

飞秒激光制备光纤布拉格光栅研究进展

丁宝艳^a, 赵强^{a,b}, 王相飞^b, 司鹏举^b, 付小涵^b, 赵金磊^b, 于雨^{a,b}

(齐鲁工业大学(山东省科学院) a. 海洋仪器仪表研究所; b. 海洋技术科学学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 光纤布拉格光栅(FBG)具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小和成本低等优点,而飞秒激光制备的FBG更具有耐高温的独特优势。文章首先对飞秒激光刻写FBG的3种主流方法,包括飞秒激光相位掩模板法、飞秒激光直写法和飞秒激光全息干涉法进行了介绍,对比分析了各种制备方法的优缺点,其次着重对飞秒激光制备的FBG的温度、压力(应变)和折射率传感的原理及其应用进行了综述,最后指出了飞秒激光制备的FBG在河水、湖泊和海洋等领域环境监测中的应用前景。

关键词: 飞秒激光; 光纤布拉格光栅; 传感应用

中图分类号: TN249

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2022)03-0031-08

Review of Fiber Bragg Grating Fabricated by Femtosecond Laser Processing

DING Bao-yan^a, ZHAO Qiang^{a,b}, WANG Xiang-fei^b, SI Peng-ju^b, FU Xiao-han^b, ZHAO Jin-lei^b, YU Yu^{a,b}

(a. Institute of Oceanographic Instrumentation, b. School of Ocean Technology Sciences,

Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266061, China)

Abstract: Fiber Bragg Grating (FBG) has the advantages of anti-electromagnetic interference, corrosion resistance, small size and low cost. Moreover, the FBG fabricated by femtosecond laser has the unique advantages of high temperature resistance. Firstly, three mainstream methods for writing FBG with femtosecond laser are introduced, including femtosecond laser phase mask method, femtosecond laser direct writing method, and femtosecond laser holographic interferometry. The advantages and disadvantages are compared and analyzed. Secondly, the principle and application on temperature, pressure (strain) and refractive index sensing of FBG prepared by femtosecond laser are reviewed. Finally, the future development of FBG fabricated by femtosecond laser in lakes, oceans and other fields is prospected.

Key words: femtosecond laser; FBG; sensing applications

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是现在光通信网络、光纤激光器和光纤传感等多个领域的核心器件,自1978年Hill等人^[1]在实验中首次发现光纤的光敏性,并通过驻波法在光纤中写入FBG以来已有40多年历史。利用紫外光诱导FBG的方法经过多年发展,在横向全息写入技术^[2]、逐点刻写技术^[3]和相位掩模板技术^[4]等写作技术方面的研究逐渐成熟,FBG的应用范围也不断扩大,但利用这种方法制备FBG时,须对光纤进行载氢增敏处理^[5],导致制备的光栅不能在高温环境下使用。

针对传统紫外光诱导FBG存在的上述问题, Mihailov等人^[6]首次使用飞秒激光结合相位掩模板技术,将FBG刻写在标准的掺Ge电信光纤(康宁SMF-28)上,所刻光栅在温度为300℃的情况下,两

周后依然没有被擦除,表明其具有高温稳定性;2004年,英国Aston大学的Martinez等人^[7]在没有经过光敏化的单模光纤中实现了飞秒激光逐点刻写FBG,这种刻写方法具有刻写速度快的优点;2005年,加拿大通讯研究中心的Smelser等人^[8]利用飞秒激光结合相位掩模板技术在光纤(SMF-28)上刻写了I型(激光能量低于材料损伤阈值)和II型(激光能量等于或高于材料损伤阈值)FBG,并对其形成原理进行了对比研究,为两种类型FBG的后续发展奠定了基础;2009年,英国Aston大学的Suo等人^[9]利用飞秒激光结合相位掩模板技术在铬酸盐和硝酸盐单芯和多芯光纤中写入二阶和三阶FBG,其中二阶FBG具有较高的温度灵敏度(24.7 pm/℃, 10~70℃)和应变灵敏度(1.219 pm/με),为其应用于温度以及应变传感提供了可能;2012年,加拿大拉瓦尔大学的Bernier M等人^[10]在未剥除光纤涂层条件下,利用飞秒激光结合相位掩模板技术在

收稿日期:2021-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61933004,61405106);山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2019MF022,ZR2020MF108);山东省军民融合资助项目(2019JMRH0105);泰山学者工程专项经费资助项目、大学生创新创业资助项目(202110431095)

作者简介: 丁宝艳(1997-),女,山东青岛人。硕士,主要研究方向为光纤压力传感器。

通信作者: 赵强,副研究员。E-mail: zqhero9494@163.com

光纤上成功写制高反射率(90%, 100 °C退火 64 min后)的FBG,为全光纤中红外激光光源的发展奠定了基础;2019年,Guo等人^[11]利用飞秒激光逐线扫描法在单晶蓝宝石光纤中制备了三阶蓝宝石FBG,温度灵敏度(34.96 pm/°C, 1 000~1 600 °C)和应变灵敏度(1.45 pm/μ ϵ , 1 600 °C)稳定,在恶劣环境下的结构健康监测中具有潜在的应用价值;2020年,Liu等人^[12]通过飞秒激光逐点刻写技术在保偏光纤上刻写FBG,实验测得其温度灵敏度超过14 pm/°C(30~90 °C),表明其可用于光纤传感及光纤激光器领域。

相比于紫外激光刻写技术,飞秒激光在刻写FBG时不需对光纤进行增敏处理,可直接对纤芯折射率进行局域化调制,从而获得光栅结构。通过这种方法制备的光纤光栅温度稳定性极好,可在高温下使用。鉴于飞秒激光制备的FBG的突出优势,本文对国内外飞秒激光制备FBG技术及其传感应用进行了全面综述,首先对各种利用飞秒激光制备FBG的方法进行了介绍,其次总结分析了飞秒激光制备FBG在温度、压力(应变)和折射率传感领域的应用,最后对全文进行了总结及展望。

1 飞秒激光制备FBG的方法

飞秒激光有着极窄的脉冲宽度和极高的峰值功率,可以作用在石英和蓝宝石等光纤上实现光纤内的热量累积加工,从而获得较大的折射率调制,形成光纤光栅。目前运用飞秒激光制备FBG的方法主要有3种:相位掩模板法^[4]、飞秒激光直写法^[11,13]和全息干涉法^[13]。

1.1 飞秒激光相位掩模板法

飞秒激光相位掩模板法是将飞秒激光光束经过具有特定周期的相位掩模板后发生衍射,将入射的飞秒激光分成两束光,在两束光的重叠区域形成干涉条纹,从而在光纤中刻写光栅。图1所示为飞秒激光相位掩模板法制备FBG示意图,在实际使用时,需对其零级衍射光进行抑制,通常控制在5%以下^[14],由±1级衍射光参与干涉。最初的装置中相位掩模板的位置是固定的,称之为静态相位掩模板法,但采用这种方法产生的干涉图案长度受到光束直径的限制,且制成的FBG无法全部覆盖纤芯,由此,研究人员提出了一种动态相位掩模板法,又被称为扫描相位掩模板法,Thomas等人^[15]采用光纤与掩模板之间位置保持不变,而相对于激光光束一起平移的扫描方法制作了较长的光栅,在刻写FBG

时,当光栅长度大于20 mm时,光栅效率将不再变化,这意味着能够延伸光栅长度到带宽极限,因此利用这种方法可以刻写任意长度的FBG。

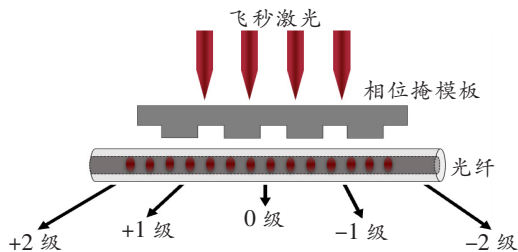


图1 飞秒激光相位掩模板法制备FBG示意图

相位掩模板法^[4]为目前研究和应用最为广泛的一种飞秒激光制备FBG的方法,其具有制备工艺简单、重复性好和成品率高等优点。然而利用该方法刻写FBG时,折射率调制的周期依赖于相位掩模板周期,需要根据光纤的折射率和FBG波长来选择特定周期的相位掩模板,同时由于掩模板的限制,光栅在光纤中生成的位置是不可灵活控制的,并且掩模板的价格也非常昂贵^[16],尽管如此,基于相位掩模板的FBG刻写技术依然在FBG批量生产中有着重要地位。

1.2 飞秒激光直写法

飞秒激光直写法通常分为逐点刻写法^[17]、逐线刻写法^[18]和逐面刻写法^[19]。其中,飞秒激光逐点刻写法刻写FBG是采用数值孔径较高的显微镜聚焦,利用飞秒激光沿着光纤点对点扫描,从而在纤芯中形成光栅的方法,图2所示为采用飞秒激光逐点刻写法制备FBG的加工系统。由于这种方法可以通过控制光纤移动速度来调节FBG的周期大小,因此其在新型FBG刻写和研究领域具有重要的地位^[20]。1999年,Kondo等人^[17]首次提出了飞秒激光逐点刻写技术,为后续将其应用于FBG刻写领域做了重要的铺垫;2019年,Wang教授课题组^[21]创

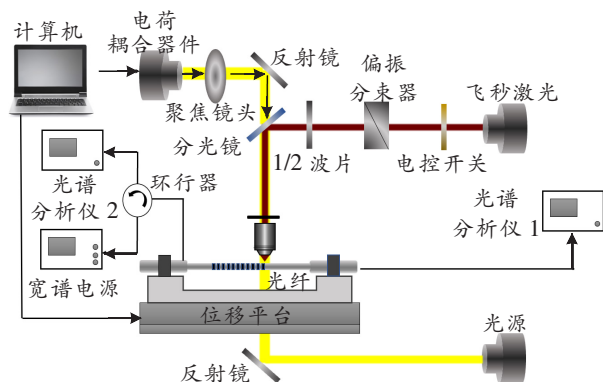


图2 飞秒激光逐点刻写法制备FBG的加工系统

新性地在同一根光纤的纤芯内,采用逐点刻写法平行地写制了多个 FBG,飞秒激光逐点法刻写 FBG 在此得到了充分的发展。

飞秒激光逐线刻写法刻写 FBG 是将飞秒激光沿光纤轴向的垂直方向扫描形成的,这样可以刻写出贯穿纤芯的结构,制备出的 FBG 偏振响应特性大幅减弱^[18],具有和掩模板法制备的 FBG 相近的散射损耗,与逐点刻写法相比降低了一个量级^[20],图 3 所示为逐线刻写法刻写光纤光栅的示意图。2010 年,英国 Aston 大学的 Zhou 等人^[18]首次采用飞秒激光逐线刻写法制备了 FBG;之后,华中科技大学的 Huang 等人^[22]以及深圳大学 Wang Y P 课题组^[23]均采用逐线刻写法在光纤中成功写制了具有温度和应变敏感性的相移 FBG。

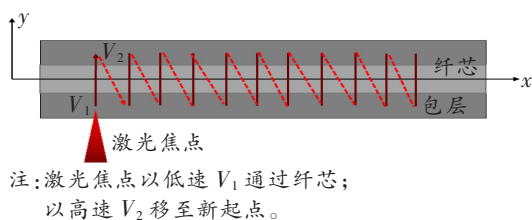


图 3 逐线刻写法示意图

飞秒激光逐面刻写法刻写 FBG 是在光纤截面上通过二维扫描形成的,这种方法避免了采用逐点和逐线刻写法制备 FBG 过程中光纤纤芯很难对准的问题,且使用逐面刻写法可以控制纤芯和包层的覆盖面积,从而减少 FBG 的偏振损耗^[24],图 4 所示为飞秒激光逐面刻写 FBG 装置图。塞浦路斯科技大学的 Kalli 课题组对飞秒激光直写技术有很深入的研究,2016 年,该课题组^[25]在未去涂覆层单模光纤上利用飞秒激光逐面刻写的方式刻写了 8 个不同谐振波长的光纤光栅阵列;2017 年,该课题组^[26]利用飞秒激光逐面刻写的方法在一光纤上刻写了只有一个谐振峰的 FBG。

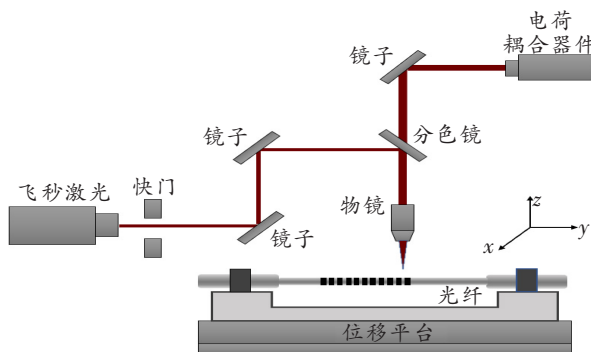


图 4 飞秒激光逐面刻写 FBG 装置图

采用飞秒激光直写法制备 FBG 时,可以灵活调

控制刻写光栅的周期、长度和折射率调制度分布等^[27],制备出具有折射率调制以及长度和色散可控的光纤光栅,制备过程中不需要模板支持,设计比较自由,加工精度也非常高。直写法与相位掩模板法相比,飞秒激光直写法更容易实现隔涂覆层加工,可有效保持光纤的强度和物理完整性,但是对于设备的稳定性和精准度要求较高,同时还会对设备造成一定的损耗。

1.3 飞秒激光全息干涉法

全息干涉法是利用激光的干涉特性制备 FBG,用两束相干光相互叠加聚焦在材料上,材料内部会形成明暗相间的干涉条纹,利用光纤材料的光敏性来获得周期性的光栅结构,图 5 所示为飞秒激光全息干涉法制备 FBG 示意图。2001 年,日本庆应义塾大学的 Ken 等人^[13]首次利用飞秒激光全息干涉技术制备出了 FBG;2008 年,德国耶拿光子技术研究所 Becker 等人^[28]利用深紫外飞秒激光(波长 262 nm)和塔尔博特干涉仪实现了 FBG 的全息干涉写制。

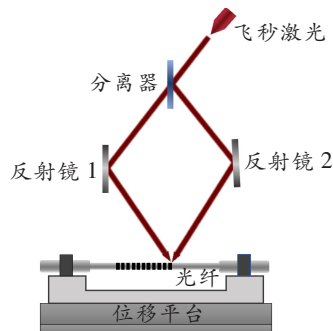


图 5 飞秒激光全息干涉法制备 FBG 示意图

利用全息干涉法制备 FBG 时不需要剥去光纤的涂覆层^[29],光栅的机械强度较好,且制备过程中可以通过调整两束激光的角度,灵活地改变干涉条纹的折射率周期性调制的间距^[30],即可以改变 FBG 的周期,但是 FBG 制备过程中两束相干光需要在飞秒激光空间宽度内相互匹配,由于飞秒激光脉宽极窄,匹配的难度非常大,因此对于设备的重复性和准确性要求极高,并且采用此法制备光栅所需的时间相对较长,不适用于大批量生产应用^[31]。

2 飞秒激光刻写 FBG 的传感应用

当 FBG 区域的外界环境改变时,FBG 的周期或折射率会实时发生相应改变,从而改变其波长或能量,通过对波长或能量的分析,即可得到外界环境的变化信息,达到传感的目的。图 6 所示为 FBG 传感原理图。

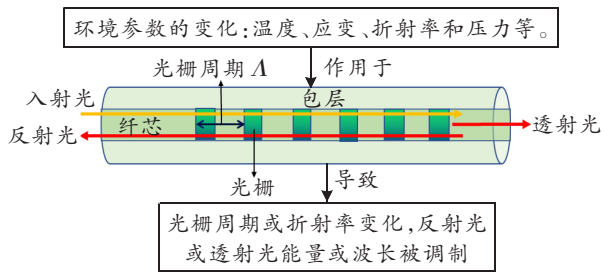


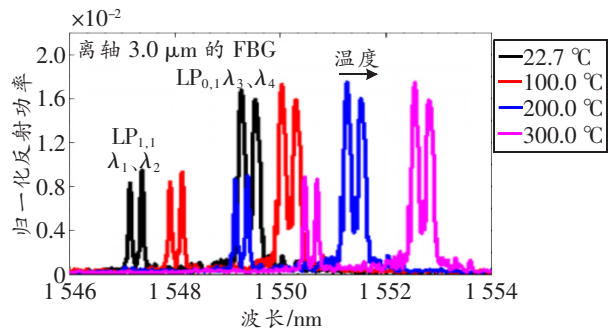
图6 FBG传感原理图

2.1 飞秒激光制备FBG应用于温度传感

当外界温度发生变化时,热胀冷缩会引起FBG周期和有效折射率发生变化,最终导致其中心波长发生变化,温度传感原理主要是通过检测中心波长的变化来进行温度测量。

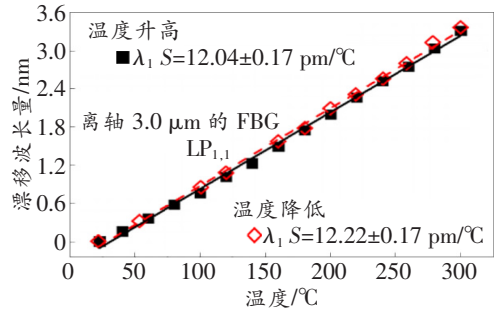
2019年,Zhang等人^[32]用飞秒激光逐点刻写技术在单模光纤(康宁SMF-28)中制备FBG并将其与光子晶体光纤和多模光纤依次级联构成干涉结构用于折射率和温度的测量,在30~120℃范围内,FBG的温度灵敏度为11.46 pm/℃,光子晶体光纤法布里-珀罗(Photonic Crystal Fiber Fabry-Perot,PCF-FP)温度灵敏度为8.62 pm/℃;2020年,Viveiros D等人^[33]通过飞秒激光直写法在单模光纤(SMF-28e)中写入离轴FBG,图7(a)所示为离轴3.0 μm FBG在不同温度下的反射谱,图7(b)所示为非线性波长漂移随温度的变化,结果表明离轴3.0 μm的FBG,在23~300℃范围内,其温度灵敏度为12 pm/℃;2021年,Chen等人^[34]利用飞秒激光逐点刻写法在单模光纤中刻写FBG,光纤纤芯中的FBG用于温度传感,20~80℃温度范围内其温度灵敏度为9.94 pm/℃;2021年,Zhu等人^[35]提出了一种利用飞秒激光逐点法在单模光纤中刻写具有包层模式耐高温达1 000℃的高温稳定FBG,实验测试25~65℃温度范围内其温度灵敏度大致为10 pm/℃。由以上进展可知,FBG的温度灵敏度大约为10 pm/℃。

通信单模光纤的最高温度限制在石英光纤的玻璃化转变温度1 050℃,当环境温度超过这一温度时,光纤内的折射率调制将完全消失,而蓝宝石光纤的熔化温度可达2 050℃,耐高温性明显优于石英光纤。Grobnic等人^[36]首次利用飞秒激光相位掩模板法制备出耐高温的蓝宝石FBG,图7(c)所示为蓝宝石FBG在室温下的反射谱,由图7(d)可知,在0~1 500℃的温度范围内,FBG共振波长随温度稳定变化,适用于2 000℃以下的分布式光学传感器阵列。Busch等人^[37]用飞秒激光相位掩模板法在



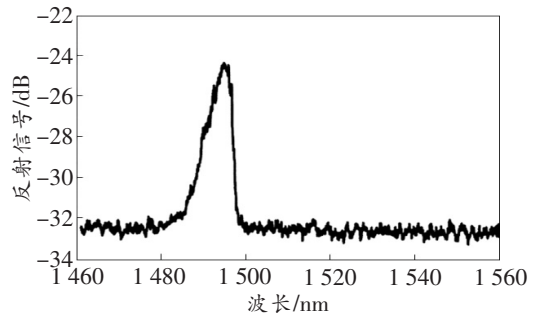
注:LP_{0,1}和LP_{1,1}均为FBG共振的一种模式;
λ₁,λ₂,λ₃和λ₄为FBG波长。

(a) 离轴3.0 μm FBG在不同温度下的反射谱^[33]

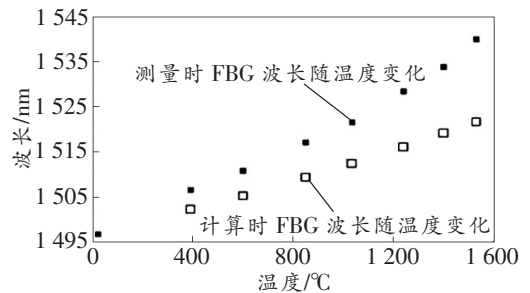


注:S为灵敏度。

(b) 非线性波长漂移随温度的变化图^[33]



(c) 蓝宝石FBG在室温下的反射谱^[36]



(d) 蓝宝石FBG共振波长随温度变化

图7 温度传感器进展图

单晶蓝宝石光纤中刻写FBG,在测试系统中加入多模激励使所产生的蓝宝石FBG的反射强度在高达1 745℃的高温下也保持稳定。虽然蓝宝石FBG具有耐高温的优点,但其损耗较大,不适用于长距离传输。

热再生光栅也可提高FBG的高温稳定性。2012年,Cook等人^[38]提出了一种经过热再生处理的再生FBG,这种光栅可在900℃高温下存活4 h

以上,但其再生效率较低;2016年,He等人^[39]提出了一种热再生的负折射率光纤光栅,获得了较高的再生效率,可在1 000℃的环境中稳定工作超过10h,实验表明,这种负折射率光栅热稳定性高于I型折射率调制,低于II型折射率调制。

2.2 飞秒激光制备FBG应用于压力(应变)传感

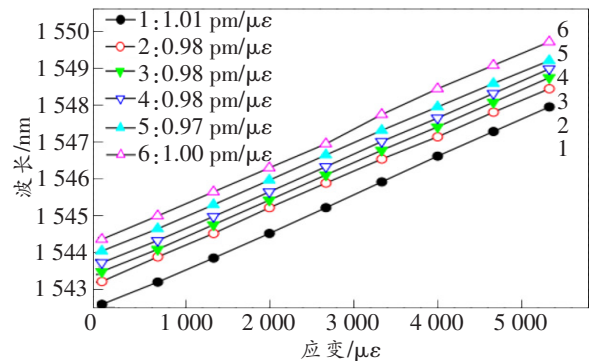
外界环境压力或应变作用到光纤上时,会使FBG的有效折射率和光栅周期改变,表现为FBG波长漂移,从而反映出压力或应力的变化。

2019年,Laarossi等人^[40]利用飞秒激光逐点刻写法在覆金光纤上刻写FBG,实验结果表明其最大应变测量可达到4 144 $\mu\epsilon$,应变灵敏度为1.06 $\text{pm}/\mu\epsilon$;2019年,Sun等人^[41]利用飞秒激光相位掩模板法制备了FBG,并将其与倾斜FBG组合在一起形成相移FBG,测量范围0~3 500 $\mu\epsilon$ 内其应变灵敏度为0.867 $\text{pm}/\mu\epsilon$,可应用于应变检测。

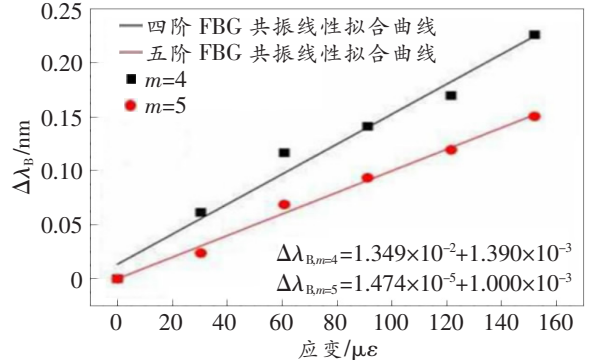
飞秒激光制备FBG的应变传感在大型结构健康监测中发挥着极其重要的作用。Ecke等人^[42]研制了基于多路FBG技术的光纤光栅传感器网络,在-1 000~+3 000 $\mu\epsilon$ 的应变范围内,FBG波长偏移超过2.6 nm,将其用于确定X-38飞船框架组件的机械载荷分布。Jörg等人^[43]用飞秒激光逐点刻写FBG并用于海上风力发电机组电力电缆应变监测,主要通过监测机舱(含发电机)旋转导致电缆内部产生的应变来确定电缆的寿命。

飞秒激光制备的FBG具有较高耐热性,在高温等恶劣环境下的传感也有其独特的优势。Liu等人^[44]利用飞秒激光相位掩模板法制备出多模FBG,如图8(a)所示,由随应变变化的6个共振波长位移图可知,其应变灵敏度大约为0.98 $\text{pm}/\mu\epsilon$,该FBG能承受1 100℃以上的高温;2018年,Chen等人^[45]利用飞秒激光相位掩模板法刻写了高阶蓝宝石FBG,如图8(b)所示,其四阶和五阶共振的应变灵敏度分别为1.39和1.00 $\text{pm}/\mu\epsilon$,实验中测试温度最高达1 690℃;2018年,Xiang等人^[46]利用飞秒激光相位掩模板法在多芯光子晶体光纤中刻写耐高温FBG,传输损耗降低到50%所对应的温度约为970℃,如图8(c)所示,实验测试结果表明,其应变灵敏度为1.2 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。飞秒激光制备的FBG也可在高温环境下进行压力传感;2010年,Jewart等人^[47]利用飞秒激光相位掩模板法在带气孔的微结构光纤中诱导出FBG用于800℃高温下的压力传感。

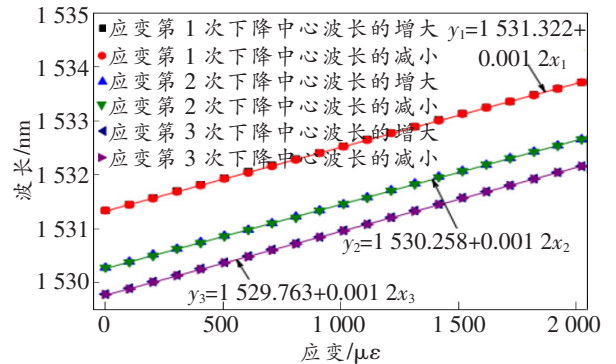
FBG也多用于水压气压的监测。2017年,Huang等人^[48]利用飞秒激光相位掩模板法在微结



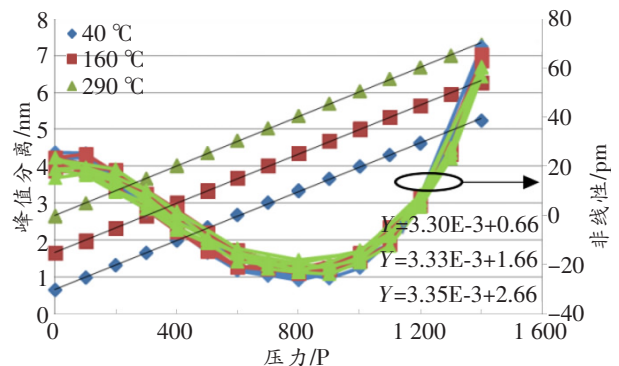
(a) 随应变变化的6个共振波长位移图^[44]



(b) 四阶和五阶FBG共振应变响应特性^[45]



(c) 波长随应变变化曲线^[46]



(d) 不同温度下压力校准时布拉格峰的变化

注: $\Delta\lambda_B$ 为FBG共振波长变化量; m 为FBG共振阶数;
 $\Delta\lambda_{B,m=4}$ 为四阶FBG共振波长变化量;
 $\Delta\lambda_{B,m=5}$ 为五阶FBG共振波长变化量; x_1 、 x_2 和 x_3 为应变值;
 y_1 、 y_2 和 y_3 为波长值; Y 为压力灵敏度。

图8 压力(应变)传感进展图

构光纤中刻写FBG用于井下压力监测系统,实验结果如图8(d)所示,对于不同的温度,其压力灵敏度

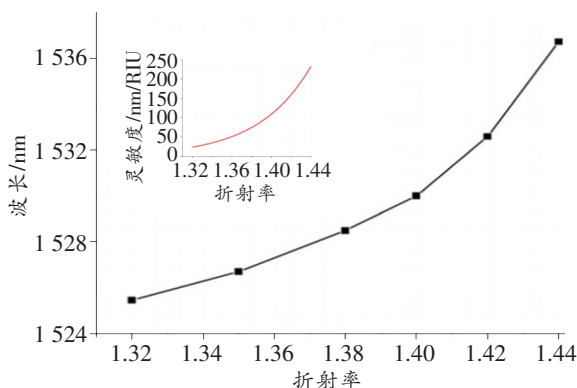
几乎保持不变,从40℃的3.30 pm/bar升到290℃的3.35 pm/bar;2018年,Ko等人^[49]提出了一种基于FBG用于动态水压测量的传感器,该传感器的测量范围为0~10 000 Pa,分辨率为2 Pa;2020年,Luo等人^[50]设计了一种由空腔调制的相移FBG来测量气体压力的装置,FBG由飞秒激光逐线刻写法制备,其压力灵敏度为1.22 nm/MPa。

2.3 飞秒激光制备FBG应用于折射率传感

光纤光栅的纤芯或包层的模式有效折射率会随着外界环境折射率变化而变化,并引起耦合模相位匹配条件的变化,进而导致光栅谐振峰波长漂移和损耗峰幅值变化,这一特性使得光纤光栅可应用到折射率传感领域^[51]。

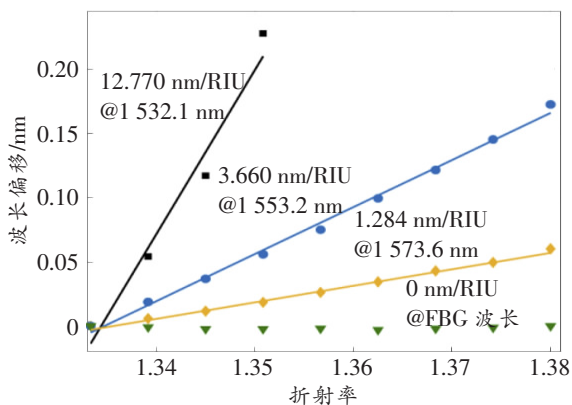
光纤光栅本身对周围环境折射率变化不敏感,通常利用特殊的光栅或者对光栅进行特殊处理,来实现折射率传感。华中科技大学的Zhang等人^[52]从理论上推导出微纳FBG的传输模型,得出微纳FBG的灵敏度是随着光纤光栅直径的减小而增大的结论,该研究为微纳FBG折射率传感的应用做了理论铺垫;2010年,香港理工大学的Fang等人^[53]通过飞秒激光相位掩模板法在微纳光纤上成功刻写FBG,制成了微纳FBG折射率传感器,实验结果如图9(a)所示,当光纤直径为2 μm、折射率为1.44时,其最大灵敏度为231.4 nm/RIU;2014年,Warren-smith等人^[54]利用飞秒激光直写法将FBG写入露芯微结构光纤中,折射率灵敏度为1.1 nm/RIU,虽然其灵敏度不高,但在一定条件下其最小折射率差为 5.5×10^{-3} RIU,且可以通过减小纤芯直径的方法提高灵敏度;2016年,Liao等人^[55]利用飞秒激光逐点法刻写了D形FBG且成功用于液体折射率传感,在折射率为1.45处灵敏度为30 nm/RIU;2018年,Zhang等人^[56]利用飞秒激光相位掩模板法刻写了带超折射率调制的高阶倾斜FBG,折射率灵敏度最大值为33.71 nm/RIU;2020年,He等人^[57]利用飞秒激光逐点刻写法刻写FBG并结合光纤包层抛光,改变光栅区域周围的倏逝场来实现折射率传感,测氯化钠溶液折射率时其折射率灵敏度和线性度分别为854.2 nm/RIU和0.998 9;2021年,Zhao等人^[58]设计了一种基于飞秒激光刻写FBG用于温度传感,对光纤光栅进行氢氟酸腐蚀实现高灵敏度折射率传感,折射率在1.333 0~1.402 7范围内,灵敏度为-49.044 dBm/RIU;同年,Zhu等人^[35]利用飞秒激光逐点刻写法制备了具有包层模式的高温稳定

FBG,可用于1 000℃高温下的折射率传感,如图9(b)所示,实验结果表明,其共振波长越小,折射率灵敏度越高。由以上进展可知,飞秒激光制备的FBG折射率传感器具有折射率灵敏度高和耐热性良好等优点,在生物、医学和化学等领域有很广的应用前景。



注:插图为直径2 μm的微纳光纤中FBG不同阶模式的折射率灵敏度

(a) 在不同阶的共振模式下,波长随外部折射率的变化而变化^[53]



(b) 共振波长随周围液体折射率的变化及其拟合斜率^[51]

图9 折射率传感进展图

3 结束语

本文首先对飞秒激光制备FBG的3种主流方法包括飞秒激光相位掩模板法、飞秒激光直写法和飞秒激光全息干涉法进行了介绍,之后对飞秒激光制备FBG在温度、压力(应变)和折射率传感领域的应用进行了综述。飞秒激光制备FBG在温度传感领域的应用比较成熟,通常石英光纤中刻写的FBG温度灵敏度在10 pm/℃左右,但其测量最高温度受制于石英玻璃转化温度1 050℃;蓝宝石FBG的测温最高能达到1 700℃以上,在高温传感领域有着极大的应用优势,但其损耗问题严重,成本昂贵,影响了其实用化进度;热再生光栅是一种特殊的具有高温稳定性的光栅,可在1 000℃左右稳定超过

10 h,提高其再生效率是热再生处理的关键;飞秒激光制备 FBG 的压力(应变)传感在大型结构健康检测、高温下的压力(应变)传感和水压气压检测等领域的应用也非常多;FBG 本身对折射率变化不敏感,选用微纳光纤或对光纤进行特殊的处理,可以实现折射率传感,其在生物、医学和化学等领域具有很大的应用前景。

利用飞秒激光制备的 FBG 传感器件非常丰富,如河水和湖泊领域用于测量温度和深度的温深仪,海洋领域的温盐深探测器件,海底热液和冷泉等特殊环境监测器件,应用于管道及井下的压力计等,随着各领域应用需求的增加以及科研工作的进行,飞秒激光制备的 FBG 将会在更多领域得到应用,为国防、工业以及人们的生活增添新的活力。

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] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15):823—825.
- [3] Malo B, Hill K O, Bilodeau F, et al. Point-by-point Fabrication of Micro-Bragg Gratings in Photosensitive Fibre Using Single Excimer Pulse Refractive Index Modification Techniques [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(18):1668—1669.
- [4] 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.
- [5] Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V, et al. High Pressure H₂ Loading as a Technique for Achieving Ultra-high UV Photosensitivity and Thermal Sensitivity in GeO₂ Doped Optical Fibres[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(13):1191—1193.
- [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] 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.
- [8] Smelser C W, Mihailov S J, Grobncic 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.
- [9] Suo R, Lousteau J, Li H, et al. Fiber Bragg Gratings Inscribed Using 800 nm Femtosecond Laser and a Phase Mask in Single and Multi-core Mid-IR Glass Fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9):7540—7548.
- [10] Bernier M, Ei-amraoui M, Couillard J F, et al. Writing of Bragg Gratings through the Polymer Jacket of Low-loss As₂S₃ Fibers Using Femtosecond Pulses at 800 nm[J]. *Optics Letter*, 2012, 37(37):3900—3902.
- [11] Guo Q, Yu Y S, Zheng Z M, et al. Femtosecond Laser Inscribed Sapphire Fiber Bragg Grating for High Temperature and Strain Sensing[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2019, 18:208—211.
- [12] Liu J, Zhu L, He W, et al. Temperature-sensing Characteristics of Polarization-maintaining Fiber Bragg Grating Inscribed Directly by 800 nm Femtosecond Laser Pulses[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 56:102—186.
- [13] Ken O, Barnier F, Obara M. Fabrication of Fiber Bragg Grating by Femtosecond Laser Interferometry, *Lasers and Electro-optics Society (LEOS) [C]//The 14th Annual Meeting of the IEEE*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2002, 2:776—777.
- [14] 廖常锐,何俊,王义平.飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3):130—138.
- [15] 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*, 2006, 86(2):153—157.
- [16] 吕瑞东,陈涛,范春松,等.飞秒激光制备光纤 Bragg 光栅在光纤激光器中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11):320—336.
- [17] Kondo Y, Nouchi K, Mitsuyu T, et al. Fabrication of Long-period Fiber Gratings by Focused Irradiation of Infrared Femtosecond Laser Pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10):646—648.
- [18] Zhou K, Dubov M, Mou C, et al. Line-by-Line Fiber Bragg Grating Made by Femtosecond Laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16):1190—1192.
- [19] Theodosiou A, Aubrecht J, Peterka P, et al. Er₃₊/Yb₃₊ 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.
- [20] Williams R J, Kramer R G, Nolte S, et al. Femtosecond Direct-Writing of Low-Loss Fiber Bragg Gratings Using a Continuous Core-Scanning Technique[J]. *Optics*

- Letter, 2013, 38(11):1918—1920.
- [21] Wang Y P, Li Z L, Liu S, et al. Parallel-Integrated Fiber Bragg Gratings Inscribed by Femtosecond Laser Point-by-Point Technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10):2185—2193.
- [22] Huang B, Shu X. 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.
- [23] Zhu F, Wang Y P, Zhang Z, et al. Taper Embedded Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Fabricated by Femtosecond Laser Line-by-Line Inscription [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1):1—8.
- [24] Itoh K, Watanabe W, Nolte S, et al. Ultrafast Processes for Bulk Modification of Transparent Materials[J]. MRS Bulletin, 2006, 31(8):620—625.
- [25] Theodosiou A, Lacraz A, Polis M, et al. Modified Fs-Laser Inscribed FBG Array for Rapid Mode Shape Capture of Free-Free Vibrating Beams[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14):1509—1512.
- [26] Ioannou A, Theodosiou A, Caucheteur C, et al. Direct Writing of Plane-By-Plane Tilted Fiber Bragg Gratings Using a Femtosecond Laser[J]. Optics Letter, 2017, 42(24):5198—5201.
- [27] 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. Munich, Germany: The Optical Society of America, 2015: CM_4_3.
- [28] Becker M, Bergmann J, Brueckner S, et al. Fiber Bragg Grating Inscription Combining DUV Sulpicosecond Laser Pulses and Two-Beam Interferometry[J]. Optics Express, 2008, 16(23):19169—19178.
- [29] 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.
- [30] 江超, 王东宁. 飞秒激光脉冲刻写光纤布拉格光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008(6):59—66.
- [31] 刘全, 黄爽爽, 鲁金超, 等. 用于飞秒激光制备光纤光栅的相位掩模研制 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(4):844—850.
- [32] Zhang W, Tuerdahong N, Zhu L, et al. Temperature and Refractive Index Measurement Using an Optical Fiber Sensor Featuring PCF-FP and FBG Inscribed by Femtosecond Laser[J]. Optik, 2019, 194:163095.
- [33] Viveiros D, Amorim V A, Maia J M, et al. Femtosecond Laser Direct Written Off-Axis Fiber Bragg Gratings for Sensing Applications[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 128:106227.
- [34] Chen Q, Wang D N, Gao F. Simultaneous Refractive Index and Temperature Sensing based on a Fiber Surface Waveguide and Fiber Bragg Gratings[J]. Optics Letter, 2021, 46(6):1209—1212.
- [35] Zhu C, Alla D, Huang J. High-Temperature Stable Fbgs Fabricated by a Point-by-Point Femtosecond Laser Inscription for Multi-Parameter Sensing[J]. OSA Continuum, 2021, 4(2):355—363.
- [36] Grobnc 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.
- [37] Busch M, Ecke W, Latka I, et al. Inscription and Characterization of Bragg Gratings in Single-Crystal Sapphire Optical Fibres for High-Temperature Sensor Applications[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11):115301.
- [38] 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.
- [39] He J, Wang Y, Liao C, et al. Negative-Index Gratings Formed by Femtosecond Laser Overexposure and Thermal Regeneration[J]. Scientific Reports, 2016, 6:23379.
- [40] Laarossi I, Roldan-varona P, Quintela-incera M A, et al. Ultrahigh Temperature and Strain Hybrid Integrated Sensor System based on Raman and Femtosecond FBG Inscription in a Multimode Gold-Coated Fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(26):37122—37130.
- [41] Sun X, Zeng L, Du H, et al. Phase-Shifted Gratings Fabricated with Femtosecond Laser by Overlapped Two Types of Fiber Bragg Gratings [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 124(2020):105969.
- [42] Ecke W, Latka I, Willsch R, et al. Fibre Optic Sensor Network for Spacecraft Healthmonitoring[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7):974—980.
- [43] Jörg B, Wolfgang S, Nico E, et al. Femtosecond Laser-Inscribed Fiber Bragg Gratings for Strain Monitoring in Power Cables of Offshore Wind Turbines[J]. Applied Optics, 2011, 50(13):1868—1872.

- [13] Vincent_91. GPU 加速原理 & 技术介绍[EB/OL]. (2014-04-06) [2021-10-04]. <https://blog.csdn.net/weiveigfkd/article/details/23051255>.
- [14] 马秀丹,崔宾阁,钟勇,等. 一种基于 GPU 和内存映射文件的高分辨率遥感图像快速处理方法[J]. 海洋科学,2018,42(1):139—146.
-
- (上接第 38 页)
- [44] Liu N L, Liu S H, Lu P X. A Femtosecond-Laser-Induced Fiber Bragg Grating with Supermode Resonances for Sensing Applications[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(9):69—72.
- [45] Chen C, Zhang X Y, Yu Y S, et al. Femtosecond Laser-Inscribed High-Order Bragg Gratings in Large-Diameter Sapphire Fibers for High-Temperature and Strain Sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16):3302—3308.
- [46] Xiang H L, Jiang Y. Fiber Bragg Grating Inscription in Multi-Core Photonic Crystal Fiber by Femtosecond Laser [J]. Optik, 2018, 171:9—14.
- [47] Jewart C M, Wang Q Q, Canning J, et al. Ultrafast Femtosecond-Laser-Induced Fiber Bragg Gratings in Air-Hole Microstructured Fibers for High-Temperature Pressure Sensing[J]. Optics Letters, 2010, 35(9):1443—1445.
- [48] Huang J Y, Roosbroeck J V, Martinez A B, et al. Fiber Bragg Grating Sensors Written by Femtosecond Laser Pulses in Micro-Structured Fiber for Downhole Pressure Monitoring[C]//25th International Conference on Optical Fiber Sensors. Jeju, Korea (South); IEEE, 2017: 103233D.
- [49] Ko P L, Chuang K C, Ma C C. A Fiber Bragg Grating-based Thin-Film Sensor for Measuring Dynamic Water Pressure[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(18): 7383—7391.
- [50] Luo J, Liu S, Zhao Y, et al. Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Modulated by a Hollow Cavity for Measuring Gas Pressure[J]. Optics Letters, 2020, 45(2):507—510.
- [51] 王义平,唐剑,尹国路,等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. 振动. 测试与诊断,2015,35(5):809—819,987.
- [52] Zhang X L, Zhang Y, Tjin S C, et al. Refractive Index Sensing based on Higher-Order Mode Reflection of a Microfiber Bragg Grating[J]. Optics Express, 2010, 18(25):26345—26350.
- [53] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond Laser Fabricated Fiber Bragg Grating in Microfiber for Refractive Index Sensing [J]. Optics Letters, 2010, 35(7):1007—1009.
- [54] Warren-smith S C, Monro T M. Exposed Core Microstructured Optical Fiber Bragg Gratings: Refractive Index Sensing[J]. Optics Express, 2014, 22(2):1480—1489.
- [55] 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.
- [56] Zhang X Y, Sun H B, Chen C, et al. High-Order-Tilted Fiber Bragg Gratings with Superposed Refractive Index Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1):1—8.
- [57] He W, Zhu L. A Femtosecond Laser Inscribed Fiber Bragg Grating as a Refractive Index and Temperature Sensor based on Side-Polished Method [J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(27):2050296.
- [58] Zhao N, Lin Q, Yao K, et al. Simultaneous Measurement of Temperature and Refractive Index Using High Temperature Resistant Pure Quartz Grating based on Femtosecond Laser and HF Etching[J]. Materials (Basel), 2021, 14(4):1028.