

•特邀·封底文章•

飞秒激光制备光纤 Bragg 光栅在光纤激光器中的应用

吕瑞东, 陈涛*, 范春松, 司金海**, 侯洵

西安交通大学电子与信息学部电子科学与工程学院, 陕西省信息光子技术重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 光纤激光器在光纤通信、激光加工等领域具有广泛的应用。光纤 Bragg 光栅(FBG)是构成全光纤激光器的关键器件。FBG 飞秒激光制备技术适用于各种材料的光纤,具有加工工艺简单、可制备耐高温 FBG 等优点,在光纤激光器中已取得广泛应用。基于此,介绍了 FBG 飞秒激光制备技术的方法、特点及其在光纤激光器应用中的优势,展示了 FBG 飞秒激光制备技术在不同波长范围和类型的光纤激光器中的应用研究进展,最后对未来适用于光纤激光器的 FBG 飞秒激光刻写技术的发展方向进行展望。

关键词 激光器; 光纤布拉格光栅; 飞秒激光; 微纳加工

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111426

Application of Fiber Lasers Based on Femtosecond Laser Inscribed Fiber Bragg Gratings

Lü Ruidong, Chen Tao*, Pham Xuantung, Si Jinhai**, Hou Xun

Shaanxi Key Laboratory of Information Photonics Technology, School of Electronic Science and Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Fiber lasers have wide applications in fiber communication, and laser micromachining. Fiber Bragg grating (FBG) is one of the key components of all fiber lasers. The fabrication technique of FBG that uses femtosecond laser has received considerable attention owing to its advantages such as wide applicability for various fiber materials, simple process, and fabricated FBG with high temperature resistance compared with the traditional FBG inscription technique. It has been widely used in all fiber lasers. This study introduces the basic methods, characteristics, and advantages of the technique of inscribing FBG with a femtosecond laser. Then, the latest research advances in the application of femtosecond laser-inscribed FBGs on fiber lasers with different wavelengths and types are demonstrated. Finally, the future development of this technology is discussed.

Key words lasers; fiber Bragg gratings; femtosecond laser; micro-nano machining

OCIS codes 140.3510; 060.3735; 060.2340; 220.4000

1 引言

光纤激光器具有光束质量好、增益幅度宽、转换效率高、散热性优良、结构简单等优点,广泛应用于激光测量、光纤通信、激光加工等领域。近年来,随着高功率光纤激光器技术的发展,其在激光加工领域的市场份额逐年提升。光纤 Bragg 光栅(FBG)是一种具有一维周期性结构的全光纤器件,与各种光

纤系统兼容,在光纤激光器中具有激光选频、反馈等功能。FBG 在光纤激光器的设计与性能优化方面扮演着十分重要的角色。利用 FBG 可以实现全光纤结构的激光器,具有结构紧凑、无需调节、稳定性好等优点。

自 Hill 等^[1]首次在具有光敏性的掺铈光纤中制成世界上第一只光纤光栅以来,光纤光栅制备技术迅速发展^[2-3]。目前 FBG 主要是利用紫外连续或

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-04-26; 录用日期: 2020-04-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104600)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(XJJ2016016, syspz2017011)

* E-mail: tchen@mail.xjtu.edu.cn; ** E-mail: jinhai@xjtu.edu.cn

准分子激光在光敏光纤上刻写。然而,这种方法只能在光敏光纤中制备 FBG,且制备的光栅在 400 °C 即被擦除,不适用于高温环境。近年来,飞秒激光微纳加工技术由于具有无热效应影响、加工材料范围广、突破衍射极限的加工精度以及能够在透明材料内实现三维加工等优点,被用于玻璃、晶体、金属等各类材料的微纳加工。同时光纤光栅飞秒激光制备技术也引起了广泛关注。目前,利用飞秒激光微纳加工技术,研究者在石英基光纤及其他特种光纤中制备出了不同结构的 FBG,促进了光纤传感、光纤通信以及光纤激光器的发展^[4-6]。由于 FBG 具有灵活的选频特性,良好的滤波特性,以及优秀的色散补偿能力,光纤光栅飞秒激光制备技术在光纤激光器的研究领域备受青睐。本文主要介绍了飞秒激光制备 FBG 的方法、特点以及在光纤激光器中的应用优势,阐述了近年来该技术在光纤激光器中应用的研究进展,最后分析了该技术面临的挑战及发展趋势。

2 FBG 飞秒激光制备技术

2.1 FBG 飞秒激光制备技术的特点

传统光纤光栅刻写技术是利用连续或者纳秒长脉冲紫外激光照射光敏光纤,使具有光敏性的纤芯产生折射率周期性调制而形成一维周期性结构^[7]。光敏光纤一般是在石英光纤等光纤的纤芯中掺杂锗等离子制备而成。紫外光诱导折射率发生变化是由 Si—Ge 缺陷所致,其物理机制有色心模型或应力模型两种^[8-9]。由于光纤光栅的折射率调制依赖于光纤光敏性的强弱,光纤的光敏性随着锗离子浓度增加而增强,但锗离子浓度的增加又会增大光纤的损耗。为了解决这一矛盾,AT&T Bell 实验室提出载氢增敏技术,将低锗掺杂的光纤通过高压下载氢处理来提高其光敏性,然后用于刻写光纤光栅。这种载氢光纤刻写光栅后,需要经过热处理使其折射率变化稳定。利用紫外长脉冲激光在载氢的弱光敏性光纤中刻写 FBG 是现在通用的制备方法,其光源普遍采用 248 nm 的准分子激光。由于这种传统紫外光 FBG 刻写技术对光纤光敏性有较高的要求,其仅能在掺铒光纤等极其有限种类的有源光纤中制备光纤光栅,因此目前光纤激光器多是将无源的光敏性 FBG 与有源光纤熔接而成。除了采用 248 nm 波长准分子激光外,目前也有研究者利用 193 nm 紫外纳秒脉冲激光直接在非增敏石英光纤中刻写光纤光栅,其本质仍然是基于光纤对紫外激光的线性吸收^[10]。

飞秒激光具有极窄的脉冲宽度和极高的峰值功率,可用于加工任何材料,其与材料相互作用主要基于多光子吸收、雪崩电离等非线性效应。此外飞秒激光诱导结构改变的尺度可小于聚焦光斑的尺度,超过衍射极限。飞秒激光在加工方面的优势使其在光纤光栅刻写中发挥了重要作用。由于飞秒激光与材料之间非线性作用的多样性,飞秒激光可以诱导材料发生结构改变的机制也具有多样性。光栅微结构形成机制与光纤材料以及聚焦飞秒激光的强度和波长等参数相关^[11]。飞秒激光在光纤中刻写的光纤光栅主要有两种类型。当曝光强度低于光纤材料损伤阈值时,由多光子吸收等非线性效应形成色心等缺陷结构,产生折射率变化。这种光栅与传统紫外激光诱导光敏光纤产生光栅的机制类似。对于石英光纤,所形成的光纤光栅一般能够承受 500 °C 高温,称为 Type I FBG^[12]。当曝光强度达到自聚焦阈值时,光纤折射率变化主要是由于多光子和雪崩电离产生等离子体,使材料局部发生熔化再凝固收缩而形成永久性的高局域化折射率变化。这种光纤光栅结构在温度低于材料熔融温度之前都不会被擦除,对于石英光纤最高耐温性达 900 °C 以上,称为 Type II FBG^[13]。光纤光栅飞秒激光刻写技术具有以下特点:1) 加工工艺简单,可直接对光纤进行刻写,不需要对光纤进行增敏处理;2) 对光纤材料没有限制,能够在非光敏石英光纤、有源光纤、硫化物和氟化物光纤甚至蓝宝石光纤等各种传统紫外光无法适用的光纤中制备 FBG^[14-15];3) 折射率调制度高,相对于传统 FBG 在同样反射率下所需光栅长度更短;4) 制备的 FBG 耐温性好,基于飞秒激光在光纤材料中诱导的光致微腔结构可实现 900 °C 及以上的高温稳定性,在蓝宝石光纤中刻写的光纤光栅甚至在 2000 °C 仍然稳定,特别适于高温环境^[16];5) 刻写的 FBG 带外损耗小,利用飞秒激光在光纤包层和纤芯同时刻写光栅结构,可以抑制包层模和带外损耗^[17];6) 在光纤内刻写的光栅位置灵活可控,可调控 FBG 双折射及模式耦合特性。由于飞秒激光诱导微结构尺度小于常用的单模光纤纤芯的尺度(约 8 μm),通过调控飞秒激光诱导光栅结构在纤芯的位置、截面形貌以及纤芯覆盖率,可以调控包层模特性等。另一方面,飞秒激光在光纤中诱导微结构具有很强的局域性及结构非对称性,由此可以形成具有很高双折射特性的 FBG。

光纤光栅飞秒激光制备技术的以上特性使其在光纤激光器研究中发挥了重要的作用,主要包括:

1)在有源光纤中直接刻写 FBG 实现一体化的光纤激光器,避免了光纤熔接,提升了设计灵活性;2)解决了传统紫外光很难在硝酸盐、氟化物和硫化物等中红外光纤中制备光纤光栅的难题,推动了中红外光纤激光器的发展;3)基于飞秒激光刻写的 FBG 双折射特性,实现偏振激光器;4)基于飞秒激光刻写的光纤光栅耐高温特性,实现耐高温光纤激光器;5)利用飞秒激光可以实现对光纤隔涂覆层加工,提升光纤光栅器件的机械性能,这对于硝酸盐、氟化物光纤等极脆光纤中的光纤光栅制备极其重要。

2.2 FBG 飞秒激光刻写方法

光纤光栅刻写方法可分为内部写入法和外部写入法两大类。内部写入法是利用光束在光敏光纤内干涉形成驻波写入周期性结构,Hill 等^[1]制备的第一只光纤光栅即采用这种方法。但采用这种方法制作光栅时要求光纤中掺锗含量很高,并且布拉格波长只能与刻写光波长相同,因此目前已很少使用。外部写入法将刻写激光从光纤侧面聚焦到纤芯形成光栅^[2],具体方法又包括全息干涉法^[18]、逐点写入法^[4]、相位掩模板法^[3]、振幅掩模板法^[19]等。由于飞秒激光脉冲极短,空间长度仅在数十微米,对双光束干涉装置稳定性要求极高,因此常用的 FBG 飞秒激光刻写方法主要包括相位掩模板法和直写法两种。

2.2.1 相位掩模板法

利用相位掩模板法刻写光纤光栅的加工装置如图 1(a)所示^[20]。飞秒激光经柱透镜聚焦后入射到相位掩模板上,在掩模板后产生零级以及对称分布的 ± 1 级等各级衍射光。刻写光纤光栅所使用的相位掩模板是一种具有一维周期性矩形凹槽的衍射光学元件,一般利用光刻蚀技术在石英玻璃上制备而成。相位掩模板设计时,零级衍射被尽量抑制,衍射效率一般小于 6%, ± 1 级衍射效率最高,约为 40%^[21]。刻写光栅时,光纤放置在掩模板后 ± 1 级衍射光的干涉区, ± 1 级衍射光由于双光束干涉形成周期性条纹,从而在光纤内诱导出周期性折射率变化。由于极少的零级和其他高级衍射光仍然会对 ± 1 级的双光束干涉强度分布产生影响,因此光纤需要离掩模板有一定的距离。此时, ± 1 级衍射光和零级以及其他各级衍射光由于走离效应(walk-off effect)在时间上分开,形成单纯的 ± 1 级干涉,从而避免产生塔尔博特(Talbot)效应,如图 1(b)所示。利用相位掩模板法制备的 FBG 周期 Λ_G 通常为相位掩模板周期 Λ_P 的一半。在刻写 Type II FBG

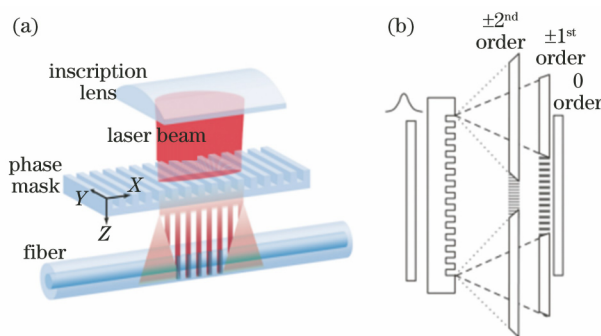


图 1 飞秒激光相位掩模板法制备 FBG 原理图。

(a)刻写装置图^[20]; (b)不同衍射级次的走离效应^[5]

Fig. 1 Schematic diagram of inscribing FBGs using femtosecond laser and a phase mask. (a) Schematic of the inscription setup^[20]; (b) walk-off effect of different diffractive orders^[5]

时,光纤离掩模板距离相对 Type I 型要近一些,刻意使零级光参与 ± 1 级光的干涉以提高干涉光的强度。

加拿大通信研究中心的 Mihailov 等^[22]首先使用飞秒激光相位掩模板法在掺锗的 SM-28 单模光纤中刻写了波长为 1550 nm 的 FBG。目前相位掩模板法主要包括静态相位掩模板法和扫描相位掩模板法两类。静态相位掩模板法在刻写 FBG 时激光、相位掩模板和光纤均保持不动。由于飞秒激光诱导微结构宽度小于纤芯,故该方法无法全部覆盖纤芯。Thomas 等^[23]提出了扫描相位掩模板法,即在加工时飞秒激光垂直于光纤轴横向扫描,使 FBG 结构完全覆盖纤芯区域。该方法不仅解决了大模场光纤等纤芯直径大的光纤中刻写 FBG 的问题,可以通过扫描使光栅覆盖到包层,还可以抑制包层模的响应^[17]。此外,由于该方法可以灵活调控 FBG 在纤芯中的位置和方向,Wang 等^[24]还发展了一种基于倾斜扫描法制备倾斜布拉格光栅(TFBG)的新技术,所制备的 TFBG 波长不随倾斜角度的改变而改变。Pham 等^[25]基于该方法提出平行结构的 TFBG,拓展了 TFBG 的包层模共振光谱范围。Voigtländer 等^[26]通过采用空间光调制器(SLM)对飞秒激光进行波前整形,使用均匀周期的相位掩模板制备了啁啾 FBG。

相位掩模板法光纤光栅刻写技术由于 ± 1 级干涉光在时间上自然匹配,对于光源的相干性要求较低,且稳定性和重复性好,加工效率高,损耗低,适合于批量化生产。然而,这种方法制备的 FBG 的布拉格波长依赖于掩模板周期,需根据光纤折射率以及布拉格波长来选择特定周期的相位掩模板,故其灵

活性较差,且掩模板价格非常昂贵。

2.2.2 飞秒激光直写法

飞秒激光直写法是利用显微物镜将飞秒激光聚焦在光纤内部,通过光纤的精密移动逐一写出 FBG 的每一个周期结构。英国阿斯顿大学 Martinez 等^[4]最早报道了利用飞秒激光直写法逐点扫描制备 FBG 的技术。他们将飞秒激光聚焦在光纤的纤芯,利用电控平移台拉动光纤垂直于聚焦激光快速移动,使飞秒激光单个脉冲诱导一个光栅的周期结构。通过控制移动速度即可调控 FBG 结构的周期大小。虽然这种方法制备 FBG 的效率较高,然而由于光纤纤芯一般在几微米,因此对光纤运动精度和稳定性要求极高。为了保持运动稳定性,Marshall 等^[27]采用如图 2 所示结构,将光纤插入一个透明 D 型空心玻璃管中以限制光纤运动中的偏移,提高了光纤运动中的稳定性。同时,飞秒激光透过抛光的 D 型玻璃管侧面聚焦在光纤纤芯,减小了与光纤外侧表面曲率相关的像差^[19]。此外,Martinez 等^[4, 28]沿光纤

轴向放置两个 CCD 监测光纤,然后与移动平台进行交互,从而调节纤芯的位置使其处在光强最大处。俄罗斯的 Dostovalov 等^[29]利用单个 CCD 监测刻写过程中光纤的实时位置,利用图像识别技术监测光纤运动中的位置偏移,如图 3 所示。这种方法通过精密平台运动补偿光纤运动中的位置偏移,提高了 FBG 的质量。

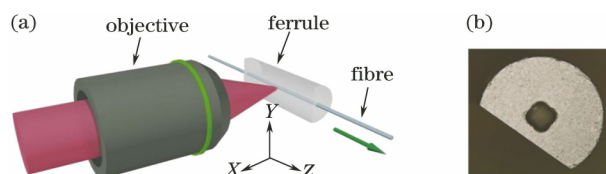


图 2 基于 D 型玻璃管限位的 FBG 飞秒激光直写制备方法^[27]。(a)刻写装置示意图;(b) D 型套管截面显微图

Fig. 2 Schematic diagram of direct-writing FBG through a D-shaped hollow glass ferrule by a femtosecond laser^[27]. (a) Inscription setup; (b) micrograph of the ferrule showing the D-shaped cross-section

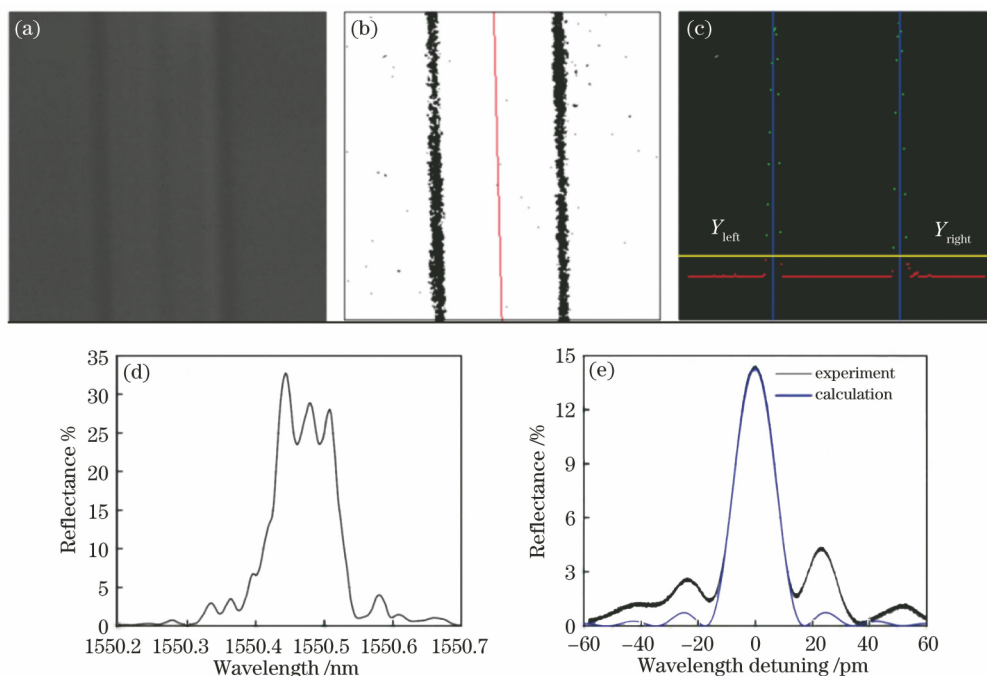


图 3 光纤纤芯图像及不同模式下刻写的 FBG 反射光谱^[29]。(a) CCD 相机观测;(b)滤波图像;(c)边缘位置识别强度轮廓;(d)自由拉伸模式下 50 mm 长 FBGs 的反射光谱;(e)自动对齐模式下 50 mm 长 FBGs 的反射光谱

Fig. 3 Optical fiber core images and reflection spectra of FBG fabricated in different modes^[29]. (a) Image from CCD camera; (b) filtered image; (c) intensity profile for boundary position recognition; (d) reflection spectrum of 50-mm-long FBGs inscribed in free drawing mode; (e) reflection spectra of 50-mm-long FBGs inscribed in auto-alignment mode

飞秒激光逐点写入法由于采用数值孔径较高的显微物镜聚焦,所诱导产生的微结构可小于 $1\ \mu\text{m}$ ^[28],且在横纵方向存在不对称。这种具有很强

的局域性的空间结构及不对称性使得制备的光栅具有强的双折射和大的插入损耗^[30]。FBG 插入损耗和双折射特性分别对光纤激光器的效率和偏振特性

具有重要的影响。Zhou 等^[31]提出一种逐线扫描法,飞秒激光沿光纤轴向的垂直方向扫描,逐一刻写出贯穿纤芯的结构变化。这种方法制备出的 FBG 偏振响应特性大幅减弱,但是其插入损耗约 0.5 dB,相对掩模板法制备的 FBG 插入损耗依然较大。澳大利亚麦考瑞大学研究人员采用沿轴线和垂直于轴向的两维平台同时运动,连续扫描纤芯刻写 FBG,实验装置如图 4(a)所示。该方法提高了飞秒激光诱导光栅结构在纤芯截面的覆盖区域和均匀

性,使光栅的散射损耗减小到 0.1 dB,相比逐点扫描法刻写的 FBG 散射损耗降低了一个数量级,达到了与掩模板法制备 FBG 散射损耗相近的水平^[32]。但是这种逐线扫描法由于刻写的光栅平面是倾斜的,因此会引入额外的损耗以及包层模响应。该团队的研究者还提出一种改进连续扫描纤芯法,即通过垂直光纤轴向扫描纤芯,刻写出垂直的光栅平面,减少了包层模响应。图 4(b)展现了不同直写方法的原理图及加工结果^[33]。

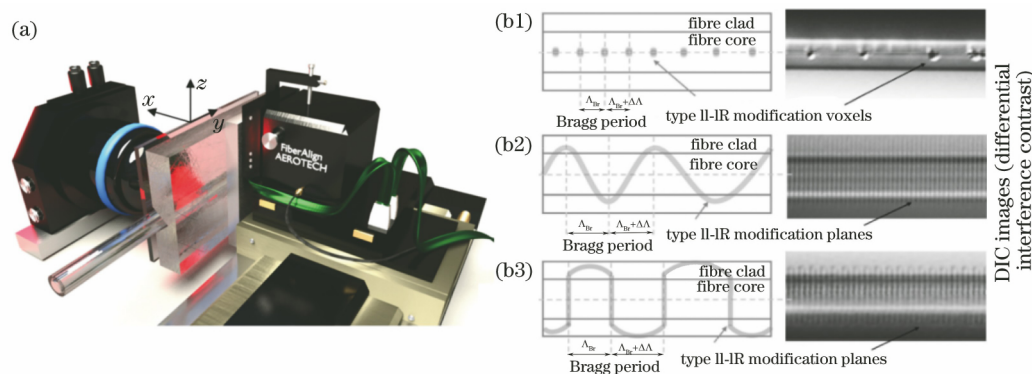


图 4 飞秒激光直写法制备 FBG 的装置及原理。(a)连续纤芯扫描刻写装置;(b)不同直写方法的扫描路径图(左)和显微镜图像(右)^[33];(b1)逐点刻写;(b2)连续纤芯扫描刻写;(b3)逐行刻写技术

Fig. 4 Setup and schematic diagram of FBG direct write by femtosecond laser. (a) Continuous core-scanned inscription setup; (b) scanning-path (left) and microscope image (right) of the different inscription methods^[33]; (b1) point-by-point; (b2) continuous core-scanned; (b3) line-by-line

2019 年,塞浦路斯大学的 Theodosiou 等^[34]又开发出一种飞秒激光逐面刻写法。由这种方法刻写的每一个光栅折射率调制结构均是在光纤截面上通过二维扫描形成,避免了采用逐点和逐线写入法时光纤纤芯很难对准的问题。通过控制光栅在纤芯和包层的覆盖面积,可以极大地降低 FBG 的偏振相关损耗。调控这种折射率改变结构覆盖的深度和宽度以及折射率改变大小和光栅周期,还可以实现如啁啾光栅等各种复杂结构的光纤光栅刻写。利用该方法,Theodosiou 等^[35]在铒镱共掺双包层光纤中制备出带宽达 20 nm、群延迟为 2 ns 的啁啾光纤光栅,并将其作为反射镜应用于光纤激光器中实现了激光输出。啁啾光纤光栅是光纤激光器中色散调控及宽带反射的关键元件,该工作对飞秒激光制备的 FBG 在超快激光器中的应用具有重要意义。

飞秒激光直写法可以灵活调控刻写光栅的周期、长度、折射率调制度分布,制备出具有折射率调制以及长度和色散可控的光纤光栅^[36]。此外,相对于相位掩模板法,飞秒激光直写法更容易实现隔涂覆层加工,有效保持光纤的强度和物理完整性。但是该方法对设备稳定性和精度要求较高,目前普遍

采用 Aerotech 公司的空气导轨电动平移台控制光纤移动,价格昂贵。此外,相对于相位掩模板法,该方法制备的光栅容易在短波长处产生较强的永久性损耗,用于激光器中时高功率下容易产生光学损伤。利用飞秒激光直写法刻写 FBG 损耗主要是由飞秒激光诱导光栅结构的强局域性引起的散射损耗,采用逐线或者逐面扫描提高 FBG 的覆盖光纤纤芯截面面积是减小此类损耗的一种有效方法^[32,34]。加工中平台运动的不稳定造成光栅结构的不均匀性也会带来散射损耗,因此目前普遍采用电控气浮导轨平台控制光纤移动。此外,飞秒激光诱导光纤结构产生的色心结构等缺陷的宽带吸收是引起损耗的另外一个原因,此类损耗可通过热或光致退火效应来抑制^[37-38]。

2.3 飞秒激光制备光纤光栅的光源

刻写 FBG 的飞秒激光光源主要有掺钛-蓝宝石激光器和掺镱激光器以及各自的倍频激光。目前报道的飞秒激光刻写光纤光栅所使用的激光光源波长涵盖 266 nm 到 1030 nm。

钛宝石激光器的应用最为广泛,其输出波长约为 800 nm,通过二倍频和三倍频可以产生 400 nm

和 266 nm 左右波长的飞秒激光。800 nm 飞秒激光脉冲的单光子能量为 1.55 eV, 远小于典型掺 Ge 石英光纤的能带间隙 (7.1 eV)^[13], 因此, 利用 800 nm 近红外飞秒激光在石英光纤中刻写 FBG 主要基于五光子吸收^[39]。利用 400 nm 和 266 nm 的飞秒激光写入 FBG^[40-41] 也有报道。研究表明: 相比于 800 nm 激光, 通过 400 nm 波长的飞秒激光曝光可以得到具有更高温度稳定性的高反射 II 型光栅^[40]; 而 266 nm 深紫外飞秒激光曝光由于波长短, 多光子吸收过程中所需的光子数量减少, 因此刻写阈值更低, 制备的光栅强度增长效率相比于 800 nm 和 400 nm 更高^[41]。利用 266 nm 飞秒激光曝光可以实现小折射率调制结构, 能够在各种掺杂光纤中制备高反射型 I 型光栅^[42]。此外 266 nm 波长的激光能够实现更小尺度的聚焦, 可以制备出适用于可见光波段的一阶 FBG^[43]。

掺铒飞秒激光放大器输出波长约为 1030 nm。Dostovalov 等^[29]利用 1026 nm 飞秒激光隔涂层在聚酰亚胺包覆的纤芯中制备出了长度在 0.1~50 mm 之间的高质量 FBGs。由于光纤对该波长激光的吸收低于 800 nm 飞秒激光, 因此以掺铒飞秒激光放大器为光源刻写 FBG 的工作效率相对较低。为了提高 FBG 的刻写效率, 更多的是利用掺铒飞秒激光放大器输出激光的倍频和三倍频激光刻写 FBG, 特别是在利用相位掩模板法制备 FBG 中。Theodosiou 等^[35]采用逐面法在铒铈共掺双包层光纤中刻写啁啾光栅时使用的光源即为 517 nm 飞秒激光。

目前, 刻写布拉格光栅的飞秒激光主要采用高斯光束。近年来, 研究人员也开展了利用空间整形的飞秒激光刻写布拉格光栅研究。Zhang 等^[44-45]利用贝塞尔飞秒激光在 Corning 7980-5F 石英玻璃中刻写了多个光栅, 形成了多路复用的布拉格光栅波导, 基于此, 实现了具有线性温度响应的布拉格光栅波导传感器。Paipulas 等^[46]利用飞秒贝塞尔光束在大块熔融石英中制作体布拉格光栅时衍射效率达到 90%, 而高斯光束仅达到 60%。贝塞尔光束具有无衍射传感特性, 能够产生较小的焦斑尺寸, 且拥有较长的无衍射聚焦区域。在制备体布拉格光栅等一些大尺寸的器件时, 利用贝塞尔光束相比于高斯光束有更快的布拉格光栅刻写速度^[47], 能够大大提高制备效率。对飞秒激光光束进行时空调控, 可以实现不同规模和需求的布拉格光栅制备, 同时在精度和灵活性方面也有提高。

除了飞秒激光, 也有以皮秒激光作为加工光源刻写光纤光栅的报道^[48]。最近 Nishimura 等^[49]利用 1064 nm 的皮秒激光结合逐点刻写法制备了 FBG, 并将其作为高温传感器应用在液态钠处理的工业管道温度监测中。相对飞秒激光, 利用皮秒激光刻写 FBG 的研究较少, 但是皮秒激光器具有价格低、稳定性好等优点, 在产品化应用中具有优势。

2.4 FBG 在光纤激光器中的作用

FBG 在光纤激光器中主要用作激光反馈腔镜和滤波器等。采用 FBG 作为激光器反馈腔镜可实现全光纤化结构, 且工艺简单、结构稳定。以 FBG 作为谐振腔镜的光纤激光器主要以线型腔为主, 高反射腔镜和输出腔镜可以全部采用 FBG, 也可以部分采用 FBG。分布 Bragg 反射式 (DBR) 和分布反馈式 (DFB) 是全光纤激光器两种主要腔形结构。DBR 光纤激光器采用一对谐振波长相同的 FBG 作为激光谐振腔腔镜, 其中高反射率 FBG 为高反射腔镜, 低反射率 FBG 作为输出镜。DFB 光纤激光器是在有源光纤上直接刻写一段相移 FBG 构成, 可在泵浦光源下输出超窄线宽的激光。图 5(a) 和 (b) 分别为 DFB 和 DBR 短腔单频光纤激光器示意图。

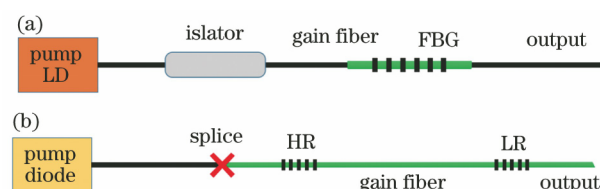


图 5 全光纤激光器结构示意图。(a) DFB 光纤激光器; (b) DBR 光纤激光器

Fig. 5 Structure diagram of all-fiber lasers. (a) DFB fiber laser; (b) DBR fiber laser

由于传统的紫外激光刻写技术仅能在掺铒光纤等非常有限种类的有源光纤上刻写 FBG, 且需要通过铈铈共掺来提高光纤的光敏性, 因此目前近红外光纤激光器通常是将传统的无源 FBG 与有源光纤熔接。这种方法不仅会引入熔接损耗, 还需考虑无源光纤与有源光纤之间模式匹配问题。此外对于氟化物等中红外光纤由于熔点与石英光纤差异大, FBG 与有源光纤之间的异质熔接存在一定的技术难度。对于 DFB 激光器, 则必须在有源光纤上直接刻写相移 FBG, 因此能够实现的 DFB 光纤激光器种类非常有限。特别地, 对于硫化物、氟化物等中红外光纤, 其与石英光敏光纤制备的 FBG 熔接技术难度大, 而且这类光纤也很难用传统紫外光光纤光栅刻写技术制备 FBG。利用飞秒激光直接在有源光

纤中刻写 FBG 作为腔镜可以避免 FBG 与有源光纤的熔接。FBG 飞秒激光制备技术在刻写光纤激光器的腔镜中充分体现了其优势,已成为目前应用研究最多的方向。

3 飞秒激光制备光纤光栅在光纤激光器中的应用

光纤激光器采用掺杂稀土离子的有源光纤作为增益介质。光纤的基质材料主要是硅酸盐玻璃(石英玻璃)、磷酸盐、硫化物以及氟化物玻璃等。根据掺杂稀土离子的不同,光纤激光器的输出波长覆盖了近红外(掺杂铒、镱、铒镱共掺等)和中红外波长(掺杂铥、钬、镱等)。由于石英光纤在 $2\ \mu\text{m}$ 以上损耗较大,因此主要用于 $2\ \mu\text{m}$ 以下光纤激光器。近红外光纤的主要基质为石英玻璃及磷酸盐玻璃,而中红外激光器主要采用氟化物玻璃及硫化物光纤。另一方面,从光纤纤芯直径、模式来看,目前光纤激光器所用的 FBG 主要有小纤芯直径的单模光纤、多模光纤和大模场光纤。其中大模场光纤主要用于高功率激光器。光纤材料、掺杂离子是决定刻写 FBG 机制和性能的关键因素,而光纤材料基本上决定了光纤激光器输出波长的范围。下面将以光纤激光器的工作波长以及光纤直径作为分类,探讨飞秒激光刻写 FBG 技术在光纤激光器领域的应用研究进展。

3.1 近红外单模光纤激光器

单模光纤是光纤激光器中使用最为广泛的光纤。近红外光纤激光器主要以掺铒、掺镱和铒镱共掺有源光纤为增益光纤,输出波段分别在 C+L 波段和 $1030\sim 1100\ \mu\text{m}$ 。近红外光纤主要采用石英光纤作为基质,而利用飞秒激光刻写 FBG 最早也是在石英光纤上实现的,因此近红外光纤激光器成为 FBG 飞秒激光制备研究最广泛的方向。

英国 Aston 大学 Lai 等^[50]首次利用飞秒激光直写法在未经任何增敏处理的铒镱共掺光纤中刻写 FBG,制作了短腔 DBR 激光器,利用传统紫外光 FBG 刻写技术几乎无法在铒镱共掺光纤中刻写 FBG。同年,德国耶拿大学研究人员利用飞秒激光相位掩模板法在没有掺杂任何光敏元素、也未经载氢增敏处理的掺铒光纤中直接刻写 FBG 制作光纤激光器,输出激光的功率为 $38\ \text{mW}$,斜率效率达 21.1% ,信噪比高达 $60\ \text{dB}$ ^[51]。以上激光器功率较低,澳大利亚麦考瑞大学的 Jovanovic 等^[52]利用逐点写入法在双包层掺镱光纤一端刻写高反射率

FBG,利用光纤另一端的菲涅耳反射作用实现输出耦合,得到了 $103\ \text{W}$ 的高功率激光输出。至今为止,利用飞秒激光已经在掺铒、掺镱、铒镱共掺等各类有源光纤中刻写 FBG 实现了近红外激光输出。

在各类单模光纤激光器中,单纵模光纤激光器由于线宽窄(一般为 kHz 量级)、相干性好,在干涉检测、海洋通信、光纤水听器、引力波探测以及雷达与勘探等领域表现出广阔的应用前景和市场潜力^[53]。实现单纵模激光器最便捷的方法是在增益光纤上刻写一段 $\pi/2$ 相移光栅,形成 DFB 光纤激光器结构。利用传统紫外光 FBG 刻写技术,在铒镱共掺磷酸盐光纤中进行光敏离子掺杂以及载氢处理后,可以直接刻写相移 FBG 形成 DFB 激光器^[54]。但是这种方法适用的光纤种类极其有限,并且额外的掺杂和处理对有源光纤的增益或者损耗特性也可能产生影响。Fan 等^[55]利用飞秒激光直接在有源光纤中刻写相移 FBG,通过对其相移区域施加压力实现了稳定的单频和单极化 DFB 光纤激光器。激光器输出波长为 $1053\ \text{nm}$,偏振消光比为 $20\ \text{dB}$ 。单频 DFB 光纤激光器由于增益光纤长度较短,所能实现的输出功率较为有限。此外,在高泵浦功率条件下,基于相移 FBG 腔体中的热效应较严重。

单纵模光纤激光器也可以采用 DBR 激光器通过腔长控制和其他模式选择技术来实现,其中采用 DBR 结构缩短腔长是一种最简便的方式。与 DFB 结构相比,DBR 的短直腔结构制作相对容易,输出功率相对较高。利用传统紫外光刻写 FBG,由于需要再与有源光纤熔接,很难将腔长缩到极限;谐振腔内存在的无源光纤部分也降低了激光器的增益。利用飞秒激光刻写技术可以非常精确地控制 FBG 的刻写位置,从而尽可能地缩短腔长,实现单纵模输出。Lai 等^[50]首次利用飞秒激光直写法制备的铒镱共掺 DBR 激光器实现了单纵模输出,长度为 $3.1\ \text{cm}$,然而输出功率较低,只有 $45\ \mu\text{W}$ 。本课题组 Pham 等^[56]利用飞秒激光扫描相位掩模板法在高掺杂掺铒光纤一端刻写高反射率 FBG,然后利用飞秒激光倾斜扫描法在另外一端刻写 TFBG,并将其作为输出腔镜,通过改变 TFBG 的倾斜角度来调节输出腔镜反射率,制备出腔长为 $12\ \text{mm}$ 的单纵模光纤激光器。该 DBR 光纤激光器在 $1550.66\ \text{nm}$ 波长处光谱的信噪比达 $65\ \text{dB}$,实验结果显示在图 6 中。研究发现,经过退火处理后,高反射率 FBG 和 TFBG 在高温下反射率保持稳定,并且激光输出稳定。该实验中采用倾斜扫描方法制备的 TFBG 和

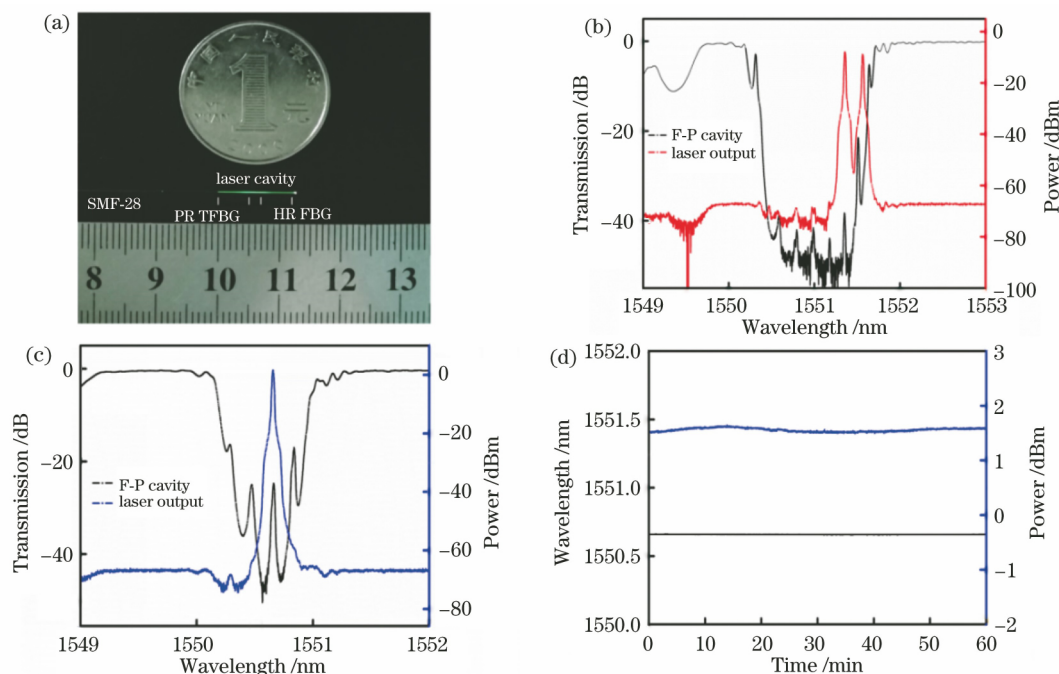


图6 DBR 光纤激光器及其输出激光特性^[56]。(a) DBR 光纤激光器照片;(b)泵浦功率为 255 mW 时,退火前法布里-珀罗(F-P)干涉的透射光谱和激光器输出光谱;(c)泵浦功率为 255 mW 时,退火后 F-P 干涉的透射光谱和激光器输出光谱;(d)激光输出功率和波长在室温下 1 h 的稳定性

Fig. 6 DBR fiber laser and its output characteristics^[56]. (a) Photograph of the DBR fiber laser; (b) transmission spectra of the Fabry-Perot (F-P) interference and the output spectra of the laser before the annealing process at pump power of 255 mW; (c) transmission spectra of the Fabry-Perot (F-P) interference and the output spectra of the laser after the annealing process at pump power of 255 mW; (d) stability of the laser output power and wavelength at room temperature in 1 h

FBG 在相同加工条件下波长始终相同,因此采用完全相同的加工装置和功率等加工条件,仅需改变刻写 FBG 时的扫描方向即可实现,简单易行。

以上报道的光纤激光器主要是以石英基质的有源光纤来实现。相比石英光纤,磷酸盐光纤在高浓度离子掺杂下不会出现荧光猝灭和离子团簇,可以实现更高的增益。然而磷酸盐光纤由于无光敏性很难用长脉冲紫外激光刻写光纤光栅,与传统石英光纤 FBG 熔接时困难较大,且熔接损耗也较大。加拿大国家通信研究中心 Grobner 等^[57]首先利用飞秒激光在钕镱共掺磷酸盐光纤中刻写出高反射率的 FBG,长度仅有 6 mm。美国的 Hofmann 等^[58]利用飞秒激光及相位掩模板在高浓度的钕镱共掺磷酸盐光纤上刻写 FBG,实现了一体化的全磷酸盐单频光纤激光器,如图 7 所示。该激光器输出激光的中心波长为 1538.2 nm,输出功率为 500 mW,线宽小于 60 kHz,弛豫振荡峰对应的相对强度噪声为 -100 dB/Hz。该单纵模光纤激光器中有源光纤长度为 2 cm,磷酸盐光纤的高增益保证了单纵模和高

输出功率。

利用飞秒激光刻写 FBG 有极高的温度稳定性,基于飞秒激光刻写 FBG 的光纤激光器可用于工作在高温环境下的激光光源以及高温传感器。Lai 等^[50]利用飞秒激光直接在非光敏钕镱共掺光纤中刻写 FBG 实现了 DBR 光纤激光器,其可以在 600 °C 稳定工作。Pham 等^[56]报道基于 TFBG 作为输出镜的 DBR 光纤激光器,该激光器经过退火处理后,在室温至 550 °C 的温度范围内,可以稳定地在单纵模运转下工作,信噪比大于 65 dB,结果如图 8(a) 所示。同年,同课题组 Huang 等^[59]利用飞秒激光在普通石英光纤上刻写的 Type II 型 FBG 和 Sagnac 环路作为腔镜构成光纤激光器,实现连续激光输出。将 FBG 置于高温炉中,在 1000 °C 时激光器仍可稳定工作,如图 8(b) 所示。该激光器可用于高温传感,在 300 °C 到 1000 °C 之间其温度传感灵敏度约为 15.9 pm/°C。

飞秒激光制备 FBG 的偏振依赖特性、高阶光谱响应特性等也引起了研究人员极大的兴趣。飞秒激

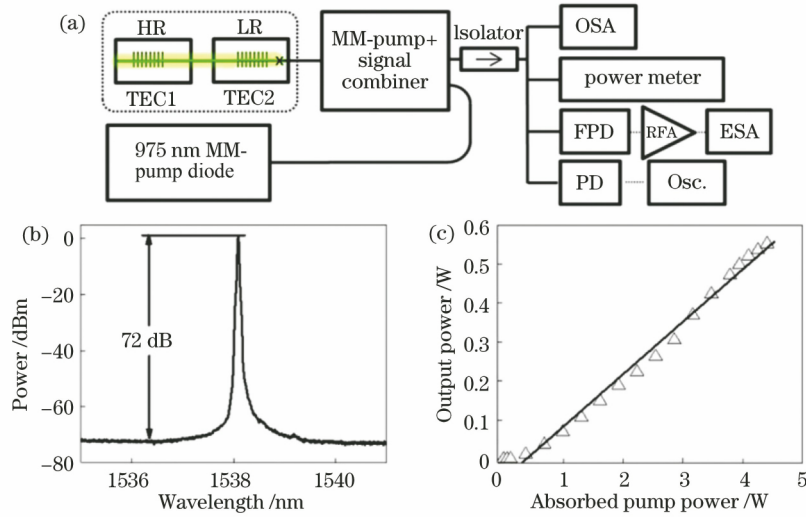


图 7 基于钇铒共掺磷酸盐 FBG 的一体化光纤激光器及输出激光特性^[58]。(a)激光器及其测试装置；

(b)输出激光光谱；(c)激光输出功率与泵浦功率关系

Fig. 7 Experimental setup and output characteristics of the integrated fiber laser based on erbium-ytterbium co-doped phosphate FBG^[58]. (a) Experimental setup used to characterize the monolithic phosphate glass fiber lasers;

(b) laser output spectrum; (c) laser output power versus absorbed pump power

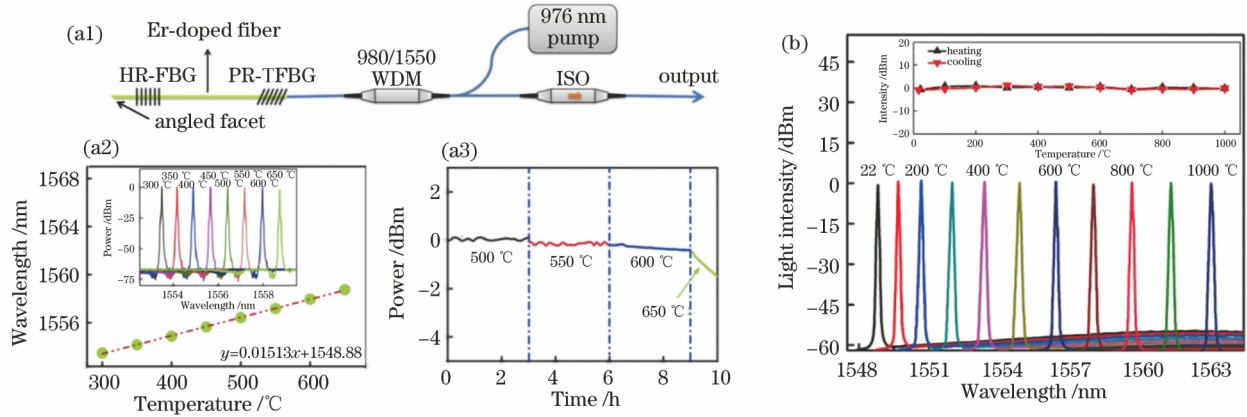


图 8 基于 FBG 的耐高温光纤激光器及输出激光特性。(a1) DBR 光纤激光器结构图；(a2)激光输出波长与温度的关系，插图为不同温度下输出光谱；(a3)不同温度下输出功率的稳定性^[56]；(b)基于光纤光栅和 Sagnac 环路的光纤激光器在不同温度下的光谱，插图为加热和冷却过程中激光强度随温度的变化^[59]

Fig. 8 Schematic diagram and output characteristics of high temperature resistant fiber laser based on FBG. (a1) Experimental setup of DBR fiber laser; (a2) laser wavelength versus temperature, in which the inset shows output spectra at different temperatures; (a3) laser output powers at different temperatures^[56]; (b) spectrum at different temperatures of fiber laser based on fiber grating and Sagnac ring, in which the inset shows variation in laser intensity with temperature during the heating and cooling processes^[59]

光经聚焦后诱导结构改变的局域性及非对称性使得 FBG 具有强双折射特性^[60]，特别是飞秒激光逐点写入法制备的 FBG。线偏振光纤激光器在非线性变频和共聚焦光束组合等方面具有重要的应用价值。Lai 等^[50]利用飞秒激光逐点写入法制备的光纤光栅搭建了单偏振的 DBR 光纤激光器，其偏振纯度大于 40 dB。Wikszak 等^[30]利用 800 nm 飞秒激光结合相位掩模板在非光敏保偏掺铒光纤中刻写 FBG，并

将其作为激光器的高反射腔镜，以 10% 的介质膜镜作为输出腔镜，建立了一个紧凑的线偏振光纤激光器，相应结构及激光器输出特性结果如图 9 所示。通过旋转腔内的偏振分光镜，获得快轴和慢轴相应的激光输出，光谱如图 9(b) 所示，两正交偏振态激光波长相差 0.2 nm。该激光器输出功率为 100 mW，斜率效率达到 27%。澳大利亚麦考瑞大学的 Jovanovic 等^[61]详细研究了利用 800 nm 飞秒

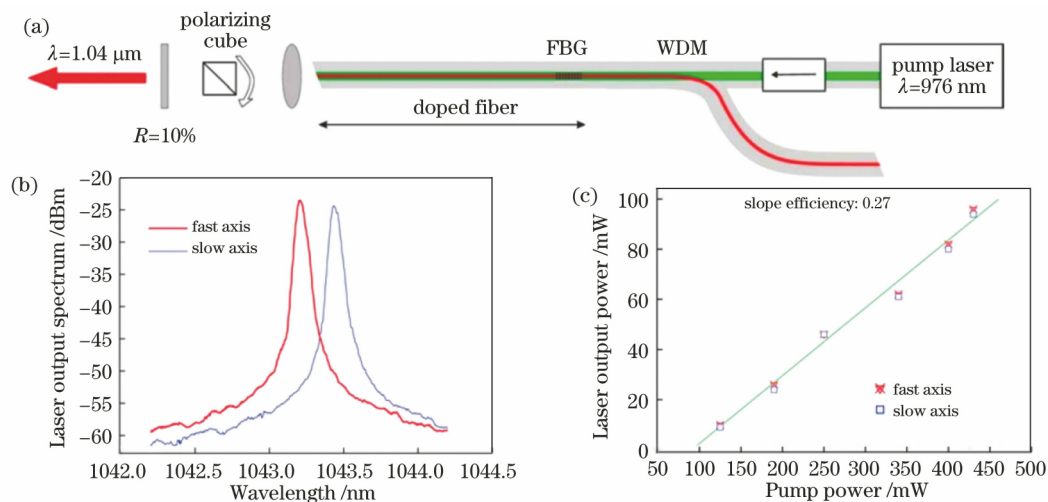


图9 基于FBG的线偏振光纤激光器装置及其输出特性^[30]。(a)激光器装置图;(b)光纤激光输出光谱;(c)不同偏振态的输出功率与泵浦功率关系图

Fig. 9 Schematic diagram of FBG based linear polarization fiber laser and its output characteristics^[30]. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) fiber laser output spectra; (c) relationship between output power and pump power in different polarization states

激光逐点写入法制备FBG时,所诱导产生微腔结构在纤芯的位置、椭圆度以及大小对光栅双折射特性和偏振依赖强度的影响,最终确认折射率调制的长轴方向对应FBG的慢轴。他们进一步利用所制备的强双折射FBG作为腔镜,在低双折射掺铒光纤激光谐振腔中实现了线偏振激光输出,消光比大于30 dB。同时还发现偏振相关的光栅强度是写入脉冲能量的函数,为实现具有高鲁棒性的线偏振光纤激光器提供了低成本的简单方法。

3.2 中红外波段光纤激光器

中红外激光器在相干多普勒激光雷达以及传感等领域应用极为广泛。近年来,中红外波段光纤激光器结合功率放大技术实现的高功率窄线宽光纤激光器成为下一代激光干涉引力波探测器的首选光源。中红外波段的光纤器件成本较高,在制作工艺成熟度方面不及近红外波段器件,因此中红外波段FBG对中红外光纤激光器简化工艺、减小损耗、降低成本具有重要意义^[62]。

中红外有源光纤掺杂的稀土离子主要包括铥、钬、镱、铒等。基质为石英玻璃的有源光纤一般只能输出2 μm左右的中红外激光。波长2 μm以上的光纤激光器则采用氟化物及硫化物等基质材料的光纤。氟化物光纤对传统的248 nm紫外激光没有光敏性,只有掺杂铈离子之后才能刻写光纤光栅^[63],而利用飞秒激光可以直接在有源或者无源氟化物光纤中刻写FBG。此外,氟化物等光纤质地脆弱易断,飞秒激光隔涂覆层加工能有效解决这个问题,同

时增强了FBG的鲁棒性。利用飞秒激光在掺杂铥等稀土元素的石英光纤中制备中红外波段的FBG与制备近红外FBG的难度相当,其研究较多。哈尔滨工业大学研究人员利用飞秒激光相位掩模法在非光敏性掺Tm³⁺光纤中刻写出了反射波长为1946.4 nm的FBG^[64],用于光纤激光器中,得到了线宽为60 pm的激光输出。本文主要介绍利用飞秒激光在氟化物光纤中刻写出的FBG在光纤激光器中的应用研究进展,氟化物光纤主要是ZBLAN光纤。

加拿大国家通信研究中心Grobic等^[65]最早报道了利用800 nm飞秒激光和相位掩模板在单模和多模无掺杂氟化物光纤中制备FBG。加拿大拉瓦尔大学的研究者在利用飞秒激光相位掩模板法刻写掺铒双包层ZBLAN光纤光栅方面做了大量工作。他们利用800 nm飞秒脉冲相位掩模技术,在掺铥和未掺铥的ZBLAN光纤中写入光纤光栅,并且发现飞秒激光诱导产生的折射率调制度为负值,为飞秒激光制备工作波长在2 μm以上的FBG奠定了基础^[14]。在之后的研究中,他们在掺铒双包层ZBLAN中刻写FBG作为高反镜,利用光纤端面作为输出,在2.8 μm实现了功率高达5 W的连续激光,光-光转换效率达32%^[66]。进一步地,他们在掺铒ZBLAN光纤中隔涂覆层刻写两个反射率分别为99.5%和8%的FBGs作为激光器腔镜,实现了42 W的激光输出,实验结果如图10所示^[67]。在上述工作中,由于加工时保留了涂覆层,不仅解决了刻

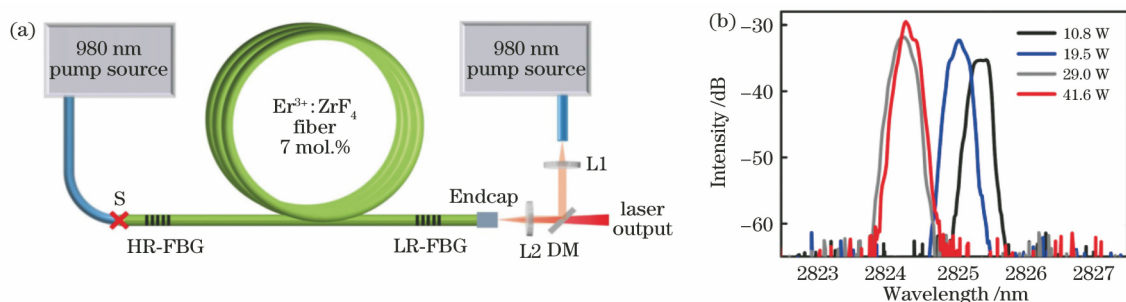


图 10 基于 FBG 的氟化物光纤激光器装置及输出光谱图^[67]。(a)实验装置;(b)不同输出功率下的光谱

Fig. 10 Setup and out spectra of FBG based fluoride fiber laser^[67]. (a) Experimental device diagram; (b) spectra at different output powers

写时光纤易碎的问题,还大大增强了该 FBG 的机械性能,提高了激光器的鲁棒性及稳定性。该团队还在不去除涂覆层的掺铒 ZBLAN 光纤中写入反射率为 55%,带宽为 0.7 nm 的 LR-FBG,并将其作为输出耦合器,将一个沉积在石英光纤尖端的二向色镜作为输入耦合器,最终在 3.44 μm 处实现了 1.5 W 的激光输出。然而,在高功率下,激光腔发生了临界光纤损伤,这阻碍了其功率进一步增大^[68]。之后,他们直接在掺铒 ZBLAN 光纤两端利用飞秒激光写入反射率为 90% 的 HR-FBG 和反射率为 30% 的 LR-FBG,在 3.55 μm 处实现了 5.6 W 的激光输出,光转换效率达到 26.4%^[69]。

日本研究人员 Goya 等^[70]则采用飞秒激光逐线刻写法,将 532 nm 飞秒激光经大数值孔径的物镜进行聚焦,并在双包层掺铒 ZBLAN 光纤中制作出 FBG。将所制备的 FBG 用作光纤激光器的高反射端镜,实现了 2.8 μm 的连续激光输出。

澳大利亚悉尼大学和麦考瑞大学研究人员开展了利用飞秒激光直写法在钬/镨共掺 ZBLAN 光纤

中制备 FBG 的研究^[71-72]。图 11(a)和(b)分别为利用飞秒激光直写法在钬/镨共掺 ZBLAN 光纤中制备 FBG 的原理及装置图,图 11(c)为周期为 1.97 μm 的 FBG 显微图像^[71]。研究表明,与石英光纤内所形成的基于激光诱导微孔的 Type II 型光栅不同,在 ZBLAN 光纤中形成的光栅是 Type I 型。这是由于与石英玻璃相比,ZBLAN 的熔点低,且具有更高的脆性,阻止了 ZBLAN 玻璃基质在分解过程中的微孔形成。他们以刻写的 FBG 作为反射镜,二向色镜作为输出耦合端,建立了线型腔光纤激光器,在 2.9 μm 处实现了激光输出^[72]。此外,他们又利用逐行刻写法在纤芯为 13 μm 的钬/镨共掺双包层 ZBLAN 光纤中刻写了二阶 FBGs,在 2.88 μm 处实现了斜率效率为 17% 的全光纤激光器。这种逐行刻写的方法相比相位掩模板法更容易直接透过光纤表面的高分子涂层刻写 FBG,从而保护脆性的氟化物光纤^[71]。

在各种稀土掺杂中红外光纤中,掺铒 ZBLAN 光纤可以输出波长范围覆盖 2.6~3.0 μm 和 3.3~

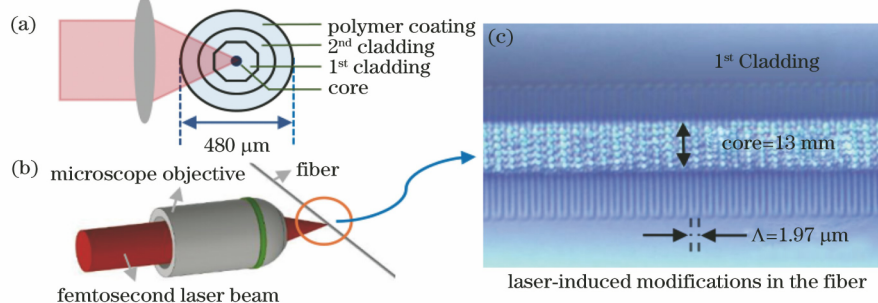


图 11 基于飞秒激光直写法在钬/镨共掺 ZBLAN 光纤制备 FBG 的方法及结构^[71]。(a) ZBLAN 光纤的截面图和激光聚焦到纤芯的过程图;(b)飞秒激光直写装置;(c)均匀周期光纤光栅的显微图像(俯视图)

Fig. 11 Method of directly inscribing FBG in holmium/praseodymium co-doped ZBLAN fiber by using femtosecond laser and its structures^[71]. (a) Cross-sectional view of the ZBLAN fiber and schematic representation of the process of focusing the inscription laser into its core; (b) femtosecond laser direct write setup; (c) microscopic image of the uniform FBG (top-view)

3.8 μm 两个波段的激光,掺铊 ZBLAN 光纤输出波长在 2.6~3.0 μm 以及 3.2 μm 范围内,但是在 3.2 μm 波段输出功率极低。掺铊 ZBLAN 光纤填补了 3.0~3.3 μm 波长的光谱范围。2018 年,Woodward 等^[73]利用飞秒激光在掺铊 ZBLAN 光纤中刻写了反射率为 60% 的 FBG 作为输出镜,二向色镜作为高反腔镜,在 3.15 μm 处实现了瓦级激光输出。激光器的斜率效率为 73%,是各种中红外光纤激光器中的最高值。加拿大拉瓦尔大学 Fortin 等^[74]利用相位掩模法在掺铊 ZBLAN 光纤中刻写了一个反射率为 78% 的窄带高反射 FBG 和一个反射率为 20% 的宽带啁啾 FBG 构成全光纤激光器,在 3.24 μm 实现了 10.1 W 的输出。

利用飞秒激光制备的 FBG 不仅在连续激光器中取得应用,也用于实现脉冲光纤激光器。加拿大拉瓦尔大学 Paradis 等^[75]基于飞秒激光隔涂覆层制备的 FBG 在 2.8 μm 处实现了平均功率超过 11 W 的增益开关全光纤激光器。Haboucha 等^[76]使用 FBG 作为波长选择元件在 2.8 μm 实现了稳定的被动锁模光纤激光器。

利用飞秒激光在氟化物等中红外有源光纤中制备 FBG 逐渐成为当前 FBG 飞秒激光制备技术的应用研究热点。目前开展该研究的单位主要有加拿大拉瓦尔大学、澳大利亚悉尼大学等,国内开展相关研究的单位较少。在中红外光纤激光器发展的推动下,该方向将会吸引更多研究者的关注。

3.3 大模场光纤激光器

普通单模光纤纤芯直径一般小于 10 μm ,所产生的激光由于强束缚极易产生强非线性效应,影响激光功率的提升^[77]。采用大模场光纤可以大大减弱光纤激光器中的非线性效应,成为实现高功率光纤激光器的必然选择。目前用于高功率光纤激光振荡器的大模场光纤纤芯大多在 20~30 μm 。纤芯直径为 30 μm 以上的大模场光纤主要用于光纤放大器。以紫外准分子激光在无源大模场光纤中刻写的 FBG 为腔镜,所建立的全光纤激光振荡器输出功率已经超过 6 kW^[78]。然而,大模场光纤一般支持两到三个模式的传输,因此需要刻写的 FBG 截面要覆盖整个纤芯且均匀分布,以抑制其他模式的耦合,因此相对于在单模光纤中刻写 FBG,其要求更为苛刻。新兴的光子晶体光纤可以在更大芯径下实现单模传输。此外,在高功率光纤激光中,高反射的 FBG 要求带宽较宽。

在高功率大模场光纤激光器中,熔接点极易形

成热点引起破坏,对激光器的模式稳定性也有影响。因此,在有源光纤中直接刻写 FBG 显得尤为重要。澳大利亚麦考瑞大学 Jovanovic 等^[52]利用飞秒激光结合逐点刻写法直接在双包层掺铊光纤(8 $\mu\text{m}/300 \mu\text{m}$)中写入 FBG,在 1097 nm 实现了窄线宽连续激光输出,最大输出功率为 103 W 时,输出激光的最大带宽仅为 260 pm。德国耶拿大学研究人员与弗劳恩霍夫应用光学与精密工程研究所的研究人员合作,一直致力于飞秒激光制备 FBG 及其在高功率光纤激光器中的应用研究。Krämer 等^[79]利用 800 nm 飞秒激光在 20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 掺铊有源光纤中刻写 FBG 作为反射镜(FBG 的布拉格波长为 1078.7 nm,反射率为 96%,带宽为 0.8 nm),另一端采用光纤端面作为输出耦合器,得到了斜率效率为 78%,最大输出功率为 514 W 的一体化全光纤激光器。然而,这虽然解决了熔接问题,但是输出功率相对于利用传统紫外光刻写的 FBG 通过熔接构成的全光纤激光器(输出在千瓦以上)仍然有很大差距。2015 年,他们利用 800 nm 飞秒激光脉冲和啁啾相位掩模板在无源大模场光纤(Nufern 20/400)中制备了高反射率啁啾光纤光栅,反射带宽为 4.3 nm,反射率为 99%,中心波长为 1070 nm,与之相匹配的低反射镜带宽为 1.5 nm,反射率约 15%。将两个 FBG 熔接到 15 m 长的增益光纤上(Nufern 20/400),得到了 1020 W 的激光输出,斜率效率为 78%,光束质量因子 M^2 为 1.18^[20]。该光栅虽然与传统紫外光刻写 FBG 的性能还有差距,但这项研究展示了利用飞秒激光在有源大模场光纤中直接刻写 FBG 建立激光器的可能性。2019 年,Krämer 等^[37]采用相位掩模扫描技术,利用 800 nm 飞秒激光直接在掺铊大模场光纤(20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$)中写入 FBG 作为光反射腔镜,另一端以斜切光纤端面作为输出腔镜,所构成的光纤激光器输出功率达到 1.9 kW。激光器的结构和相关结果如图 12 所示。这是以飞秒激光在有源光纤中直接刻写 FBG 作为激光器腔镜首次实现千瓦级以上的光纤激光器。2020 年,Krämer 等^[38]利用飞秒激光在 20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 无源光纤中刻写 FBG,并与掺铊光纤熔接成激光器,实现了 5 kW 的激光输出,其承载功率与传统紫外激光刻写的大模场 FBG 的承载功率相当。同时,他们发现光纤激光器运转时产生自退火效应可大大减小飞秒激光刻写 FBG 时所产生的缺陷,提高激光器的输出效率。这对利用飞秒激光制备适用于高功率激光器的大模场 FBG 研究来说具有深远的意义。

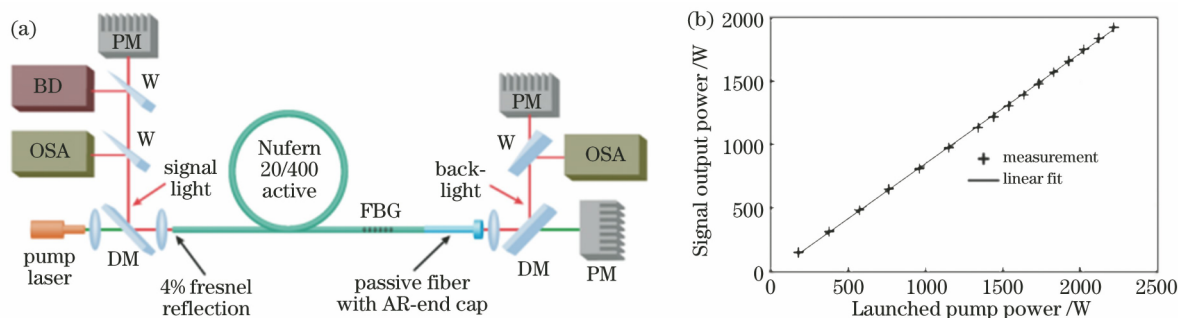


图 12 基于掺镱大模场 FBG 的光纤激光器实验装置及输出功率特性^[37]。(a)激光器装置示意图；
(b)激光输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 12 Experimental setup and output power characteristics of fiber laser based on Yb-doped large mode field FBG^[37].

(a) Schematic diagram of the laser setup; (b) laser output power versus pump power

哈尔滨工业大学开展了利用飞秒激光相位掩模法在掺铥大模场光纤刻写 FBG 实现中红外光纤激光器的研究。他们以飞秒激光在双包层掺铥光纤 ($25\ \mu\text{m}/250\ \mu\text{m}$) 中刻写周期为 $1.35\ \mu\text{m}$ 的 FBG 作为激光器的高反射腔镜,另一端以光纤端面作为输出耦合镜,在 $1.96\ \mu\text{m}$ 波长处得到输出功率为 $2.41\ \text{W}$,斜率效率为 37.7% 的激光输出^[80]。

对于大芯径的少模大模场光纤激光器,模式控制技术非常关键。利用飞秒激光能够灵活控制写入光纤中光栅的位置及截面折射率分布结构,实现激光横向模式和偏振的选择。这在较大数值孔径的大模场光纤中实现模式抑制,输出单模激光提供可能^[81]。耶拿大学研究人员根据 LP_{01} 和 LP_{11} 模式在光纤中模场空间分布的不同,在一对 FBG 形成的 F-P 腔中间段引入局部折射率变化区域,通过控制折射率变化区域与 LP_{01} 和 LP_{11} 模式在纤芯的重叠实现了激光器中横模的选择^[29]。此外, Talbot 等^[82] 利用飞秒激光相位掩模板法在纤芯 $17\ \mu\text{m}$ 的双包层掺铒有源光纤中刻写 FBG,并将其作为泵浦光的反射镜,使激光器的斜率效率提高了 33% ,同时最优光纤长度减小了 25% 。

4 结束语

FBG 飞秒激光制备技术具有适用于各种光纤、制备 FBG 耐温性好、模式调控灵活以及隔涂覆层加工等特点,在光纤激光器中具有广泛的应用。本文概述了飞秒激光制备光纤光栅的刻写方法、特点及所用的飞秒激光光源,介绍了 FBG 飞秒激光制备技术在单模近红外光纤激光器、中红外光纤激光器以及大模场光纤激光器中的应用。其中,FBG 飞秒激光制备技术及其在单模近红外光纤激光器的应用研

究已经很多,多模光纤 FBG 飞秒激光制备技术及其在激光器的应用研究正在兴起;利用飞秒激光在氟化物等中红外光纤中刻写 FBG 并实现中红外光纤激光器已经成为近期的研究热点;在大模场 FBG 方面,利用飞秒激光在有源光纤中直接制备高功率 FBG 已成为可能。

由于光纤激光器对光纤光栅的损耗和模式具有极高的要求,利用飞秒激光刻写用于光纤激光器的 FBG 仍需要解决以下问题:首先,飞秒激光诱导光纤光栅形成主要基于光学非线性效应,由于飞秒激光光强空间分布会导致不同机制的光栅结构形成,FBG 温度稳定性降低,其结构的破坏使 FBG 的散射增加。如何通过控制飞秒激光参数实现飞秒激光诱导光栅结构物性的靶向控制是实现低损耗高稳定性 FBG 的关键。其次,光纤的柱形结构导致的像差以及折射会使飞秒激光在光纤内的焦点位置发生偏折和畸变,影响飞秒激光刻写 FBG 结构在光纤截面上的分布位置和均匀性。最后,飞秒激光诱导 FBG 所产的色心结构存在宽带吸收损耗,不仅带来光纤激光器谐振腔的损耗,在高功率激光器中更容易使 FBG 温度升高从而导致其布拉格波长偏移甚至破坏。

飞秒激光制备的 FBG 独特的物理化学特性赋予了它广阔的应用前景,随着各类光纤激光器的不断发展及工业需求,基于 FBG 的光纤激光器将会在众多领域大放光彩,为科学、国防、工业及公众的日常生活增添新的活力。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity on optical fibre waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied

- Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- [3] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [4] 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.
- [5] Mihailov S J, Grobnc D, Smelser C W, et al. Induced Bragg gratings in optical fibers and waveguides using an ultrafast infrared laser and a phase mask[J]. Laser Chemistry, 2008, 2008: 1-20.
- [6] Cao H J, Si J H, Chen T, et al. Temperature and strain dual-parameter heterogeneous fiber Bragg grating sensor made by femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702009.
曹后俊, 司金海, 陈涛, 等. 飞秒激光制备异质光纤光栅的温度应变双参数传感器[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702009.
- [7] 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.
- [8] Atkins R M, Mizrahi V, Erdogan T. 248 nm induced vacuum UV spectral changes in optical fibre preform cores; support for a colour centre model of photosensitivity[J]. Electronics Letters, 1993, 29(4): 385-387.
- [9] Cordier P, Doukhan J C, Fertein E, et al. TEM characterization of structural changes in glass associated to Bragg grating inscription in a germanosilicate optical fibre preform[J]. Optics Communications, 1994, 111(3/4): 269-275.
- [10] Feng F R, Ran Y, Liang Y Z, et al. Thermally triggered fiber lasers based on secondary-type-in Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2470-2473.
- [11] Qiu J R, Qian G D, Hirao K. Space-selective microscopic modification of glasses by a femtosecond laser and its applications[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(1): 1-9.
邱建荣, 钱国栋, Kazuyuki Hirao. 飞秒激光空间选择性诱导玻璃微结构及应用[J]. 材料研究学报, 2003, 17(1): 1-9.
- [12] Chen C. Fabrication of robust fiber gratings by femtosecond laser and their applications [D]. Changchun: Jilin University, 2014: 11-12.
陈超. 耐高温光纤光栅的飞秒激光制备及其应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 11-12.
- [13] Smelser C W, Mihailov S J, Grobnc D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask[J]. Optics Express, 2005, 13(14): 5377-5386.
- [14] Bernier M, Faucher D, Vallée R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 454-456.
- [15] Bernier M, El-Amraoui M, Couillard J F, et al. Writing of Bragg gratings through the polymer jacket of low-loss As_2S_3 fibers using femtosecond pulses at 800 nm[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3900-3902.
- [16] Du Y, Si J H, Chen T, et al. Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 100606.
杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 100606.
- [17] Grobnc 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.
- [18] Becker M, Joachim B, Brückner S, et al. Fiber Bragg grating inscription with DUV femtosecond exposure and two beam interference[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7386: 73862Y.
- [19] Dostovalov A V, Wolf A A, Skvortsov M I, et al. Femtosecond-pulse inscribed FBGs for mode selection in multimode fiber lasers[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 52: 101988.
- [20] Voigtländer C, Krämer R G, Liem A, et al. 1 kW fiber laser oscillator with fs-written fiber Bragg gratings[C]// The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2015, June 21-25, 2015, Munich Germany. Washington D. C.: The Optical Society of America, 2015: CJ_11_3.
- [21] Li S, Sauer M, Gaeta Z D, et al. Broad-band dynamic dispersion compensation in nonlinear fiber-based device[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 29-38.

- [22] 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.
- [23] 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*, 2007, 86(2): 153-157.
- [24] Wang R Z, Si J H, Chen T, et al. Fabrication of high-temperature tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 23684-23689.
- [25] Pham X, Si J H, Chen T, et al. Wide range refractive index measurement based on off-axis tilted fiber Bragg gratings fabricated using femtosecond laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3027-3034.
- [26] Voigtländer C, Krämer R G, Goebel T A, et al. Variable wavefront tuning with a SLM for tailored femtosecond fiber Bragg grating inscription[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 17-20.
- [27] Marshall G D, Williams R J, Jovanovic N, et al. Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19844-19859.
- [28] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, et al. Photoinduced modifications in fiber gratings inscribed directly by infrared femtosecond irradiation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(21): 2266-2268.
- [29] Dostovalov A V, Wolf A A, Parygin A V, et al. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16232-16237.
- [30] Wikszak E, Thomas J, Klingebiel S, et al. Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2756-2758.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Antipov S, Ams M, Williams R J, et al. Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 30-40.
- [34] Theodosiou A, Aubrecht J, Peterka P, et al. Er/Yb double-clad fiber laser with fs-laser inscribed plane-by-plane chirped FBG laser mirrors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(5): 409-412.
- [35] Theodosiou A, Lacraz A, Stassis A, et al. Plane-by-plane femtosecond laser inscription method for single-peak Bragg gratings in multimode CYTOP polymer optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5404-5410.
- [36] Antipov S, Ams M, Williams R, et al. Femtosecond laser written fibre Bragg gratings with arbitrary reflection and dispersion profiles[C]// The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2015, June 21-25, 2015, Munich, Germany. Washington, D. C.; The Optical Society of America, 2015: CM_4_3.
- [37] Krämer R G, Matzdorf C, Liem A, et al. Femtosecond written fiber Bragg gratings in ytterbium-doped fibers for fiber lasers in the kilowatt regime[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 723-726.
- [38] Krämer R G, Möller F, Matzdorf C, et al. Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1447-1450.
- [39] Nishii J, Hosono H, Kawazoe H, et al. Ultraviolet-radiation-induced chemical reactions through one-and two-photon absorption processes in GeO₂-SiO₂ glasses[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(10): 1184-1186.
- [40] Bernier M, Vallée R, Morasse B, et al. Ytterbium fiber laser based on first-order fiber Bragg gratings written with 400 nm femtosecond pulses and a phase-mask[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18887-18893.
- [41] Dostovalov A V, Wolf A A, Mezentsev V K, et al. Quantitative characterization of energy absorption in femtosecond laser micro-modification of fused silica[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32541-32547.
- [42] Leich M, Fiebrandt J, Jetschke S, et al. In situ FBG inscription during fiber laser operation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 676-678.
- [43] 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): 19169-19173.

- [44] Zhang G D, Cheng G H, Bhuyan M K, et al. Efficient point-by-point Bragg gratings fabricated in embedded laser-written silica waveguides using ultrafast Bessel beams[J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2161-2164.
- [45] Zhang G D, Cheng G H, Bhuyan M K, et al. Ultrashort Bessel beam photoinscription of Bragg grating waveguides and their application as temperature sensors[J]. Photonics Research, 2019, 7(7): 806-814.
- [46] Paipulas D, Mikutis M, Sirutkaitis V, et al. Volumetric modifications in fused silica using Gaussian and Bessel femtosecond laser beams[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8786: 87860D.
- [47] Velpula P K, Bhuyan M K, Courvoisier F, et al. Spatio-temporal dynamics in nondiffractive Bessel ultrafast laser nanoscale volume structuring[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2): 230-244.
- [48] Pissadakis S, Livitziis M, Tsibidis G D. Investigations on the Bragg grating recording in all-silica, standard and microstructured optical fibers using 248 nm, 5 ps laser radiation[J]. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications, 2009, 4: 09049.
- [49] Nishimura A, Takenaka Y, Furusawa A, et al. Thermal management of heat resistant FBG sensing for high temperature industrial plants[J]. E-Journal of Advanced Maintenance, 2017, 9(2): 52-59.
- [50] Lai Y, Martinez A, Khrushchev I, et al. Distributed Bragg reflector fiber laser fabricated by femtosecond laser inscription[J]. Optics Letters, 2006, 31(11): 1672-1674.
- [51] 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.
- [52] Jovanovic N, Åslund M, Fuerbach A, et al. Narrow linewidth, 100 W CW Yb³⁺-doped silica fiber laser with a point-by-point Bragg grating inscribed directly into the active core[J]. Optics Letters, 2007, 32(19): 2804-2806.
- [53] Xu O. Research and progress of all-fiber single-longitudinal mode lasers based on fiber grating technologies[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030010.
- 许鸥. 基于光纤光栅技术的全光纤单纵模激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030010.
- [54] Zhou K J, Zhao Q L, Huang X, et al. kHz-order linewidth controllable 1550 nm single-frequency fiber laser for coherent optical communication[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 19752-19759.
- [55] Fan W, Yang X T, Li X C, et al. Stable single frequency and single polarization DFB fiber lasers operated at 1053 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1189-1192.
- [56] Pham X, Si J H, Chen T, et al. Ultra-short DBR fiber laser with high-temperature resistance using tilted fiber Bragg grating output coupler[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38532-38540.
- [57] Grobnc D, Mihailov S J, Walker R B, et al. Bragg gratings made with a femtosecond laser in heavily doped Er-Yb phosphate glass fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(12): 943-945.
- [58] Hofmann P, Voigtlander C, Nolte S, et al. 550-mW output power from a narrow linewidth all-phosphate fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(5): 756-760.
- [59] Huang F Q, Chen T, Si J H, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing[J]. Optics Communications, 2019, 452: 233-237.
- [60] Chah K, Kinet D, Wuilpart M, et al. Femtosecond-laser-induced highly birefringent Bragg gratings in standard optical fiber[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 594-596.
- [61] Jovanovic N, Thomas J, Williams R J, et al. Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings enable simple, linearly polarized fiber lasers[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6082-6095.
- [62] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.
- [63] Williams G M, Tsai T E, Merzbacher C I, et al. Photosensitivity of rare-earth-doped ZBLAN fluoride glasses[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1357-1362.
- [64] Song C W, Yang L J, Wang Y, et al. Technology of fiber grating inscription with phase mask and IR femtosecond laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1274-1278.
- 宋成伟, 杨立军, 王扬, 等. 相位掩模法红外飞秒激光刻写光纤光栅技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1274-1278.
- [65] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W. Femtosecond

- IR laser inscription of Bragg gratings in single- and multimode fluoride fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2686-2688.
- [66] Bernier M, Faucher D, Caron N, et al. Highly stable and efficient erbium-doped 2.8 μm all fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16941-16946.
- [67] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers [J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [68] Fortin V, Maes F, Bernier M, et al. Watt-level erbium-doped all-fiber laser at 3.44 μm [J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 559-562.
- [69] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [70] Goya K, Matsukuma H, Uehara H, et al. Plane-by-plane femtosecond laser inscription of first-order fiber Bragg gratings in fluoride glass fiber for in situ monitoring of lasing evolution[J]. Optics Express, 2018, 26(25): 33305-33313.
- [71] Bharathan G, Woodward R I, Ams M, et al. Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30013-30019.
- [72] Hudson D D, Williams R J, Withford M J, et al. Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [73] Woodward R I, Majewski M R, Bharathan G, et al. Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1471-1474.
- [74] Fortin V, Jobin F, Larose M, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 491-494.
- [75] Paradis P, Fortin V, Aydin Y O, et al. 10 W-level gain-switched all-fiber laser at 2.8 μm [J]. Optics Letters, 2018, 43(13): 3196-3199.
- [76] Haboucha A, Fortin V, Bernier M, et al. Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked 2.8 μm Er^{3+} : fluoride glass fiber laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3294-3297.
- [77] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [78] Yang B L, Wang X L, Ye Y, et al. The output power of all fiber oscillator based on domestic grating exceeds 6 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0116001.
- 杨保来, 王小林, 叶云, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 6 kW [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0116001.
- [79] Krämer R G, Liem A, Voigtlander C, et al. 514 W monolithic fiber laser with a femtosecond inscribed fiber Bragg grating[C]// 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE, 2013: 14253192.
- [80] Zhang Y, Tian Y, Song C, et al. High efficient single-end operation Tm-doped silica fiber laser based on intracore FBGs[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(8): 590-593.
- [81] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [82] Talbot L, Paradis P, Bernier M. All-fiber laser pump reflector based on a femtosecond-written inner cladding Bragg grating[J]. Optics Letters, 2019, 44(20): 5033-5036.