

# 光纤光栅制作方法及传感应用<sup>\*</sup>

王义平, 唐 剑, 尹国路, 钟晓勇, 廖常锐

(深圳大学光电子器件与系统教育部重点实验室 深圳, 518060)

**摘要** 详细阐述了光纤光栅常用的几种制备方法, 包括紫外激光曝光法、CO<sub>2</sub> 激光照射法、电弧放电法和飞秒激光法等, 并分析比较了各种方法的适用性和局限性。系统综述了光纤光栅在传感领域的应用, 讨论了光纤光栅温度、应力、弯曲、压力、扭曲以及生化等几种典型的传感器。最后, 对光纤光栅传感技术的发展进行了总结和展望。

**关键词** 光纤传感; 光纤光栅; 制作方法; 传感器

**中图分类号** TN253; TH741.6

## 引 言

光纤传感以其灵敏度高、成本低、体积小、能埋入工程结构和操作简便等特点使其在传感领域越来越倍受关注, 使得智能结构成为可能, 极大地改变了人们的生活方式。随着光纤与光纤器件制备方法和技术的不断发展和完善, 光纤光栅已成为最具代表性、最有发展前途和发展最为迅猛的光纤无源器件之一。光纤光栅出现至今, 随着研究的深入和应用需求的不断扩大, 用途各异的光纤光栅层出不穷且各具特性。根据光纤光栅的周期大小, 主要分为短周期光纤光栅和长周期光纤光栅两种。短周期光纤光栅也叫光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, 简称 FBG), 其周期通常小于 1  $\mu\text{m}$ , 能实现反向模式间耦合的光纤光栅, 属反射型光纤光栅, 由 Hill 等<sup>[1]</sup> 在 1978 年首次利用驻波法在掺锗光纤中研制成功。长周期光纤光栅 (long-period fiber grating, 简称 LPFG) 的周期为几十到几百微米, 由 Vengsarkar 等<sup>[2]</sup> 于 1996 年用紫外光通过振幅掩模板照射氢载硅锗光纤的方法研制而成, 可实现基模耦合到同向传输的各包层模, 属透射型光纤光栅。此外, 光纤光栅还可以根据光栅的波导结构、形成机理和光纤材料类型等不同进行分类。

光纤光栅传感是利用在光纤中制备的光栅作为传感头, 当外部应力、压力、温度和浓度等环境发生改变时, 引起光纤有效折射率和光栅周期等参数发生变化, 从而导致通过光栅区域的光波受到的调制

情况发生改变来实现传感。通过测量光纤光栅谐振波长或谱形边沿的响应变化量可实现对外部环境的参量监测, 而且光纤光栅的传感信息通常是以波长编码的, 使其克服了强度调制传感器必须补偿光纤连接器和耦合器损耗以及光源输出功率起伏的不足。光纤光栅传感器与传统的电子或机械传感器相比具有抗电磁干扰、高灵敏度、高可靠性、低成本、紧凑性、耐腐蚀和可埋入智能结构等优点。这使其在强磁场、辐射性、腐蚀性或危险性大的环境监测方面有良好的适用性, 已经在桥梁、大坝、建筑物、飞行器、舰船、火车、矿井、油田及油罐等方面的实时健康监测中得到了广泛应用。

## 1 光纤光栅的制备方法

国内外学者对光纤光栅的制备方法进行了广泛研究, 形成了多种多样的制备方法。它们各有优势, 且通过不同制备方法得到的光纤光栅的光学特性也不同。FBG 和 LPFG 的光传输原理如图 1 所示。以下对常见的光纤光栅制备方法进行简单描述。

### 1.1 紫外曝光制备法

紫外激光曝光是出现较早也是最常见的光纤光栅制备方法, 主要是利用紫外激光经过振幅掩模板曝光载氢掺锗光纤, 引起纤芯折射率周期性调制形成光纤光栅, 制作原理如图 2 所示。该方法技术比较成熟, 而且具备批量生产条件, 但要求光纤具有掺杂稀土元素 (锗、磷等) 的光敏纤芯, 且常常需要载

\* 国家杰出青年科学基金资助项目 (61425007)  
收稿日期: 2015-06-01; 修回日期: 2015-06-30

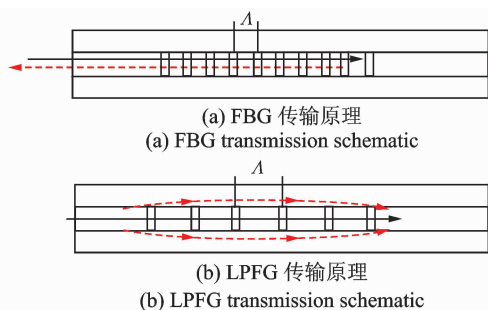


图1 光纤光栅传输原理图

Fig. 1 The optic transmission schematic of fiber grating

氢来增强光纤的光敏性,但载氢对光栅热稳定性有较大影响。由于相位掩模板的周期是固定的,使得这种制备法不够灵活多变。1989年,Meltz等<sup>[3]</sup>首次用两束相干紫外光形成的干涉条纹对载氢光纤进行侧面曝光制备FBG,并且通过改变激光波长或两束相干光之间的夹角可以在任何感兴趣的可用波段制备FBG。1993年,Hill等<sup>[4]</sup>在Meltz的研究基础上利用紫外光垂直照射相位掩模板在载氢光纤制备FBG,有力地推动光纤光栅真正走向实用化和产业化。尽管紫外曝光法最先应用于FBG的制备,但该方法对LPFG同样适用<sup>[2,5-7]</sup>。研究者们对该方法进行了各种改进优化,主要是采用不同的掩模板(如微透镜阵列法、介质膜幅度掩模板或莫尔条纹振幅法)或选用不同的激光器(如193 nm ArF准分子激光器、244 nm Ar离子激光器或264 nm紫外飞秒激光器等)。

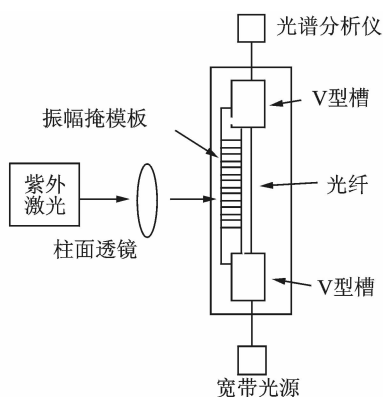


图2 紫外激光制备光纤光栅实验装置

Fig. 2 Experiment setup for fabricating fiber grating using UV laser

## 1.2 CO<sub>2</sub> 激光制备法

CO<sub>2</sub> 激光照射法制备光纤光栅是近年来实验室比较常用的方法,主要是通过CO<sub>2</sub> 激光脉冲周期性加热光纤造成残余应力释放或者物理变形引起折

射率调制从而形成光纤光栅。该方法可直接在任意类型光纤上制备光栅,不需要光纤具有光敏性或其他载氢增敏处理,制备效率高、成本低,制备的光栅热稳定性好,可通过软件控制灵活改变光栅的周期大小以及周期数目等。由于目前CO<sub>2</sub> 激光聚焦的最小焦斑直径大小在30 μm左右,远大于FBG的周期,该法不适用于FBG的制备。1998年,Davis等<sup>[8]</sup>首次用聚焦的CO<sub>2</sub> 激光沿光纤轴向逐点加热制备LPFG,使LPFG的制作进入一个新的阶段。2002年,Kakarantaas等<sup>[9]</sup>利用该方法首次在纯硅光子晶体光纤中制备LPFG。2003年,饶云江等<sup>[10]</sup>提出由计算机精确控制的高频CO<sub>2</sub> 激光脉冲二维扫描制备LPFG的方法。2004年,Oh等<sup>[11]</sup>报道了利用高频CO<sub>2</sub> 激光连续曝光同时旋转和移动光纤的方法形成螺旋结构的LPFG。2008年,王义平等<sup>[12]</sup>首次利用高频CO<sub>2</sub> 激光脉冲二维扫描法周期性塌陷空气芯光子带隙光纤包层空气孔成功制备LPFG,打破了长期以来阻碍光子带隙光纤光栅发展的瓶颈。2009年,Xuan等<sup>[13]</sup>用CO<sub>2</sub> 激光在微纳光纤上制得LPFG。2014年,钟晓勇等<sup>[14]</sup>利用改进的CO<sub>2</sub> 激光扫描法结合气压辅助方式,首次在光子晶体光纤中制备一种膨胀式的LPFG,其制备原理和光路如图3所示。到目前为止,国内外学者对CO<sub>2</sub> 激光照射法做了广泛研究,提出了各种改进CO<sub>2</sub> 激光制备光纤光栅的方法,包括单侧周期性刻槽<sup>[15-17]</sup>、对称聚焦刻写<sup>[18-19]</sup>和周期性拉锥<sup>[20]</sup>等。

## 1.3 电弧放电制备法

电弧放电法是通过电极周期性放电使光纤熔融变形,使光纤折射率受到周期性调制从而形成光纤光栅。该方法制备机理与CO<sub>2</sub> 激光类似,制作简单、可控性好,可随意改变光栅周期数,制备光栅温度稳定性好,而且可自由调节电流的大小和放电时间来控制折射率调制大小。这种方法的不足主要是电弧放电区域较大,限制了其制备周期宽度大小,不适合于FBG制备;同时电极容易氧化影响放电强度稳定性,且制备过程不能重复放电,灵活性不如CO<sub>2</sub> 激光。1998年,Kosinski等<sup>[21]</sup>首次提出用电弧放电的方法来制备LPFG。1999年,Hwang等<sup>[22]</sup>利用电弧放电法使光纤发生周期微弯而形成LPFG。2011年,Smietana等<sup>[23]</sup>利用自行改进的计算机控制的电弧放电技术将LPFG的制备周期从之前的345 μm减小到221 μm,是目前为止电弧放电所能制备的最短的LPFG。同年,Iadicco等<sup>[24]</sup>利用气压辅助式的电弧放电技术在空气芯光

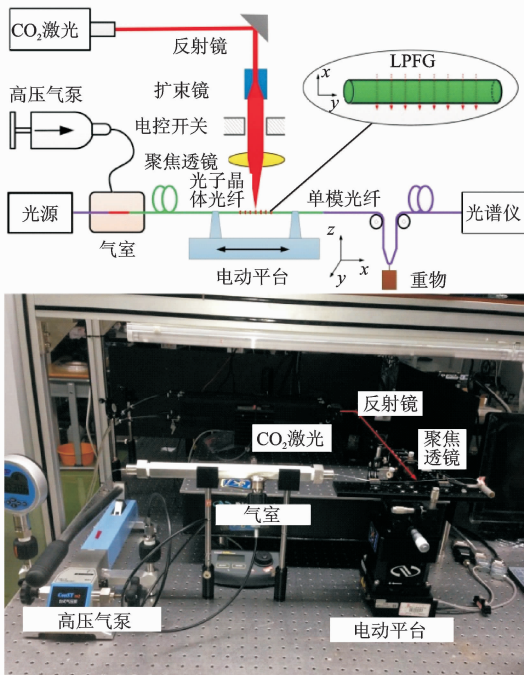


图 3 气压辅助式 CO<sub>2</sub> 制备膨胀式 LPFG

Fig. 3 Experimental setup of inflated LPFG inscription with a pressure-assisted CO<sub>2</sub> laser beam scanning technique

子带隙光纤中成功制备无塌陷的 LPFG。2014 年, Yin 等<sup>[25]</sup>用 100P+ 熔接机通过二次程序开发改进电弧放电, 利用计算机程序控制的周期性放电拉锥光纤形成 LPFG, 其实验原理和制作装置如图 4 所示。

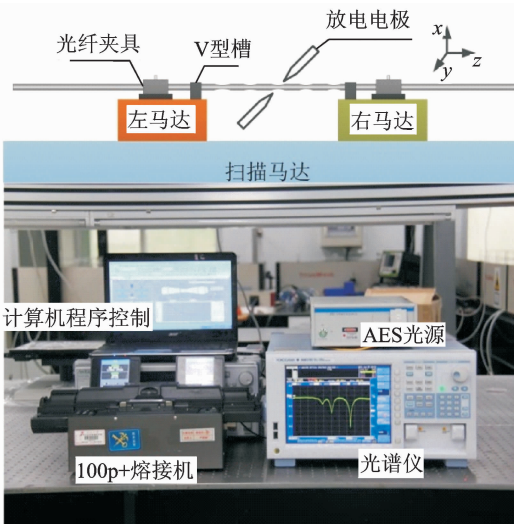


图 4 改进的电弧放电法制备光纤光栅

Fig. 4 Experimental setup for inscribing a LPFG with improved electric discharge method

### 1.4 飞秒激光制备法

飞秒激光刻写光纤光栅主要有 3 种方法: 相位掩模板法、逐点法和扫线法。该方法利用近红外或

紫外飞秒激光直接诱导折射率改变从而制备光纤光栅, 光纤无需具有光敏性和增敏处理, 且同时适用 FBG 和 LPFG 的制备。该法聚焦光斑尺寸小, 加工精度高, 属于“冷”加工特性, 避免热融化发生, 保证了光栅的机械强度, 制作的光栅热稳定性好且不易老化。典型的飞秒激光加工平台如图 5 所示。

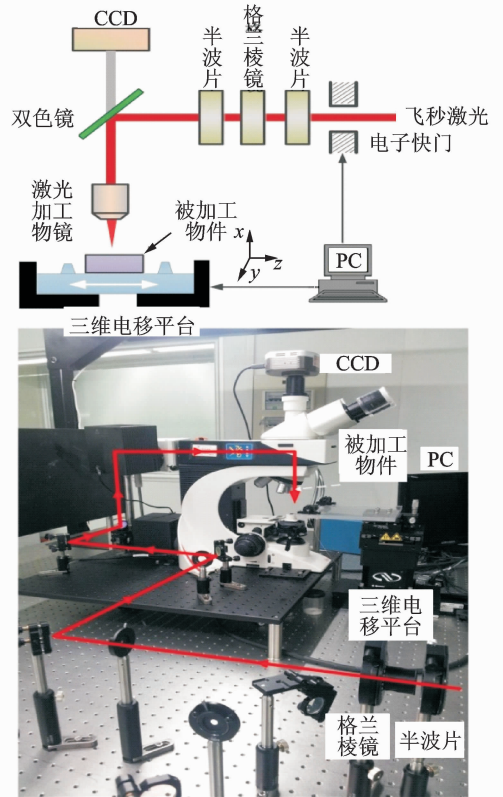


图 5 飞秒激光制备光纤光栅

Fig. 5 Experiment setup for fabricating fiber grating with femtosecond laser

通过控制位移平台移动速度与激光脉冲重复率之比就能设定光栅周期, 刻写快速, 操作灵活, 但需要复杂的聚焦光学系统以及精确机械位移平台, 而且外界振动对制备光栅的影响较大。1999 年, Kondo 等<sup>[26]</sup>首次用波长 800 nm 的红外飞秒激光逐点曝光在单模光纤上成功制备了 LPFG。2003 年, Dragomir 等<sup>[27]</sup>利用 264 nm 紫外飞秒激光照射的相位掩模板制备 FBG。2004 年, Hindle 等<sup>[28]</sup>首次用红外飞秒激光在纯硅纤芯的光纤栅制备 LPFG。2010 年, Zhou 等<sup>[29]</sup>利用波长 800 nm 的红外飞秒激光采用线扫描的方法制备出四阶 FBG。2013 年, Williams 等<sup>[30]</sup>利用直接在纤芯连续扫描技术制备低损耗的 FBG。近年来, 飞秒激光制备法以其独特的优势受到广大学者的青睐并开展了相应的研究工作。

## 1.5 腐蚀刻槽制备法

腐蚀刻槽法是利用化学腐蚀的方法在光纤包层腐蚀出周期性的环槽结构从而制备光纤光栅。该方法无需激光曝光,无需光纤具有光敏性,制作成本低,简单易行,可直接用氢氟酸周期性改变光纤的波导结构,形成光栅稳定性好,但机械强度较弱。此外由于刻槽部分主要发生在包层上,纤芯基模和包层模之间的耦合一般较弱,而由于刻槽部分和未刻槽部分的直径不同,若在两端施加一定应力将引起折射率调制从而形成强耦合的光纤光栅。1999年, Lin 等<sup>[31]</sup>首次报道了用腐蚀刻槽法在光纤上制备 LPFG。随后 Lin 和 Jian 等<sup>[32-33]</sup>对 LPFG 的应力、弯曲和扭曲等传感特性进行了较深入的研究。2011年, Yang 等<sup>[34]</sup>先利用飞秒激光诱导折射率变化,然后采用腐蚀微孔阵列的方法制作出 FBG。2013年, Guo 等<sup>[35]</sup>利用飞秒激光烧蚀单模光纤表面,通过腐蚀微流通道的方法制备出 LPFG。

## 1.6 机械微弯制备法

机械微弯法是通过带刻槽的面板施加机械压力使光纤发生周期性的微弯变形,由于弹光效应使光纤轴向产生周期性的折射率调制从而制备光纤光栅。该法主要通过改变光纤与凹槽之间的夹角便可调节光栅周期,通过改变施加压力的大小可实现损耗峰幅值的调节,制备的光栅温度稳定性好,机械强度高。由于一块刻槽板的光栅周期调节范围有限,且很难精确控制施加的机械压力,所以光栅谐振峰强度不好调节,另外制备的光栅不能长久保留,多次施压会损坏光纤结构。2000年, Savin 等<sup>[36]</sup>首次用机械微弯法在单模光纤上成功制备 LPFG。2002年, Ham 等<sup>[37-38]</sup>分别提出了对于机械微弯法制备的 LPFG 的双折射补偿方法。2004年, Lim 等<sup>[39]</sup>利用机械压力法在光子晶体光纤上制备了 LPFG。2007年, Noordegraaf 等<sup>[40]</sup>利用机械压力法在液晶填充的光子晶体光纤中制备了 LPFG,并对其电光特性进行了研究。由于机械压力法简单易行,制作方便,不需光纤具有光敏性,适用光纤类型多,利用其制备光纤光栅的工作也颇多。

## 1.7 离子束制备法

离子束注入法是用聚焦的离子束沿轴向周期性入射到光纤表面并注入到纤芯和包层中,引起折射率周期性改变从而形成光纤光栅。其折射率变化机理主要是注入的离子( $\text{He}^{2+}$  或  $\text{H}^+$ )与玻璃中的原

子核相互作用引起玻璃结构致密化,从而导致折射率改变。该方法在室温下可使硅玻璃的折射率变化高达 1%,因而可在任意常用光纤中制备光纤光栅,而且可以通过调节入射粒子束的剂量改变光纤折射率调制大小,制备的光栅高温稳定性较好,适应在高温环境下工作。2000年, Fujimaki 等<sup>[41]</sup>首次用氦( $\text{He}^{2+}$ )离子通过掩模板注入到光纤中成功制备 LPFG。2001年, VonBibra 等<sup>[42]</sup>提出用聚焦氢离子( $\text{H}^+$ )逐点入射光纤的方法制备 LPFG。2003年, Grant 等<sup>[43]</sup>利用 2.4 MeV 氢离子( $\text{H}^+$ )在多模光纤中通过纤芯调制制备 LPFG。

## 2 光纤光栅传感器研究

自从 1989 年 Morey<sup>[44]</sup>首次报道将光纤光栅用于传感领域以来,经过 20 多年的发展,光纤光栅在光纤传感领域的作用日益突出,各类传感器不断涌现。根据实际应用环境不同,光纤光栅传感器大致可分为以下几种。

### 2.1 温度传感器

温度传感是光纤光栅传感器最主要和最直接的应用之一,通过研究温度与光纤光栅谐振波长漂移量的关系来实现温度传感。尽管 FBG 和 LPFG 的光波传输理论模型不同,但其温度传感机理主要是热胀冷缩效应引起光纤光栅的周期和光纤内部的有效折射率发生变化,从而导致光纤光栅的中心波长的变化。对于普通的硅光纤,FBG 的温度灵敏度在 800 nm 和 1.55  $\mu\text{m}$  两个波长处的典型温度值分为 6.8 和 13  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ <sup>[45]</sup>。普通单模光纤刻写的长周期光纤光栅的温度灵敏度的范围在 30~100  $\text{pm}/^\circ\text{C}$  之间,比 FBG 的温度灵敏度高 1 个数量级。迄今为止许多方法已用以进一步提高 LPFG 的温度灵敏度,包括利用纤芯掺杂光纤,不同几何结构的光纤和在包层涂覆特殊的热敏材料等。1999年, Abramov 等<sup>[46]</sup>在特殊设计的聚合物微光纤中实现了温度可达 800  $\text{pm}/^\circ\text{C}$  的 LPFG。2001年, Shu 等<sup>[47]</sup>通过在纤芯掺有 B-Ge 的光敏光纤上制备的 LPFG 的温度灵敏度可达到 2.75  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。2002年, Khaliq 等<sup>[48]</sup>用在 LPFG 周围涂覆高热光系数的材料的方法,将其温度灵敏度提升到 19  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,是目前知道的最高灵敏度的 LPFG 温度传感器。2006年, Wang 等<sup>[15]</sup>利用周期性刻槽的 LPFG 构成了一个强度调制的温度传感系统,如图 6 所示,其测试精度可达到 0.1  $^\circ\text{C}$ 。此外,温度传感器在实际温度测量中还需



考虑到光纤光栅的高温稳定性。近年来,科研工作者对不同光纤类型和不同制备技术的光纤光栅的温度特性开展了大量系统性研究工作。

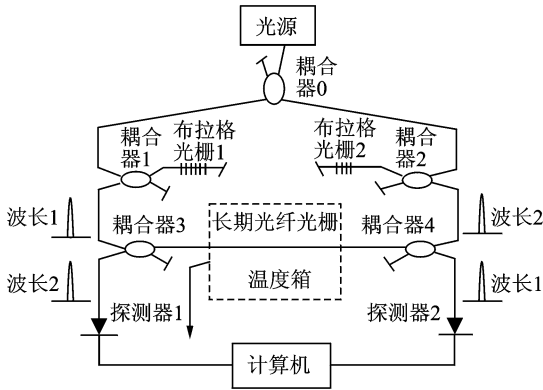


图 6 由 CO<sub>2</sub> 刻槽型 LPFG 构成的基于强度调制的温度传感系统原理图

Fig. 6 Schematic of the CO<sub>2</sub> laser-grooved LPFG temperature sensor system based on the intensity modulation

### 2.2 应力传感器

由弹性力学基本理论和二氧化硅材料的弹光效应可知,当在光纤两端施加轴向应力时,弹光效应将引起纤芯基模和包层模有效折射发生改变,导致光栅谐振峰漂移,谐振峰波长会随应变增加线性变化,应变灵敏度与光纤类型、光栅结构、光栅周期及模式阶次有关。普通单模 FBG 在 800 nm 和 1.55 μm 两个波长处典型的应力灵敏度为 0.64, 1.15 pm/με<sup>[45]</sup>。紫外光或 CO<sub>2</sub> 激光制备的无物理变形的 LPFG,轴向应变灵敏度较低仅为 -0.727 nm/mε<sup>[49]</sup> 和 -0.428 nm/mε<sup>[10]</sup>。2006 年,Wang 等<sup>[15]</sup>在普通单模光纤上单侧用 CO<sub>2</sub> 激光周期性刻槽的 LPFG,轴向应变时会引起光栅微弯而产生较大折射率调制,使应变灵敏度提高到 -102.89 nm/mε<sup>[15]</sup>,与无物理结构变形的 CO<sub>2</sub> 激光制备的 LPFG 的相比,提高了两个数量级,其结构如图 7 所示。在实际工程测量中,往往需要解决光纤光栅的应变和温度的交叉敏感问题。1996 年,Patrick 等<sup>[50]</sup>用组合 LPFG 和 FBG 的方法解决了温度和应变间的交叉敏感问题,实现了对温度和应变的同时测量。2006 年,Wang 等<sup>[16]</sup>用 CO<sub>2</sub> 激光扫描实芯光子晶体光纤使其空气孔周期性塌陷制备低温度灵敏度的 LPFG,在单个 LPFG 上成功解决了温度与应变的交叉敏感问题。2009 年,Zhu 等<sup>[51]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 激光在单模光纤上旋转刻槽形成 LPFG,使光栅谐振峰分裂成两个峰,实现了温度不灵敏的高灵敏度应力传感器。

2010 年,廖常锐等<sup>[52]</sup>利用飞秒激光在全实芯的光子带隙光纤中制备的 LPFG 其应力灵敏度为 -1.8 nm/mε,比普通 LPFG 的应力灵敏度高 4 倍,同时具有更低的温度灵敏度<sup>[52]</sup>。为克服光纤光栅传感器存在应变和温度交叉敏感问题,国内外学者在此方面做了许多研究工作。

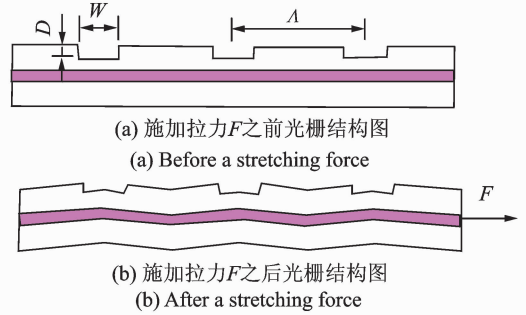


图 7 CO<sub>2</sub> 激光制备的刻槽型 LPFG

Fig. 7 Schematic diagram of the CO<sub>2</sub>-laser-carved LPFG

### 2.3 弯曲传感器

1994 年,Xu 等<sup>[53]</sup>利用在悬臂梁两边分别固定一个 FBG 构成了弯曲传感器。2000 年,Gander 等<sup>[54]</sup>首次在利用多芯光纤中制备的 FBG 构成了弯曲传感器,灵敏度为 48.9 pm/m<sup>-1</sup>。2002 年,Baek 等<sup>[55]</sup>实验研究了倾斜 FBG 作为弯曲传感器的特性。相对于 FBG 而言,LPFG 对弯曲则更为敏感,更适合于做弯曲传感器。当弯曲 LPFG 时,不仅使光纤变成弯曲波导引起双折射,而且将使 LPFG 折射率调制区域发生倾斜引起模式变化,在光谱上表现为 3 种变化:谐振波长漂移,谐振峰强度变化以及谐振峰分裂。弯曲使光纤内侧挤压导致折射率减小,外侧拉伸导致折射率增大,由于两侧折射率变化的非对称性使高阶包层模发生变化,导致纤芯基模与包层模的耦合模场失叠,光栅的谐振峰会相应地展宽或分裂。因此 LPFG 具有极高的弯曲灵敏度,即使微弯也会使其透射谱发生明显的变化。1998 年,Patrick 等<sup>[56]</sup>首先提出紫外制备的 LPFG 可用于结构弯曲曲率的测量,随后他们在纤芯偏移的特殊光纤上实现了既能测量弯曲量又能判别弯曲方向的弯曲传感器。2000 年,VanWiggeren 等<sup>[57]</sup>发现 CO<sub>2</sub> 激光制备的 LPFG 弯曲灵敏度具有较强方向相关性。同年,Ye 等<sup>[58]</sup>在掺硼光纤上制备 LPFG 实现了温度与弯曲的同时测量。2004 年,Chen 等<sup>[59]</sup>基于 LPFG 的弯曲特性制作出对应变和温度均不敏感的弯曲传感器。2005 年,Wang 等<sup>[60]</sup>利用高频 CO<sub>2</sub> 激光制备的非对称型 LPFG 实现了能判

别任意弯曲方向或对弯曲不敏感的的传感器,如图8所示。该弯曲系统由一个UV制备的LPFG和两个CO<sub>2</sub>激光制备的LPFGs构成。2010年,Shao等<sup>[61]</sup>利用LPFG和倾斜的FBG构成了混合结构的高灵敏度弯曲传感器。2012年,Geng等<sup>[62]</sup>利用空间上相互正交级联的两个LPFG构成了二维矢量弯曲传感器。关于光纤光栅的弯曲传感特性,国内外学者已开展了诸多研究。

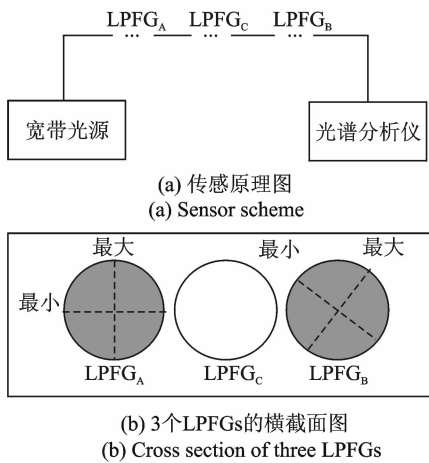


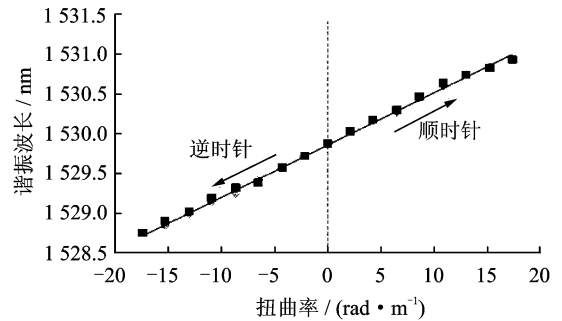
图8 同时测量弯曲和方向的LPFGs传感器

Fig.8 Schematic diagram of LPFGs sensor that cannot only measure curvature but also determine bending direction

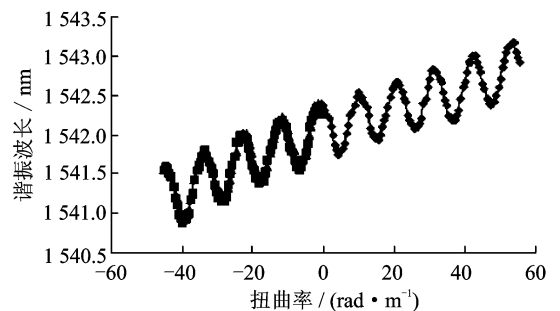
## 2.4 扭曲传感器

2001年,Tian等<sup>[63]</sup>通过FBG的应力传感与扭曲之间的转化,间接地进行扭曲形变量的监测。2002年,Zhang等<sup>[64]</sup>首次通过利用组合扭力梁的方式解决了FBG温度和扭曲的交叉敏感问题。2004年,Lo等<sup>[65]</sup>提出了一种高双折射光纤(Hi-Bi fiber)作传感探头,白光作光源测量扭矩的FBG传感系统。当LPFG被扭曲时,扭曲引起的圆双折射与光纤内在线双折射结合,导致沿光纤轴向传输的两个偏振模发生变化,模式耦合系数也随着变化,因此光栅谐振波长会随扭曲变化而漂移。2001年,Lin等<sup>[66]</sup>提出用腐蚀刻槽法制备的LPFG直接测量扭曲率的方法。2004年,Wang等<sup>[67]</sup>发现高频CO<sub>2</sub>激光脉冲单侧制备LPFG的扭曲特性具有方向相关性,因此可实现既能测量扭曲量又能够判断扭曲方向的扭曲传感器。2006年,Rao等<sup>[68]</sup>用CO<sub>2</sub>激光制备的超LPFG的高阶谐振波长获得了高灵敏度的扭曲传感器,并用基于光栅边缘滤波效应的强度解调法实现了扭曲率的实时测量。2011年,Shi等<sup>[69]</sup>在光纤环形激光器中制备一对旋转LPFG形

成Mach-Zehnder干涉仪,实现了高分辨率的扭曲传感器。随后Li等<sup>[70]</sup>利用相移超LPFG制作出对应变和温度均不敏感的扭曲传感器。目前已经研究出各式各样的基于光纤光栅的扭曲传感器。



(a) CO<sub>2</sub>激光制备的LPFG顺时针和逆时针扭曲时谐振波长漂移  
(a) Resonant wavelength change while a CO<sub>2</sub>-laser-induced LPFG is twisted clockwise or anticlockwise



(b) 当扭曲的光纤长度远大于CO<sub>2</sub>激光制备的LPFG长度时谐振波长的扭曲响应  
(b) The response of resonant wavelength to the torsion providing the twisted fiber including a CO<sub>2</sub>-laser-induced LPFG is much longer than the grating.

图9 扭曲传感器谐振波长响应

Fig.9 Resonant wavelength of twisted sensor

## 2.5 压力传感器

当光纤光栅受到横向负载(压力)作用时,不仅光纤几何尺寸发生变化,而且由于弹光效应引起的双折射可能使光纤的原始光轴发生旋转,对应的偏振模式的传播常数发生变化,因此光纤光栅的谐振波长和损耗峰幅值会随着压力增加而线性漂移。1993年,Xu等<sup>[71]</sup>首次对直接制备的FBG的压力灵敏度进行研究,发现在70 MPa压力作用下光纤光栅的波长移动了0.22 nm,灵敏度仅为-3.04 pm/MPa。该特性也证明了普通FBG几乎无法直接应用于实际压力测量,需要通过光纤光栅压力传感器的增敏技术对其进行压力增敏。1999年,Liu等<sup>[72]</sup>发现紫外光制备的LPFG的横向负载灵敏度远高于光纤布拉格光栅,且谐振峰随负载线性变化,因此可作为压力传感器。由于紫外光制备的LPFG具有对称的横向负载特性,所以不能辨别施加的压力方向。2003年,Rao等<sup>[73]</sup>发现CO<sub>2</sub>激光制备的

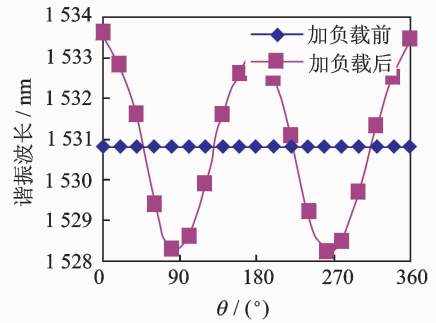
LPFG 由于光纤横截面折射率分布不均匀具有明显的方向相关性,谐振波长在在特定方向上对负载不敏感而损耗峰幅值则线性变化,因此通过谐振波长和损耗峰幅值两个参量分别实现了温度和压力的同时独立测量,从而解决了温度和压力的交叉敏感问题。2007 年,Wang 等<sup>[74]</sup>用 CO<sub>2</sub> 激光制备的 LPFG 实现了既能测量压力大小又能判别压力方向的压力传感器,在横向负载压力情况下其谐振波长大小和方向变化如图 10 所示。2012 年,Zhang 等<sup>[75]</sup>利用机械压力方法在实心的光子晶体光纤中制备的倾斜长周期光纤光栅实现了 2.701 nm/MPa 的高灵敏度气压传感。

### 2.6 生化传感器

当外界环境折射率发生变化时,光纤光栅的纤芯或包层的模式有效折射率会随着变化并引起耦合模相位匹配条件的变化,进而导致光栅谐振波长漂移和损耗峰幅值变化。这一特性使得光纤光栅可作为测量折射率、浓度、湿度等参量的生物化学传感器。FBG 应用于实现折射率传感较早,主要是通过腐蚀包层和侧边抛磨方案进一步增大纤芯模式对外界的敏感性。最近也出现了通过在微纳光纤上制备的 FBG 来实现折射率传感<sup>[76]</sup>。LPFG 应用于折射率传感相对较晚。1997 年,Bhatia 等<sup>[77]</sup>提出 LPFG 作为折射率和应力传感器。1998 年,Patrick 等<sup>[78]</sup>对 LPFG 对外界折射率变化的响应特性作了详细的分析,并提出其可作为化学浓度传感器。2002 年,Su 等<sup>[79]</sup>用耦合模理论系统分析了 LPFG 折射率特性,并指出高阶模式具有更高的响应灵敏度。2004 年,Chong 等<sup>[80]</sup>用 LPFG 实现了甘醇、盐、糖溶液的浓度测量。2006 年,Rindorf 等<sup>[81]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 激光在光子晶体光纤上制备 LPFG,并用其来检测生物分子层的厚度,如图 11 所示。2007 年,Rao 等<sup>[82]</sup>对用 CO<sub>2</sub> 激光制备的超长 LPFG 和边缘 LPFG 进行了折射率实验。对于普通 LPFG 只有在外界折射率接近光纤包层折射率时才有较高响应灵敏度。为了提高基于 LPFG 的折射率计的灵敏度,人们提出了各种各样的方法,如在光栅表面涂覆敏感材料,减小光纤包层半径<sup>[83-84]</sup>等。

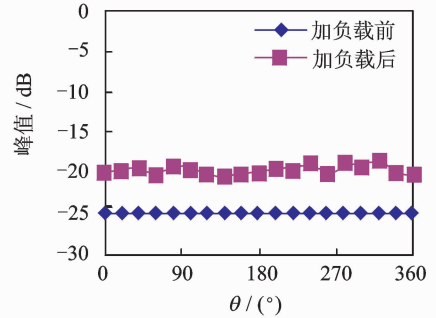
### 2.7 光纤加速度计

加速度传感器是振动测量、惯性导航中常用的重要传感器,已广泛应用在机械、车辆、桥梁以及航空航天、军事等方面。其中,基于 FBG 的加速度传感器因具有光路更简单、波长调制不受光源强度波



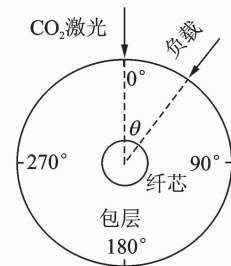
(a) LPFG 谐振波长在加负载前后的变化

(a) Resonant wavelength variation before and after a constant transverse load is applied along different fiber orientations



(b) LPFG 谐振波长处峰值在加负载前后的变化

(b) Peak transmission attenuation variation before and after a constant transverse load is applied along different fiber orientations



(c) 施加横向负载压力的角度值 $\theta$ , 这里 CO<sub>2</sub> 激光制备 LPFG 时的入射方向定义为 0° 方向  
(c) The orientations of transverse load is applied, where the direction of CO<sub>2</sub> laser irradiation is defined as the 0° orientation at the circle of the LPFG

图 10 CO<sub>2</sub> 激光制备的 LPFG 的横向负载特性

Fig. 10 The transverse-load characteristics of CO<sub>2</sub>-laser-induced LPFG

动影响、便于分布式测量等优势引起了广大科研工作者的极大兴趣。相比较而言,基于 LPFG 的加速度传感器的研究相对较少。2011 年,史翠华等<sup>[85]</sup>基于高频 CO<sub>2</sub> 激光在普通单模光纤上制作的 LPFG 的应变和弯曲特性,设计制作了一种新型的加速度传感器。基于等强度梁理论分析了梁振动与 LPFG 输出光强之间的关系,推导出了系统的加速度理论模型。搭建了该加速度计的实验系统,进行了特性测试。实验结果表明,该系统的加速度灵敏度约为 2.82 V/g, 准确度约为  $8.96 \times 10^{-4} g$ , 理论和实验误差约 0.82%。2012 年,Zheng 等<sup>[86]</sup>提出一种基

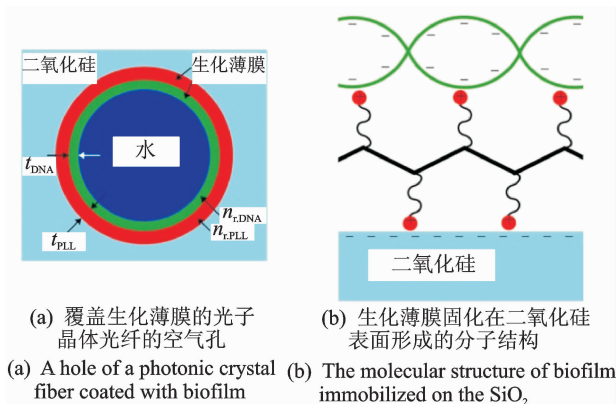


图 11 CO<sub>2</sub> 激光在光子晶体光纤中制备的 LPFG 用于生化传感

Fig. 11 Schematic diagram of biochemical sensing with a CO<sub>2</sub>-laser-induced LPFG in a PCF

于光子晶体光纤的长期光纤光栅构成的 Mach-Zehnder 干涉仪作为传感头实现了温度不敏感的全光纤加速度计。将干涉峰的漂移通过光电探测器转换成模拟电压信号来实现对振动和位移的加速度的监测,灵敏度可达 0.08 nm/g,可与普通单模 FBG 加速度计相比拟。

### 3 结束语

光纤光栅出现至今,已经在各行各业发挥了巨大的作用。我国对光纤光栅传感技术的研究相对较晚,研究和应用方面与国外仍存在一定差距,多处于实验室研究阶段,在实用化方面仍相对滞后。近年来,各大高校和科研院所都加大了对光纤光栅传感技术的研究工作,取得了很大的进展。随着国产技术的进步,有关光纤光栅的制作方法和各类传感器的研制在不断改进和完善,光纤光栅传感技术在国内的实用化领域将会越来越广泛。

#### 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] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1):58-65.

[3] 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.

[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] Guan Baiou, Tam H Y, Chan L W H, et al. Growth characteristics of long-period gratings in hydrogen-loaded fibre during and after 193 nm UV inscription [J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(7):818-823.

[6] Wong R Y N, Chehura E, Staines S E, et al. Fabrication of fiber optic long period gratings operating at the phase matching turning point using an ultraviolet laser [J]. Applied Optics, 2014, 53(21):4669-4674.

[7] Kowal D, Barabach G S, Mergo P, et al. Microstructured polymer optical fiber for long period gratings fabrication using an ultraviolet laser beam[J]. Optics Letters, 2014, 39(8):2242-2245.

[8] Davis D D, Gaylord T K, Glytys E N, et al. Long-period fibre grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. Electronics Letters, 1998, 34(3):302-303.

[9] Kakarantzas G, Birks T A, Russell P S. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2002, 27(12):1013-1015.

[10] Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zenglin, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5):1320-1327.

[11] Oh S T, Lee K R, Paek U C, et al. Fabrication of helical long-period fiber gratings by use of a CO<sub>2</sub> laser [J]. Optics Letters, 2004, 29(13):1464-1466.

[12] Wang Yiping, Jin Wei, Ju Jian, et al. Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers[J]. Optics Express, 2008, 16(4):2784-2790.

[13] Xuan Haifeng, Jin Wei, Zhang Min. CO<sub>2</sub> laser induced long period gratings in optical microfibers[J]. Optics Express, 2009, 17(24):21882-21890.

[14] Zhong Xiaoyong, Wang Yiping, Qu Junle, et al. High-sensitivity strain sensor based on inflated long period fiber grating [J]. Optics Letters, 2014, 39(18):5463-5466.

[15] Wang Yiping, Wang Dongning, Jin Wei, et al. Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO<sub>2</sub> laser to carve periodic grooves on the optical fiber [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(15):15110501-03.

[16] Wang Yiping, Xiao Liming, Wang Dongning, et al. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor



- with low temperature sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(23):3414-3416.
- [17] Wang Yiping, Wang Dongning, Jin Wei. CO<sub>2</sub> laser-grooved long period fiber grating temperature sensor system based on intensity modulation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(31):7966-7970.
- [18] Oh S T, Han W T, Paek U C, et al. Azimuthally symmetric longperiod fiber gratings fabricated with CO<sub>2</sub> laser[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 41(3):188-190.
- [19] Kritzinger R, Schmieder D, Booyesen A. Azimuthally symmetric long-period fibre grating fabrication with a TEM<sub>01</sub>\*-mode CO<sub>2</sub> laser[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(3):03400401-08.
- [20] Wang Pengfei, Bo Lin, Guan Cunying, et al. Low-temperature sensitivity periodically tapered photonic crystal-fiber-based refractometer[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19):3795-3798.
- [21] Kosinski S G, Vengsarkar A M. Splicer-based long-period fiber gratings [J]. *Proceeding of 23th Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*. San Jose, USA; IEEE, 1998:278-279.
- [22] Hwang I K, Yun S H, Kim B Y. Long-period fiber gratings based on periodic microbends[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(18):1263-1265.
- [23] Smietana M, Bock W J, Mikulic P, et al. Increasing sensitivity of arc-induced long-period gratings—pushing the fabrication technique toward its limits[J]. *Measurement Science & Technology*, 2011, 22(1):01520101-06.
- [24] Iadicicco A, Campopiano S, Cusano A. Long-period gratings in hollow core fibers by pressure-assisted arc discharge technique[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21):1567-1569.
- [25] Yin Guolu, Wang Yiping, Liao Changrui, et al. Long period fiber gratings inscribed by periodically tapering a fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7):698-701.
- [26] 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.
- [27] Dragomir A, Nikogosyan D N, Zagorulko K A, et al. Inscription of fiber Bragg gratings by ultraviolet femtosecond radiation[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22):2171-2173.
- [28] Hindle F, Fertein E, Przygodzki C, et al. Inscription of long-period gratings in pure silica and germano-silicate fiber cores by femtosecond laser irradiation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8):1861-1863.
- [29] Zhou Kaiming, Dubov M, Mou Chengbo, et al. Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16):1190-1192.
- [30] Williams R J, Kraemer 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.
- [31] Lin C Y, Wang L A. Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(21):1872-1873.
- [32] Lin C Y, Wang L A, Wei C G. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(8):1159-1168.
- [33] Jian Yan, Li Qun, Chien H L, et al. A novel strain-induced thermally tuned long-period fiber grating fabricated on a periodic corrugated silicon fixture [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(7):941-943.
- [34] Yang Rui, Yu Yongsen, Chen Chao, et al. Rapid fabrication of microhole array structured optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19):3879-3881.
- [35] Guo Chunjing, Yu Yongsen, Xue Yang, et al. Compact long-period fiber gratings based on periodic microchannels [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2):111-114.
- [36] Savin S, Dignonnet M J F, Kino G S, et al. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(10):710-712.
- [37] Ham J W, Hun L J, Cho J Y, et al. A birefringence compensation method for mechanically induced long-period fiber gratings in optical communication and sensing systems[C]//*Proceedings of 15th International Conference on Optical Fiber Sensors*. Portland, USA; IEEE, 2002:167-170.
- [38] Cho J Y, Lee K S. A birefringence compensation method for mechanically induced long-period fiber gratings[J]. *Optics Communications*, 2002, 213(4-6):281-284.
- [39] Lim J H, Lee K S, Kim J C, et al. Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(4):331-333.
- [40] Noordegraaf D, Scolari L, Laegsgaard J, et al. Electrically and mechanically induced long period gratings in liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Optics*

- Express, 2007, 15(13):7901-7912.
- [41] Fujimaki M, Ohki Y, Brebner J L, et al. Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation[J]. Optics Letters, 2000, 25(2):88-89.
- [42] VonBibra M L, Roberts A. Fabrication of long-period fiber gratings by use of focused ion-beam irradiation [J]. Optics Letters, 2001, 26(11):765-767.
- [43] Grant K J, Roberts A, Jamieson D N, et al. Long period gratings in multimode fiber fabricated with high-energy ion implantation[J]. Fiber and Integrated Optics, 2003, 22(4):225-237.
- [44] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors [C] // Proceeding of Fiber Optic and Sensors VII Conference. Boston, USA; SPIE, 1989; 98-107.
- [45] Rao Yunjiang. In-fibre Bragg grating sensors [J]. Measurement Science & Technology, 1997, 8(4): 355-375.
- [46] Abramov A A, Hale A, Windeler R S, et al. Widely tunable long-period fibre gratings[J]. Electronics Letters, 1999, 35(1):81-82.
- [47] Shu Xuewen, Allsop T, Gwandu B, et al. High-temperature sensitivity of long-period gratings in B-Ge codoped fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8):818-820.
- [48] Khaliq S, James S W, Tatam R P. Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor [J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(5):792-795.
- [49] Bhatia V A, Vengsarkar M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. Optics Letters, 1996, 21(9):692-694.
- [50] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D, et al. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(9): 1223-1225.
- [51] Zhu Tao, Rao Yujiang, Song Yun, et al. Highly Sensitive temperature-independent strain sensor based on a long-period fiber grating with a CO<sub>2</sub>-laser engraved rotary structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(8):543-545.
- [52] Liao Changrui, Wang Ying, Wang Dongning, et al. Femtosecond laser inscribed long-period gratings in all-solid photonic bandgap fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(6):425-427.
- [53] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, et al. Structural bending sensor using fibre gratings[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1994, 2292: 407-413.
- [54] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. Electronics Letters, 2000, 36(2):120-121.
- [55] Baek S, Jeong Y, Lee B. Characteristics of short-period blazed fiber Bragg gratings for use as macro-bending sensors[J]. Applied Optics, 2002, 41(4):631-636.
- [56] Patrick H J, Chang C C, Vohra S T. Long period fibre gratings for structural bend sensing[J]. Electronics Letters, 1998, 34(18):1773-1775.
- [57] VanWiggeren G D, Gaylord T K, Davis D D, et al. Axial rotation dependence of resonances in curved CO<sub>2</sub>-laser-induced long-period fibre gratings[J]. Electronics Letters, 2000, 36(16):1354-1355.
- [58] Ye C C, James S W, Tatam R P. Simultaneous temperature and bend sensing with long-period fiber gratings[J]. Optics Letters, 2000, 25(14):1007-1009.
- [59] Chen Shaohua, Tong Zhengrong, Zhao Qida, et al. A smart bending sensor with a novel temperature and strain-insensitive long-period grating[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2004, 116(1):103-106.
- [60] Wang Yiping, Rao Yunjiang. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(5):839-843.
- [61] Shao Liyang, Laronche A, Smietana M, et al. Highly sensitive bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating [J]. Optics Communications, 2010, 283(13):2690-2694.
- [62] Geng Pengchen, Zhang Weigang, Gao Shecheng, et al. Two-dimensional bending vector sensing based on spatial cascaded orthogonal long period fiber[J]. Optics Express, 2012, 20(27):28557-28562.
- [63] Tian X G, Tao X M. Torsion measurement using fiber Bragg grating sensors [J]. Experimental Mechanics, 2001, 41(3):248-253.
- [64] Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi, et al. Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(8):1154-1156.
- [65] Lo Yulun, Chue B R, Xu Shaohong. Fiber torsion sensor demodulated by a high-birefringence fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2004, 230(4-6): 287-295.
- [66] Lin C Y, Wang L A, Chen G W. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(8):1159-1168.

- [67] Wang Yiping, Rao Yunjiang. Long period fibre grating torsion sensor measuring twist rate and determining twist direction simultaneously [J]. Electronics Letters, 2004, 40(3):164-166.
- [68] Rao Yunjiang, Zhu Tao, Mo Qiuju. Highly sensitive fiber-optic torsion sensor based on an ultra-long-period fiber grating[J]. Optics Communications, 2006, 266(1):187-190.
- [69] Shi Leilei, Zhu Tao, Fan Yanen, et al. Torsion sensing with a fiber ring laser incorporating a pair of rotary long-period fiber gratings [J]. Optics Communications, 2011, 284(22):5299-5302.
- [70] Li Xiaolan, Zhang Weigang, Ruan Juan, et al. Temperature- and strain-insensitive torsion sensor based on phase-shifted ultra-long-period grating[J]. Electronics Letters, 2012, 48(4):235-236.
- [71] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in-fiber grating high-pressure sensor[J]. Electronics Letters, 1993, 29(4):398-399.
- [72] Liu Y, Zhang L, Bennion I. Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre[J]. Electronics Letters, 1999, 35(8):661-663.
- [73] Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao, et al. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fibre grating element [J]. Chinese Physics Letters, 2003, 20(1):72-75.
- [74] Wang Ying, Wang Dongning, Jin Wei, et al. Asymmetric transverse-load characteristics and polarization dependence of long-period fiber gratings written by a focused CO<sub>2</sub> laser[J]. Applied Optics, 2007, 46(16):3079-3086.
- [75] Zhang Yifan, Chan Chichiu, Chan Yenmei, et al. Tilted long period gratings pressure sensing in solid core photonic crystal fibers[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5):954-957.
- [76] Liang Ruibing, Sun Qizhen, Wo Jianghai, et al. Theoretical investigation on refractive index sensor based on Bragg grating in micro/nanofiber [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10):1-3
- [77] Bhatia V, D'Alberty T, Zabaronick N, et al. Temperature-insensitive long -period gratings for strain and refractive index sensing[J]. Smart Structures and Materials, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1997, 3042: 194-202.
- [78] Patrick H J, Kersey A D, Bucholtz F. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(9):1606-1612.
- [79] Shu Xuewen, Zhang Lin, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [80] Chong J H, Shum P, Haryono H, et al. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer [J]. Optics Communications, 2004, 229(1-6):65-69.
- [81] Rindorf L, Jensen J B, Dufva M, et al. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing [J]. Optics Express, 2006, 14(18): 8224 -8231.
- [82] Zhu Tao, Rao Yunjiang, Wang Jiuling. Characteristics of novel ultra-long-period fiber gratings fabricated by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. Optics Communications, 2007, 277(1):84-88.
- [83] Cusano A, Iadicicco A, Pilla P, et al. Cladding mode reorganization in high-refractive-index-coated long-period gratings: effects on the refractive-index sensitivity [J]. Optics Letters, 2005, 30(19):2536-2538.
- [84] Martinez-Rios A, Monzon-Hernandez D, Torres-Gomez I. Highly sensitive cladding-etched arc-induced long-period fiber gratings for refractive index sensing [J]. Optics Communications, 2010, 283(6): 958-962.
- [85] Shi Cuihua, Zhu Tao, Rao Yunjiang, et al. Fiber optic accelerometer based on long period fiber grating induced by CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(4):841-845.
- [86] Zheng Shijie, Zhu Yinian, Krishnaswamy S. Temperature insensitive all-fiber accelerometer using a photonic crystal fiber long-period grating interferometer[C] // Proceeding of Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security Conference. San Diego, USA; SPIE, 2012: 1-10.



**第一作者简介:**王义平,男,1971年7月生,深圳大学特聘教授、博士生导师,国家杰出青年基金获得者,“深圳市物联网光子器件与传感系统重点实验室”主任,“光纤传感技术粤港联合研究中心”主任。主要研究方向为光纤传感技术、光纤光栅和光子晶体光纤等。获全国优秀博士学位论文奖、欧盟玛丽居里国际引进人才基金奖、德国洪堡研究基金奖等奖励。主持科研课题20余项,授权中国和美国专利11项,合著专著1部。国际会议特邀报告28次,发表论文210篇,其中SCI收录120篇,SCI引用1625次,H指数为22。

E-mail: ypwang@szu.edu.cn