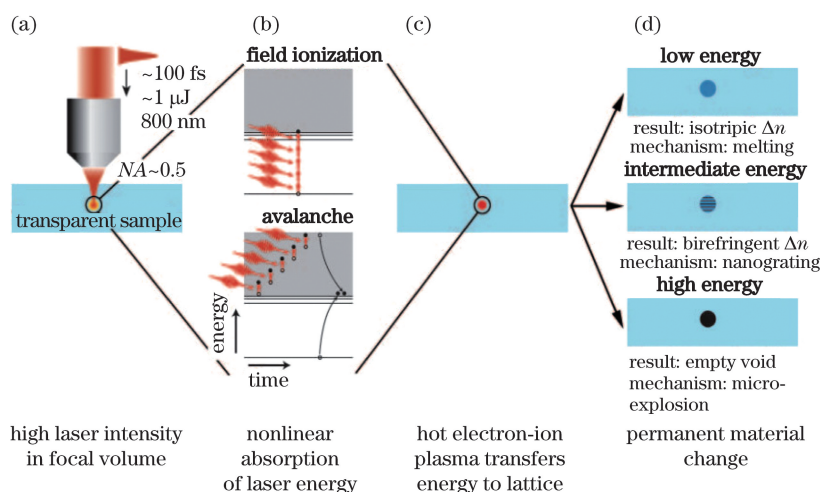


图 1 飞秒激光在玻璃内加工的三种折射率调制类型^[3]

Fig. 1 Three types of refractive index modulation in glass induced by femtosecond laser^[3]

3 光纤布拉格光栅的飞秒激光加工方法

目前已报道的光纤布拉格光栅的飞秒激光加工方法有:飞秒激光全息干涉法、飞秒激光相位掩模法和飞秒激光直写法。

3.1 飞秒激光全息干涉法

飞秒激光全息干涉法是将飞秒激光光束首先分为两束相干光,然后会聚形成全息干涉图样,将光纤置于全息干涉区域,利用干涉条纹的光强分布在光纤中引入周期性的折射率调制,形成光纤布拉格光栅。日本庆应义塾大学 Oi 等^[2]于 2001 年首次利用近红外飞秒激光全息干涉法在光纤中制备了周期为 $1.45 \mu\text{m}$ 的光纤布拉格光栅。德国耶拿光子技术研

究所 Becker 等^[4]于 2008 年利用深紫外飞秒激光(波长 262 nm)和塔尔伯特干涉仪实现了光纤布拉格光栅的全息干涉写制,图 2 是基于深紫外飞秒激光和塔尔伯特干涉仪搭建的全息干涉法示意图,图中 SHG 为二次谐波产生装置,THG 为三次谐波产生装置。通过控制旋转反射镜改变两束相干光的会聚角度,可以精确调节干涉条纹的间距,从而获得不同周期的光纤布拉格光栅。虽然全息干涉法的加工灵活性很好,但是为了获得高质量的全息干涉图样,两相干光束的光学距离需要在飞秒脉冲的空间宽度内相匹配,对于百飞秒脉宽的飞秒激光脉冲而言,时间相干长度仅为几十微米,对光束干涉装置的重复性和调准方面的要求极高。

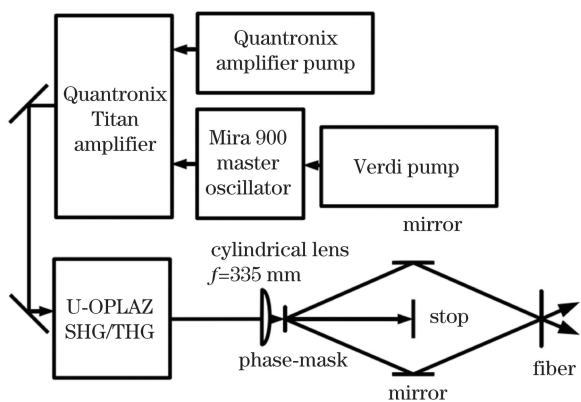


图 2 飞秒激光全息干涉法制备光纤布拉格光栅装置示意图^[4]

Fig. 2 Schematic diagram of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser holographic interferometry^[4]

3.2 飞秒激光相位掩模法

飞秒激光相位掩模法与传统相位掩模法类似，只是曝光光源改为飞秒激光。飞秒激光光束经过相位掩模板后发生衍射，如图 3 所示。第 n 级衍射光束的衍射角 θ_n 满足：

$$\sin \theta_n - \sin \theta_i = n\lambda_0 / \Lambda_{PM}, \quad (1)$$

式中 θ_n 为入射角， λ_0 为激光波长， Λ_{PM} 为相位掩模板周期。各级衍射光束在交叠区域发生干涉，形成明暗交替的干涉条纹，在平行于相位掩模的方向上，干涉条纹周期 $\Lambda = \Lambda_{PM} / |p - q|$ ，其中 p 和 q 代表参与干涉的两束衍射光的级次。相位掩模法刻写光纤光栅通常采用 ± 1 级衍射光参与干涉，因此光纤布拉格光栅周期等于干涉条纹周期（也就是相位掩模板周期的一半）。

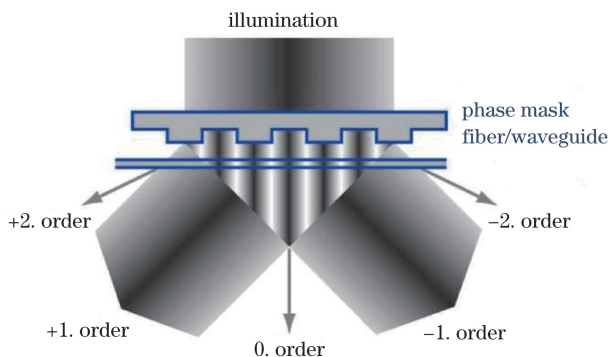


图 3 飞秒激光相位掩模法制备光纤布拉格光栅示意图^[5]

Fig. 3 Schematic diagram of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser phase-mask technique^[5]

加拿大通信研究中心的 Mihailov 等^[6]于 2003 年首次利用近红外飞秒激光与优化的相位掩模板在通信 SMF-28 光纤 (SMF 表示单模光纤) 中制备出光纤布拉格光栅，峰值功率为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 的

曝光条件下诱导的折射率调制可达 1.9×10^{-3} ，光栅在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境中维持两周后仍然稳定存在。之后，Grobnic 等^[7]又研究了抑制包层模耦合问题，利用飞秒激光束垂直扫描和衍射级分离效应的方法，在 SMF-28 光纤中制备了纤芯和包层均被覆盖的高质量光栅，这样就使得纤芯中的 LP_{01} 模式完全包覆在纤芯-包层的光栅结构中，几乎完全抑制了包层模耦合。目前，从事飞秒激光相位掩模法制备光纤布拉格光栅的研究单位有：加拿大通信研究中心、德国耶拿大学、香港理工大学、深圳大学、吉林大学等。He 等^[8]系统研究了光纤载氢对飞秒激光制备效率和光栅光谱的影响。图 4 比较了有/无载氢处理的光纤布拉格光栅的透/反射光谱和偏振相关损耗 (PDL)，实验发现光纤载氢可以有效提升激光刻栅效率，并且抑制光栅的偏振相关损耗 (无载氢时的偏振相关损耗高达 5.89 dB，载氢后降至 0.31 dB)，当光纤光栅用于光通信系统中，低偏振相关损耗非常重要。图 4 中 IL 为插损。

飞秒激光相位掩模法制备光纤布拉格光栅时，光束干涉图案尺寸受到光斑直径的限制，光栅区长度无法超过光斑直径。为了解决这一问题，德国耶拿大学应用物理研究所 Thomas 等^[9]提出了动态相位掩模法 (光纤与掩模板之间位置固定不动，相对于激光光束一起匀速平移扫描)，这种方法可以刻写任意长度的光纤布拉格光栅，Wikszak 等^[10]利用该方法在高掺铒光纤中成功刻写出长度为 40 mm 的光纤布拉格光栅，并作为激光谐振腔镜实现了集成式光纤激光器。飞秒激光相位掩模法的制备工艺简单、重复性好、成品率高，是目前研究和应用最广泛的飞秒光纤光栅制备方法，其不足之处在于每个相位掩模只能加工同一种规格的光纤光栅，加工灵活性较差。

3.3 飞秒激光直写法

飞秒激光直写法制备光纤布拉格光栅分为两种形式：逐点法和线扫描法。图 5 是飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅的系统示意图，借助高数值孔径的油浸物镜将飞秒激光束聚焦在纤芯中，飞秒激光脉冲的重频为 f ；将光纤沿着垂直激光束的方向匀速运动，光纤运动速度为 v ，那么每个激光脉冲将依次作用在光纤纤芯的不同位置，每个激光脉冲作用点会形成一个光栅单元，相邻两个激光脉冲作用点的间距就是光纤光栅的周期 $\Lambda = v/f$ ，通过调节光纤运动速度或飞秒激光脉冲的重频都可以灵活改变光纤光栅的周期，实现光纤光

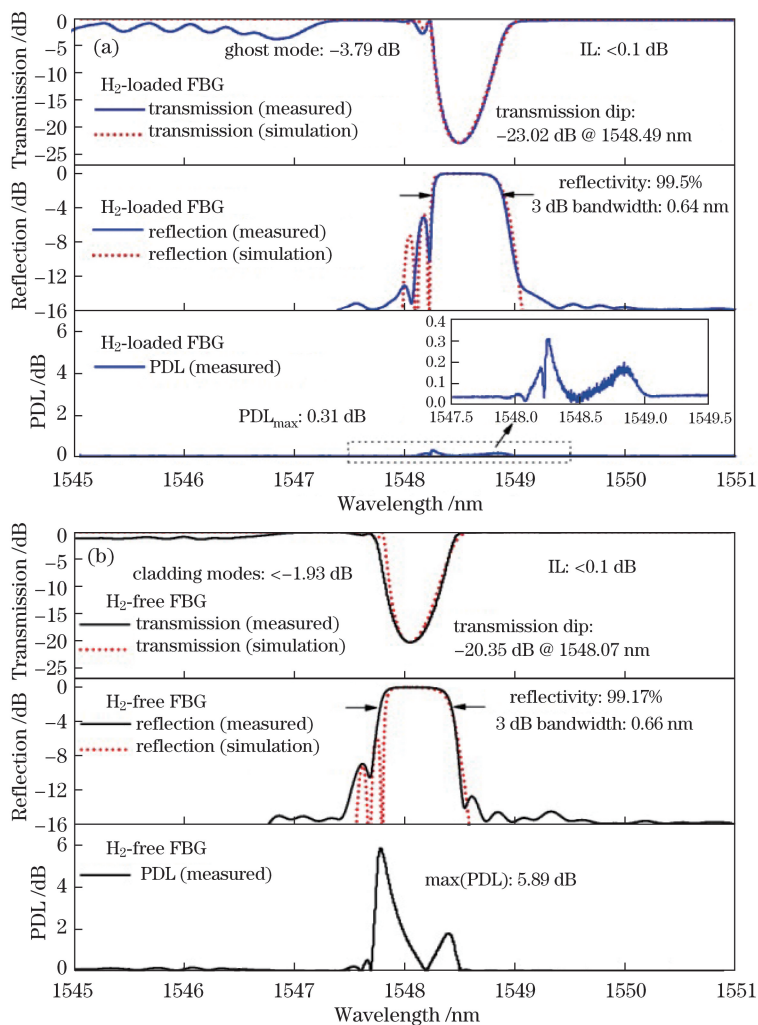


图 4 (a)载氢和(b)无载氢光纤布拉格光栅的光谱和 PDL^[8]

Fig. 4 Spectra and PDL of (a) H₂-loaded and (b) H₂-free fiber Bragg gratings^[8]

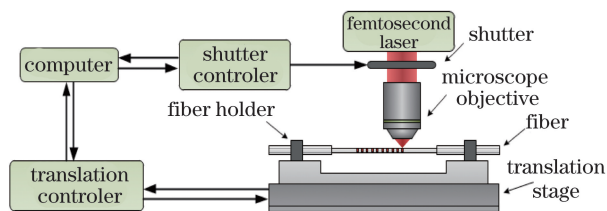


图 5 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅的加工系统

Fig. 5 Processing system of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser point-by-point inscription

栅的定制化加工。

英国阿斯顿大学的 Martinez 等^[11]于 2004 年首次采用近红外飞秒激光在通信用单模光纤和色散补偿光纤中成功实现了光纤布拉格光栅的逐点刻写。目前,从事飞秒激光逐点刻写光纤光栅的研究单位有:英国阿斯顿大学、加拿大多伦多大学、澳大利亚麦考瑞大学、深圳大学等。Liao 等^[12]于 2016 年利用飞秒激光逐点法在单模光纤和 D 型光纤中刻写出布拉格光栅结构,实验发现逐点光栅会呈现出显

著的包层模式耦合包络,每组包络对应一组包层模式,这种光谱特性与倾斜光栅十分类似。张等^[13]于 2016 年利用改进的飞秒激光逐点法成功在单模光纤中制备出取样光栅。取样方案如图 6(a)所示,通过控制高速快门的周期性开关,可以精确控制光纤光栅的取样参数(取样片段数 N 、取样占空比 T 、取样长度 L_p)。图 6(b)比较了不同取样参数下的反射光谱(虚线为仿真结果,实线为实验结果),可以看到实验与仿真结果非常吻合。这种取样光栅的多波长反射特性有望用于多波长光纤激光器研究。

Lin 等^[14]于 2017 年利用飞秒激光直写法在单模光纤中加工获得光纤表面布拉格光栅结构。实验中采用近红外飞秒激光在单模光纤内直写波导,将纤芯中的光能量耦合至光纤表面,然后利用飞秒激光逐点法在光纤表面波导中继续加工布拉格光栅结构,实现了明显的布拉格谐振效应。由于光纤表面

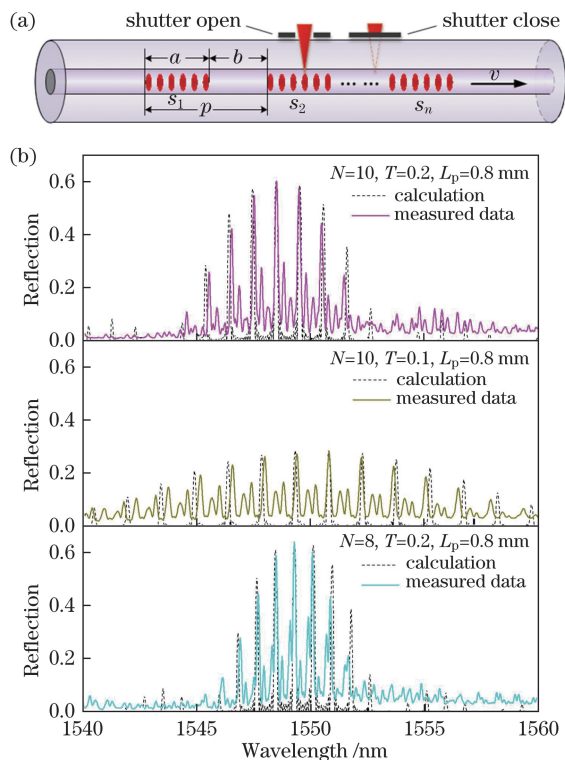


图 6 (a) 飞秒激光逐点法制备取样光纤布拉格光栅的加工原理；
 (b) 不同取样参数下的光纤布拉格光栅光谱^[13]
 Fig. 6 (a) Processing principle of sampled fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser point-by-point inscription;
 (b) spectra of sampled fiber Bragg gratings with different sampling parameters^[13]

波导十分接近光纤的边缘,展现出显著的倏逝场特性,实验观察到光纤表面光栅的谐振波长对外界环境折射率具有良好的响应,有望用于高灵敏度的生化传感领域。该课题组目前正在开展基于逐点法的串联与并联光纤光栅的研究,光栅结构如图 7 所示。通过改变光栅的刻写速度,可以沿着光纤轴向依次刻写出一系列的不同波长的光栅片段,可用于波分复用的分布式传感系统;也可以控制刻写速度,在同一段光纤纤芯的不同位置处依次刻写若干相同或不同波长的光栅片段,可用于实现超短光栅或多波长光栅。

飞秒激光逐点法具有较高的加工效率,但基于这种方法制备的光纤光栅通常表现出较大的偏振相关损耗以及较大的器件插损,为了克服以上问题,英国阿斯顿大学 Zhou 等^[15]于 2010 年首次提出了飞秒激光线扫描技术并成功制备出高反射率、低偏振相关和低插损的光纤布拉格光栅。图 8 描述了飞秒激光线扫描法的加工原理,飞秒激光通过高数值孔径的物镜聚焦于纤芯附近,高精密度二维电动平台承载着光纤按照光栅轨迹高速移动,从而在纤芯中实

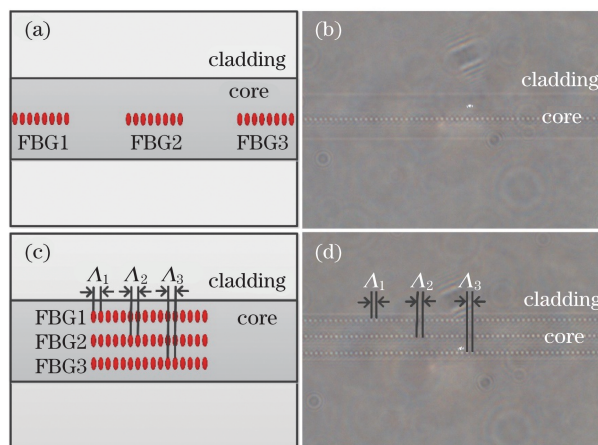


图 7 飞秒激光逐点法制备串联光纤布拉格光栅的 (a) 示意图和 (b) 光学显微图;飞秒激光逐点法制备并联光纤布拉格光栅的 (c) 示意图和 (d) 光学显微图
 Fig. 7 (a) Schematic diagram and (b) optical microscope image of the series fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser point-by-point inscription; (c) schematic diagram and (d) optical microscope image of the parallel fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser point-by-point inscription

现周期性的线型调制。华中科技大学 Huang 等^[16]于 2016 年利用飞秒激光线扫描技术在单模光纤中成功制备出具有高双折射特性的相移布拉格光栅结构,实验中光栅光谱表现出显著的偏振相关性,当入射光以 45° 偏振条件入射时,单个相移峰会分裂为两个强度相近的反射峰,反射峰强度对光纤的扭曲方向和扭曲角度呈现出规律性的响应,基于此结构实现了一种对应变和温度不敏感的扭曲传感器。

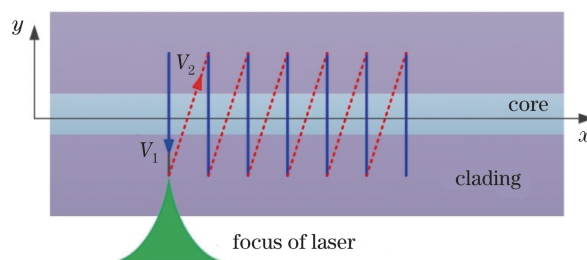


图 8 飞秒激光线扫描法制备光纤布拉格光栅原理图
 Fig. 8 Schematic diagram of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser line-by-line inscription

澳大利亚麦考瑞大学 Williams 等^[17]于 2013 年提出了一种基于压电振动台的连续扫描法来制备光纤布拉格光栅。图 9 描述了该方法的加工原理,飞秒激光通过高数值孔径的物镜聚焦于纤芯,一维压电振动台承载着光纤按照设定频率和波形上下振动,与此同时另外一个一维高精密度位移平台拖动该

光纤匀速移动,在两组平台的组合运动下,飞秒激光得以在纤芯位置刻写正弦型的连续调制线。这种方法制备的光纤布拉格光栅具有低插损(约 0.1 dB)和高反射率,与相位掩模法制备的光栅光谱类似,并且这种连续扫描技术可实现大范围的材料改性,这对于在大模场光纤中制备光纤光栅是非常有帮助的。

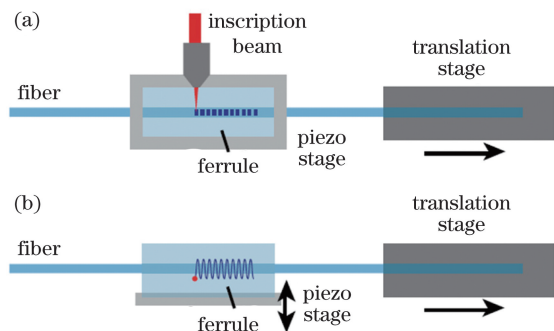


图 9 飞秒激光连续扫描法制备光纤布拉格光栅原理图^[17]。

(a)顶视图;(b)侧视图

Fig. 9 Schematic diagram of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser continuous scanning inscription^[17].

(a) Top view; (b) side view

4 飞秒光纤光栅高温传感器

飞秒激光制备光纤光栅最显著的优势在于这种方法获得的光纤光栅具有极佳的高温稳定性,尤其适合极端环境中(航空航天、石油化工、电力工业等)的特殊传感应用。早在 2003 年,研究人员就发现这种光纤光栅可以在 300 °C 的高温环境下保持稳定^[6]。2004 年,基于飞秒激光逐点刻写法制备的光纤布拉格光栅将其高温稳定性进一步提高至 900 °C^[11]。飞秒光纤光栅的高温稳定性主要取决于光纤材料折射率调制的类型和程度,根据高温稳定性表现可将飞秒光纤光栅分为 Type I 型和 Type II 型^[18]。图 10 对比了 Type I 型和 Type II 型光纤布拉格光栅的形貌,Type I 型光栅的折射率调制与紫外激光诱导掺锗石英光纤发生折射率调制的机制类似,因此其高温稳定性较差;Type II 光栅的折射率调制是基于材料的永久性损伤,其折射率调制幅度大于 10^{-3} ,这类光栅高温稳定性极佳,通常可以耐受 1000 °C 的高温。

提升飞秒光纤光栅的高温极限是一项极具挑战性的工作,纯石英的玻璃化转变温度 T_g 约为 1330 °C,但石英光纤内的材料掺杂会在一定程度上降低其玻璃化转变温度,例如在通信单模光纤上制备的飞秒光纤光栅的极限温度仅为 1050 °C^[19]。Li

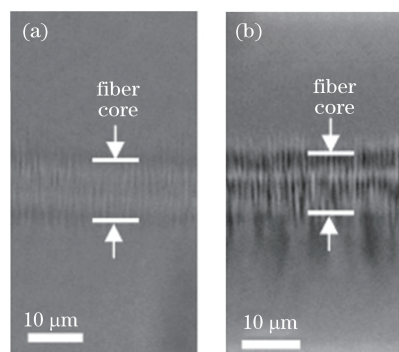


图 10 (a) Type I 和(b) Type II 飞秒激光光纤布拉格光栅的形貌特性^[18]

Fig. 10 Morphology of (a) Type I and (b) Type II femtosecond laser fiber Bragg gratings^[18]

等^[20]实验研究了光纤内残余应力与光纤光栅高温稳定性的内在关系,首先对通信单模光纤进行高温退火处理以消除光纤内的残余应力,再利用飞秒激光相位掩模法刻写 Type II 型光纤光栅,这种方法获得的光纤光栅表现出了更好的高温稳定性。图 11 描述了这种光纤光栅在 1200 °C 的高温环境下连续工作 20 h 的情况,光栅性能稳定且反射率退化不明显。虽然光纤预退火可以有效提升飞秒光纤光栅的高温稳定性,但是经过退火处理的光纤变得十分易碎,不利于之后光纤光栅的刻写以及测试。为了解决这一问题,Li 等^[21]继续研究了飞秒光纤光栅的后处理方法以增强其高温稳定性,通过对 Type II 型飞秒光纤光栅进行高温退火和快速空气淬火在光纤中引入压缩残余应力,实现了 1200 °C 的高温稳定并保持了较好的光栅机械强度。

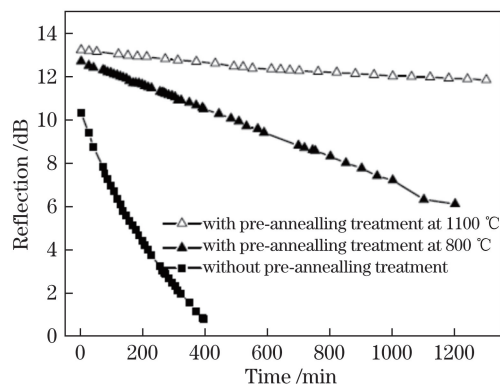


图 11 有/无预退火的 Type II 型光纤布拉格光栅在 1200 °C 下连续工作 20 h 的反射率演化关系^[20]

Fig. 11 Reflectivity evolution relationship of Type II fiber Bragg gratings with and without pre-annealing for continuous working 20 h at 1200 °C^[20]

虽然 Type II 型飞秒光纤光栅具有极佳的高温稳定性,但是飞秒激光诱导的材料损伤给光栅带来

了较大的插入损耗。提升飞秒光纤光栅高温稳定性的另一种方法是热再生光栅,悉尼大学的 Cook 等^[22]于 2012 年提出了一种基于近红外飞秒激光曝光和热再生处理的再生光纤布拉格光栅,这种光纤光栅同样可以耐受 1200 °C 的高温,但其再生效率较低,再生光栅反射率不足 8%。为了解决这一问题,He 等^[8]于 2016 年提出了一种基于飞秒激光过曝光和热再生的负折射率光纤光栅,获得了较高的再生效率,再生光纤光栅反射率高达 99.22%,插入损耗仅为 0.08 dB,并成功在 1000 °C 环境中稳定工作超过 10 h。图 12 描述了这种负折射率光栅制备的三个步骤:1)采用飞秒激光相位掩模法在

单模光纤中刻写正折射率调制的 Type I 型光纤光栅;2)保持激光能量不变继续对光纤光栅曝光后形成具有偏振相关性的相移光栅;3)将相移光栅置于 800 °C 高温条件下退火 12 h 获得负折射率光纤光栅。这种负折射率光纤光栅的光谱表现出显著的偏振相关性,相移光谱仅体现于横磁(TM)模式,横电(TE)模式仍是普通光栅光谱。经过 12 h 的 800 °C 的退火处理,TE 模式的光栅光谱先被擦除后再生,TM 模式的相移光谱先转变为普通光栅光谱后再生,TE 和 TM 模式的再生光谱与初始光谱相比都表现出显著的蓝移,证明了其负折射率调制的机制。

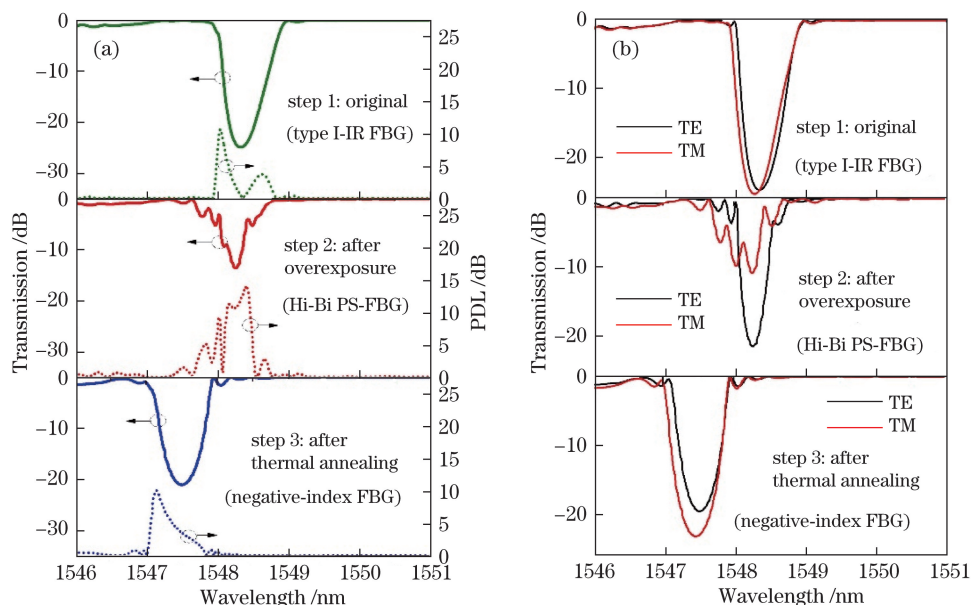


图 12 负折射率光纤布拉格光栅的光谱演化。(a)透射光谱和 PDL;(b)两种垂直偏振模式(TE, TM)的透射光谱
Fig. 12 Spectral evolution of the negative-index fiber Bragg grating. (a) Transmission spectra and PDL;
(b) transmission spectra of two orthogonal polarization modes (TE, TM)

He 等^[8]通过实验比较了负折射率光纤光栅与 Type II 光纤光栅在 1000 °C 和 1150 °C 环境中的高温稳定性,结果如图 13 所示。两类光栅都不能耐受 1150 °C 的高温,但 Type II 型光纤光栅在 1000 °C 条件下表现稳定,而负折射率光纤光栅反射率随退火时间增加逐渐退化,10 h 后光栅折射率调制量退化了 20%。由此可知,这种热再生的负折射率光纤光栅具有介于 Type I 和 Type II 型之间的高温稳定性。

为了进一步提升飞秒光纤光栅的高温稳定性,研究人员开始关注高温稳定性更好的某些非线性单晶介质,例如蓝宝石、掺 Cr³⁺ 红宝石、ZrO₂ 等单晶介质(热稳定性大于 2000 °C),并且可以通过激光加热基座法(LHPG)和导模法(EFG)制备成单晶光纤,其中蓝宝石光纤的研制较为成熟,其在 0.2~5 μm

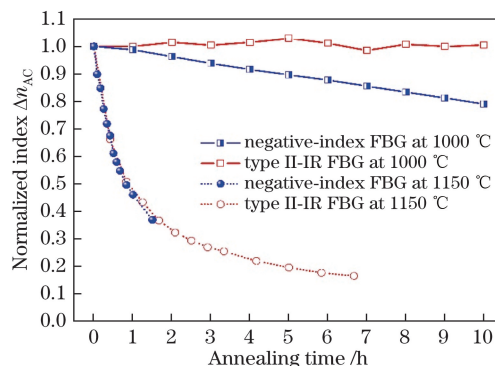


图 13 负折射率和 Type II 型布拉格光栅高温稳定性比较^[8]
Fig. 13 High temperature stability comparison between negative-index and Type II fiber Bragg gratings^[8]

波段范围内透光性好。加拿大通信研究中心的 Grobnic 等^[23]于 2004 年首次利用飞秒激光相位掩

模法制备出蓝宝石光纤光栅,并且实现了 1500 °C 的高温稳定性。由于蓝宝石光纤无包层,为多模工作,故形成的蓝宝石光栅的带宽较宽(6 nm),如图 14 所示。为了解决这一问题,Grobnic 等^[24]于 2006 年继续对蓝宝石光纤光栅进行优化,通过将 60 μm 直径的拉锥单模光纤与 150 μm 直径的蓝宝石光纤进行熔接,由此形成模式滤波效应,得到的光栅反射光谱带宽为 0.33 nm。2010 年,Mihailov 等^[25]通过检测蓝宝石光栅光谱中的布拉格波长和黑体辐射引入的噪声水平,实现了 1500 °C 超高温环境下的温度和应变双参量同时测量。

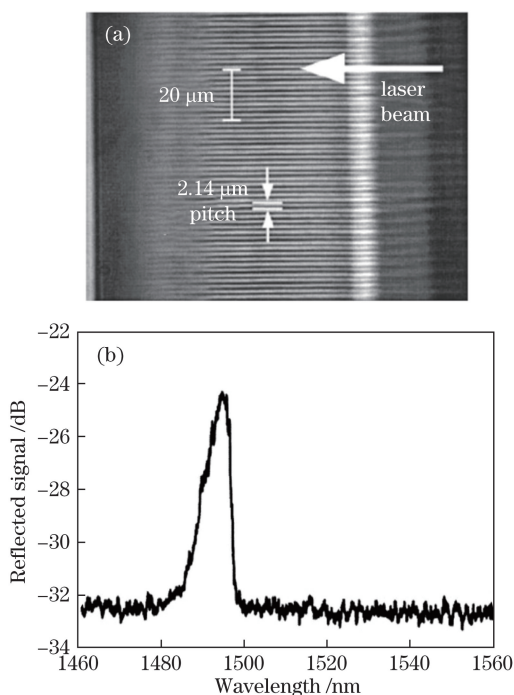


图 14 飞秒激光相位掩模法制备的蓝宝石光纤布拉格光栅的(a)形貌和(b)反射光谱^[23]

Fig. 14 (a) Morphology and (b) reflection spectrum of the sapphire fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser phase-mask technology^[23]

德国耶拿光子技术研究所 Busch 等^[26]于 2009 年利用扫描光束法制备出多反射波长的蓝宝石光纤光栅,实现 20~1745 °C 的大范围超高温测量,测温精度为 1 °C,且测温重复性良好。2013 年,Elsmann 等^[27]利用 400 nm 飞秒激光和塔尔博特双光束干涉装置制备一阶光栅,通过改变干涉光束的夹角,在单根蓝宝石光纤上写制出三支不同波长复用的级连光纤布拉格光栅阵列,并采用商用解调仪,实现了 20~1200 °C 的高温测量。2014 年,Elsmann 等^[28]接着采用相同方法在纤芯掺 Al 的蓝宝石光纤中制备出光纤光栅,仍为多模工作。2015 年,

Habisreuther 等^[29]利用耐受温度达 1900 °C 的蓝宝石光纤光栅实现了 1500 °C 高温管式炉内温度分布的快速测量,其测试频率达 20 Hz。2016 年,Habisreuther 等^[30]又利用封装后的蓝宝石光纤光栅传感器实现了高温环境下的应变测量,传感器耐受温度为 600 °C,应变分辨率为 10 $\mu\epsilon$ 。

5 结 论

飞秒激光微加工技术与光纤器件的完美结合为光纤光栅的制备技术和器件特性带来了革命性的变革。飞秒激光的超衍射极限加工能力使得直写亚微米尺度的光纤光栅变为可能,并且飞秒激光刻写光栅时无需对光纤进行载氢处理,也无需剥除光纤涂覆层,与传统紫外激光刻写法相比其显示出极佳的加工灵活性。通过控制激光能量可以获得 Type I 型和 Type II 型两类光纤光栅,其中 Type II 型光栅表现出极佳的高温稳定性,通过对光纤光栅进行退火处理或者选择高温性能更好的蓝宝石光纤,可以将飞秒激光制备的光纤布拉格光栅高温稳定性进一步提升。综上,飞秒激光制备的光纤布拉格光栅不失为一种最具发展潜力的高温传感解决方案,并且飞秒激光微加工技术的进一步发展将为新型光纤器件的研究和发展带来深远影响。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Oi K, Barnier F, Obara M. Fabrication of fiber Bragg grating by femtosecond laser interferometry[C]. *Lasers and Electro-Optics Society, the 14th Annual Meeting of the IEEE*, 2002, 2: 776-777.
- [3] Itoh K, Watanabe W, Nolte S, *et al.* Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials[J]. *MRS Bulletin*, 2006, 31(8): 620-625.
- [4] Becker M, Bergmann J, Brückner S, *et al.* Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry[J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 19169-19178.
- [5] Liao C R. Study of optical fiber grating sensors fabricated by femtosecond laser pulses[D]. Hongkong: The Hong Kong Polytechnic University, 2012: 24.
- [6] Mihailov S J, Smelser C W, Lu P, *et al.* Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 995-997.

- [7] Grobnic D, Smelser C W, Mihailov S J, *et al.* Fiber Bragg gratings with suppressed cladding modes made in SMF-28 with a femtosecond IR laser and a phase mask[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1864-1866.
- [8] He J, Wang Y P, Liao C R, *et al.* Negative-index gratings formed by femtosecond laser overexposure and thermal regeneration[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23379.
- [9] Thomas J, Wikszak E, Clausnitzer T, *et al.* Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique[J]. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 2007, 86(2): 153-157.
- [10] Wikszak E, Thomas J, Burghoff J, *et al.* Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(16): 2390-2392.
- [11] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, *et al.* Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1170-1172.
- [12] Liao C R, Wang Q, Xu L, *et al.* D-shaped fiber grating refractive index sensor induced by an ultrashort pulse laser[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1525-1529.
- [13] Zhang C Z, Yang Y H, Wang C, *et al.* Femtosecond-laser-inscribed sampled fiber Bragg grating with ultrahigh thermal stability[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3981-3988.
- [14] Lin C P, Liao C R, Wang J, *et al.* Fiber surface Bragg grating waveguide for refractive index measurements[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1684-1687.
- [15] Zhou K M, Dubov M, Mou C B, *et al.* Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16): 1190-1192.
- [16] Huang B, Shu X W. Ultra-compact strain- and temperature-insensitive torsion sensor based on a line-by-line inscribed phase-shifted FBG[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17670-17679.
- [17] Williams R J, Krämer R G, Nolte S, *et al.* Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1918-1920.
- [18] Liao C R, Li Y H, Wang D N, *et al.* Morphology and thermal stability of fiber Bragg gratings for sensor applications written in H₂-free and H₂-loaded fibers by femtosecond laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(11): 1675-1681.
- [19] Li Y H, Liao C R, Wang D N, *et al.* Study of spectral and annealing properties of fiber Bragg gratings written in H₂-free and H₂-loaded fibers by use of femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21239-21247.
- [20] Li Y H, Yang M W, Wang D N, *et al.* Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19785-19790.
- [21] Li Y H, Yang M W, Liao C R, *et al.* Prestressed fiber Bragg grating with high temperature stability[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(10): 1555-1559.
- [22] Cook K, Shao L Y, Canning J. Regeneration and helium: regenerating Bragg gratings in helium-loaded germanosilicate optical fibre[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(12): 1733-1742.
- [23] Grobnic D, Mihailov S J, Smelser C W, *et al.* Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2505-2507.
- [24] Grobnic D, Mihailov S J, Ding H, *et al.* Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fiber Bragg grating sensor with tapered fibers[J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(5): 980-984.
- [25] Mihailov S J, Grobnic D, Smelser C W. High-temperature multiparameter sensor based on sapphire fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2810-2812.
- [26] Busch M, Ecke W, Latka I, *et al.* Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibers for high-temperature sensor applications[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(11): 115301.
- [27] Elsmann T, Habisreuther T, Graf A, *et al.* Inscription of first-order sapphire Bragg gratings using 400 nm femtosecond laser radiation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4591-4597.
- [28] Elsmann T, Lorenz A, Yazd N S, *et al.* High temperature sensing with fiber Bragg gratings in sapphire-derived all-glass optical fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26825-26833.
- [29] Habisreuther T, Elsmann T, Pan Z W, *et al.* Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 860-865.
- [30] Habisreuther T, Elsmann T, Graf A, *et al.* High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-8.