



DOI: 10.12086/oe.2018.180243

## 光纤传感用新型特种光纤的研究进展与展望

童维军<sup>1</sup>, 杨晨<sup>1,2</sup>, 刘彤庆<sup>1\*</sup>, 张心贲<sup>1</sup>, 杨坤<sup>1</sup>, 杨玉诚<sup>1</sup>, 唐明<sup>2</sup><sup>1</sup>长飞光纤光缆股份有限公司特种产品事业部光纤光缆制备技术国家重点实验室,湖北武汉430073;<sup>2</sup>华中科技大学光学与电子信息学院,武汉国家光电实验室&下一代互联网接入系统国家工程实验室,湖北武汉430074

**摘要:** 本文介绍了主流的特种光纤制备技术及其特点,并根据特种光纤在众多光纤传感领域的应用实例报道了熊猫型保偏光纤、旋转光纤、特殊环境用光纤以及分布式光纤传感用的新型光纤等特种光纤的研发方向及取得的成果。相比传统采用通信光纤的传感应用,基于特种光纤的光纤传感展现出明显的性能优势,并且衍生出多种新型传感机理的光纤传感系统。

**关键词:** 光纤传感; 特种光纤; 分布式传感; 光纤陀螺; 电流互感器

**中图分类号:** O436.3; TN253

**文献标志码:** A

**引用格式:** 童维军,杨晨,刘彤庆,等. 光纤传感用新型特种光纤的研究进展与展望[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 180243

## Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing

Tong Weijun<sup>1</sup>, Yang Chen<sup>1,2</sup>, Liu Tongqing<sup>1\*</sup>, Zhang Xinben<sup>1</sup>, Yang Kun<sup>1</sup>, Yang Yucheng<sup>1</sup>, Tang Ming<sup>2</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Specialty Product Business Unit, Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan, Hubei 430073, China;<sup>2</sup>Wuhan National Lab for Optoelectronics (WNLO) & National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract:** The paper reviews the major techniques of specialty fiber fabrication. It primarily reports the progress of panda-type polarization maintaining fiber, spun fiber, specialty fibers for harsh environment and those for novel distributed sensing applications. Compared with the sensing systems utilizing conventional communication fiber, the fiber optic sensors based on specialty fibers show evident advances in performance. Additionally, the development of specialty fibers facilitates the advent of novel sensing mechanisms.

**Keywords:** fiber optic sensing; specialty fiber; distributed sensing; fiber optic gyroscope; fiber optic current transformer

**Citation:** Tong W J, Yang C, Liu T Q, *et al.* Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180243

收稿日期: 2018-03-09; 收到修改稿日期: 2018-05-09

基金项目: 国家重点研发计划“先进光纤传感材料与器件关键技术及应用”(2017YFB0405500)

作者简介: 童维军(1976-),男,博士,高级工程师,主要从事特种光纤制备及应用的研究。E-mail: tongweijun@yofc.com

通信作者: 刘彤庆(1986-),男,博士,主要从事新型光纤传感技术的研究。E-mail: liutongqing@yofc.com

## 1 引言

2009年诺贝尔物理学奖得主、被世人誉为“光纤之父”的高琨博士,在1966年发表的论文《光频率的介质纤维表面波导》中,首次提出了用玻璃纤维作为光波导用于通讯的理论,为这个世界开启了一个崭新的光通信的时代。1970年,美国康宁公司的“光纤三杰”——Maurer R 博士,Keck D 博士和 Schultz P 博士,发明了世界上第一根损耗达到 20 dB/km 以下的可用于商用的通信光纤。时至今日,全球范围内已经铺设的通信光纤光缆不计其数,已达到数十亿千米,“令文字、音乐、影像和影片在一瞬间传到世界各地”。中国光纤光缆 40 年的发展也走出了一条自主创新之路,光通信产业的发展从低端到高端,逐步掌握了产业链的主导权。

我们一般把用于通信的光纤称之为“通信光纤”,而把常规通信光纤以外的具有特殊功能的光纤称之为“特种光纤”<sup>[1]</sup>。具有特殊性能的特种光纤,以及由特种光纤制成的具有特殊功能的光器件,随着光通信技术的飞速发展在非运营商市场的前沿应用也逐渐受到高度青睐和重视,专有细分市场的“光进铜退”促进了特种光纤的不断深入研究,新型的特种光纤和光纤器件纷纷出现,它们的应用范围也越来越广。品种繁多的特种光纤层出不穷,不仅在光通信和光传感中占据着越来越重要的地位,而且在工业、电力、军事、航空航天、生物医学等方面也发挥着越来越重要的作用<sup>[2-5]</sup>。

通过对通信光纤的掺杂机理、波导结构、功能梯度材料等方面进行独特的设计,可以使得光纤具有不同应用环境的专有特性,实现满足各种特殊用途的特种光纤。特种光纤的这些特性将呈现独特的作用,使得特种光纤具有不同的功能,可以实现各种传感应用。比如基于萨格纳克(Sagnac)效应,使得保偏光纤用于陀螺仪;利用法拉第效应,使得旋转光纤用于光纤电

流互感器;利用光学相干技术,使得抗弯曲光纤用于水听传感;基于拉曼效应,使得多模光纤用于测温传感等。可以看到,特种光纤不仅可以保留基本的信号传输的通信功能,在大部分场合还可以起到传感感知的作用。从功能应用意义上来说,特种光纤本质上也可以称为传感光纤。后文将结合特种光纤的制备技术和不同应用领域的感知差异性,对特种光纤的开发及应用研究进展做进一步的阐述。

## 2 特种光纤制备技术

对于光纤制备技术而言,最为关键的技术是光纤预制棒(preform)的制备技术,而光纤预制棒的制备技术中,又是以光纤芯棒(core-rod)的制备技术为最为核心的技术。目前主要有四种技术制备光纤芯棒,即 MCVD 工艺(modified chemical vapor deposition,改进的化学气相沉积法)<sup>[6]</sup>、PCVD 工艺(plasma chemical vapor deposition,等离子体化学气相沉积法)<sup>[7]</sup>、OVD 工艺(outside vapor deposition,外部气相沉积法)<sup>[8]</sup>以及 VAD 工艺(vapor axial deposition,轴向气相沉积法)<sup>[9]</sup>。四种工艺的基本情况如表 1 所述。

四种工艺各有长短,从沉积速率、反应效率和是否适合制备复杂剖面等角度,可以将各工艺进行比较,如表 2 所示。

特种光纤主要采用 PCVD 技术或 MCVD 技术制造光纤预制棒以实现特殊掺杂和复杂精细波导,其中 PCVD 工艺主要适合制备特种的包括 F、Ge、B 在内元素特殊掺杂的无源光纤,而 MCVD 工艺因为在制备过程中存在 soot(疏松体)的材料状态,适合进行稀土元素、Bi 等有源光纤预制棒的制备。

利用不同预制棒制备技术实现特殊掺杂和复杂波导结构,结合应用环境的差异化需求选用不同特殊功能涂料,对通信光纤拉丝工艺平台进行升级改造,即可以实现系列化的特种光纤,如表 3。

表 1 四大主要光纤预制棒制备技术

Table 1 Introduction to four major preform fabrication processes

工艺	发明公司	发明时间	沉积方式	加热方式	主要产品
MCVD	美国贝尔实验室	1974 年	管内法-径向	氢氧焰	掺稀土光纤
PCVD	荷兰飞利浦公司	1975 年	管内法-径向	等离子体	通信光纤、多模光纤、特种光纤
OVD	美国康宁公司	1976 年	管外法-径向	氢氧焰	通信光纤
VAD	日本 NT&T	1977 年	管外法-轴向	氢氧焰	通信光纤

表 2 四种制棒工艺比较

Table 2 Comparison of the four major perform fabrication processes

工艺	沉积速率	反应效率	制备复杂剖面
PCVD	☆	☆☆☆	☆☆☆
VAD	☆☆	☆☆	☆
OVD	☆☆☆	☆☆	☆
MCVD	☆	☆☆	☆☆

表 3 PCVD 工艺和 MCVD 工艺制备的特种光纤

Table 3 The features of PCVD and MCVD processes

特种光纤制棒工艺	产品类型	主要产品	代表公司
PCVD	无源特种光纤	保偏光纤、色散补偿光纤、抗弯曲光纤、大芯径传能光纤、抗辐射光纤、耐高温光纤、紫外光纤等	长飞、Draka 等
MCVD	有源光纤	掺镱光纤、掺铒光纤、掺铋光纤等	Nufem、长飞、Fibrecore 等

### 3 特种光纤研发进展

#### 3.1 偏振态光纤

##### 3.1.1 保偏光纤

陀螺仪是一种既古老又富有生命力的仪器，相比于早期的机械式陀螺仪，基于 Sagnac 效应的光纤陀螺以其灵敏度高、稳定性好、体积小、重量轻等特点广泛应用于火箭、舰船、飞机等的惯性导航中<sup>[10-12]</sup>。目前光纤陀螺应用领域，脱骨架小型化、高精度是技术发展的方向，具有更小弯曲半径和更好的全温性能稳定性的保偏光纤(polarization maintaining fiber, PMF)

产品才能满足脱骨架小型化和高精度的要求。在较小的弯曲半径时，由于具有较大的弯曲应力，对保偏光纤全温度范围内的光学性能和双折射性能均会产生显著的影响，保偏光纤应该具有更小的、更高精度的几何参数指标，更小的可弯曲半径，更高的机械强度与弯曲条件下疲劳可靠性，以及更为稳定的全温性能。此外，能够同时满足陀螺绕环与器件一体化的细径保偏光纤是当前的研究重点。

一体化细径保偏光纤的难点在于可靠性问题，随着包层直径和光纤直径的减小，光纤的抗拉强度以及温度性能会受到影响。图 1~图 3 为长飞公司对 80

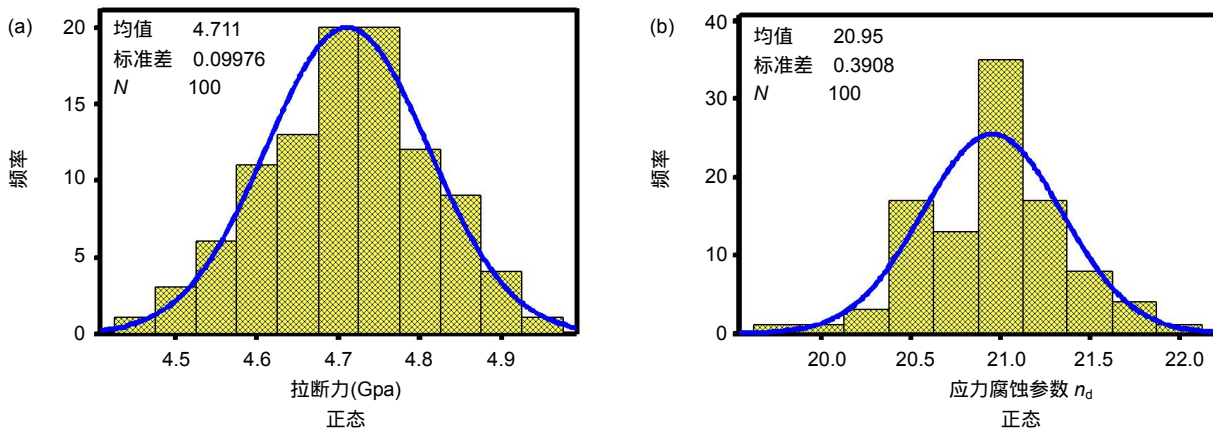


图 1 80/135 保偏光纤机械可靠性

Fig. 1 The proof testing of 80/135 PMF

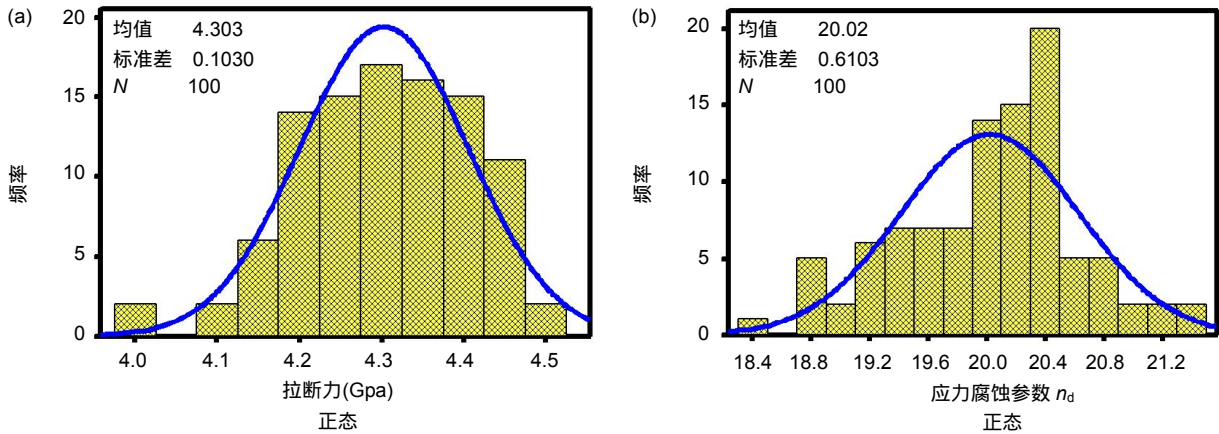


图 2 60/100 保偏光纤可靠性  
Fig. 2 The proof testing of 60/100 PMF

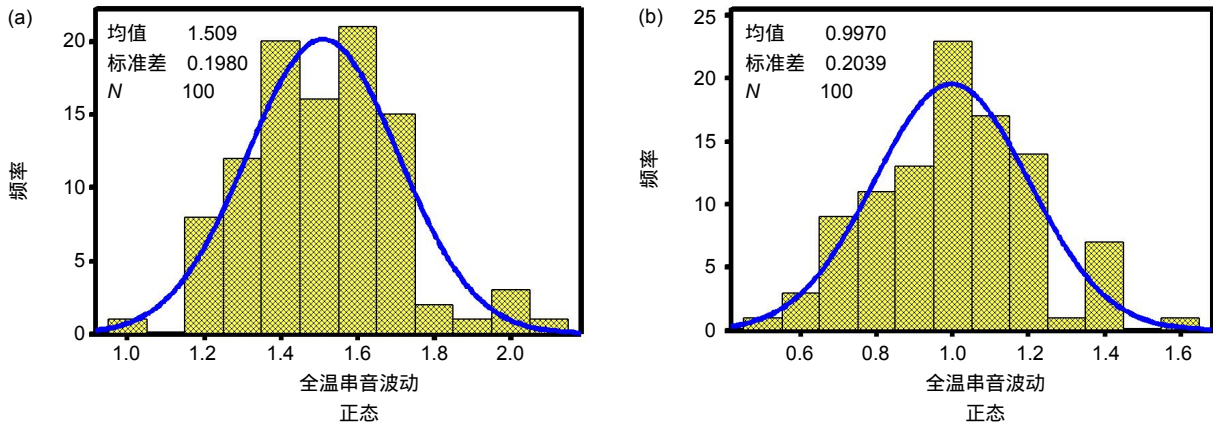


图 3 (a) 80/135, (b) 60/100 保偏光纤全温度范围串音性能  
Fig. 3 The test result of (a) 80/135 and (b) 60/100 PMF on polarization crosstalk

μm(包层)/135 μm(涂层)的量产细径保偏光纤,以及一体化 60 μm/100 μm 的熊猫型细径保偏光纤的机械强度与串音性能测试结果,选用专有涂料保证了光纤的机械可靠性与全温范围内的串音稳定性。

随着光纤陀螺技术的发展,保偏光纤将继续向着细径化方向发展,从 80 μm 到 60 μm 并将进一步发展为 40 μm。细径化的技术发展方向将带动该技术领域的上下游业务的整体发展,比如相关测试仪器、工装夹具以及小型化、一体化的器件的研制等。

### 3.1.1.2 旋转光纤(保圆光纤)

“十三五”以来,国家大力推进“智能电网”的建设,对特高压、大电流的准确测量提出了日益迫切的需求。基于 Faraday 磁光效应的光纤电流互感器因具有测量准确度高、频带宽、动态范围大、绝缘简单、安装灵活等优势,在大电流测量领域具有十分广阔的应用前景。同时,由于现场应用环境的复杂性,除了

需具有足够高的测量准确度外,光纤电流互感器还应具备优良的温度性能和抗振能力。对于电解冶金领域超大电流的测量,电流互感器还应满足柔性安装,测量精度对环路形状、母线偏心、杂散磁场干扰敏感度低等要求。

旋转光纤是光纤电流互感器中的关键部件。它是一种特殊保偏光纤,通过光纤的轴线旋转引入圆双折射,和光纤本身的高线性双折射共同形成椭圆双折射,在旋转周期足够小的情况下,具备很好的圆偏振保持能力。同时,由于存在很高的内应力,保留了保偏光纤很好的抗外部干扰和内部缺陷的能力,适用于全光纤电流互感器的应用<sup>[13-15]</sup>。旋转光纤可以从本质上提升光纤电流传感器的环境适应性,保证传感器满足实际应用需求,因此目前被广泛研究。

旋转光纤保圆机理为,光纤的基模有两个偏振态,设它们的传播常数(即波数,  $\beta=2\pi \cdot n_{\text{eff}}/\lambda$ )分别为  $\beta_1$  和



$\beta_2$ , 圆偏振保持要求  $\beta_1 \approx \beta_2$ 。双折射光纤中两个偏振态的传播常数之差  $\Delta\beta$  (即  $\beta_1 - \beta_2$ ) 较大 (即传播速度相差较大), 随着传播距离的增加, 模式之间的延时差 (对应相位差) 线性增加。

采用离散的概念, 旋转光纤可以看作是一段长为四分之一旋转周期的未处理的双折射光纤切片连接另一段同样的光纤, 但主轴方向旋转了  $\pi/2$ 。这样, 这两段光纤的模式延时可以完全抵消, 如图 4 所示。

这样旋转光纤的局部是线偏振保持光纤, 而整体是圆偏振保持光纤。旋转周期越短, 切片的长度就越短, 局部的最大相位差越小, 越接近理想的圆偏振光。

旋转光纤的制备方法通常分两种: 一是保偏光纤后处理, 一是保偏应力棒在线旋转拉丝。前一种方法

虽然灵活, 但由于涉及光纤涂覆层的剥除和再涂覆, 难以保证光纤的机械可靠性和几何一致性。后一种方法类似普通保偏光纤的生产, 通过预制棒直接拉丝、涂覆, 既保证了光纤强度, 也具备足够的段长几何一致性。依托保偏光纤制备旋转光纤需要解决的问题为 a) 高准直度 (几何、重心) 的应力预制棒; b) 高速旋转拉丝塔的动态垂直精度和稳定性; c) 超低速拉丝的自动控制等工艺难题。图 5 为长飞公司制备的高双折射旋转光纤 SH1016-A (5 mm 旋转节距) 应用于光纤电流互感器的比差随温度变化曲线, 实验结果展示出作为电流传感核心元件的旋转光纤传感环具有较高的温度一致性, 其它性能指标在国内主流 FOCT 厂家应用测试得到与国外厂商相当的评价, 具备工程应用条件。

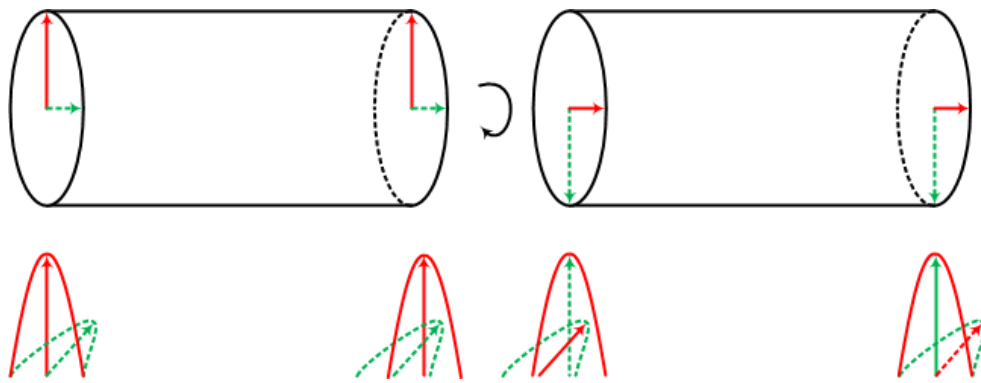


图 4 旋转光纤保圆机理示意图

Fig. 4 The schematics of spun fiber operation principle

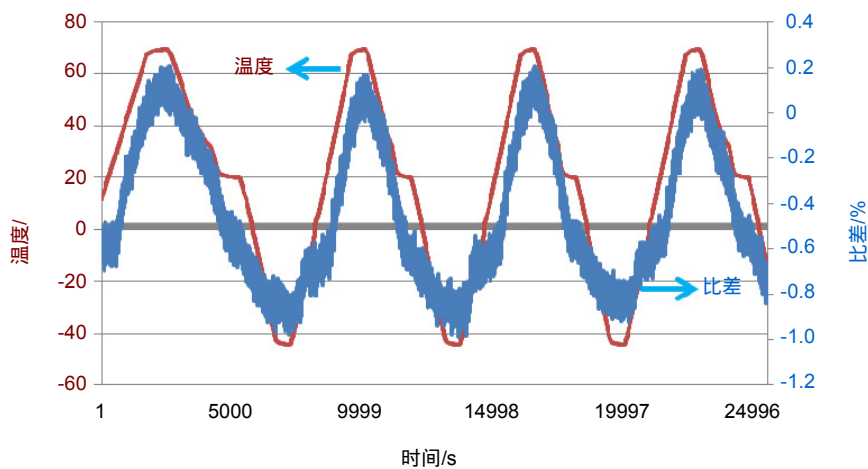


图 5 长飞旋转光纤的比差随温度变化曲线

Fig. 5 The test result of FOCT performance during temperature fluctuation

### 3.2 能量增益功能有源光纤、无源光纤

#### 3.2.1 光纤放大器之掺铒光纤与铒镱共掺光纤

在传感系统中,信号的中继放大是十分重要的环节。20世纪80年代末,Payne D教授研制成功了波长为1550 nm的掺铒光纤(erbium doped fibre, EDF),成为光纤通信发展历史上的里程碑事件。随着通信系统的升级和光纤传感领域特殊光源的需要,对掺铒光纤的增益性能提出了更高的要求,伴随着ASE、飞秒激光光栅刻写等新技术的发展,出现了基于包层泵浦的双包层(double cladding, DC)铒镱共掺光纤(erbium-ytterbium co-doped fibre, EYDF),可以实现更高的输出功率。目前,三包层(TC)制备技术的出现,使得铒镱共掺光纤具有更高的输出功率和更为可靠的稳定性。

包括俄罗斯科学院及国内上海大学王廷云等多年从事铒镱共掺光纤的研制,预期满足宽度、高增益的放大技术提供新型特种光纤。

#### 3.2.2 光纤激光器之掺镱光纤

光纤激光器具有高输出功率(高峰值、高平均功率),近衍射极限的光束质量,尤其在精密工业加工中的应用范围不断拓展。在近几年,工业激光器在全球激光器市场份额持续增长,得益于在材料加工应用的快速发展及成熟,使得光纤激光器市场需求一直保持高速增长态势。

据统计,2016年国内中小功率光纤激光器的产能达7.4万台,销售近6万台的小功率光纤激光器、12000台中功率光纤激光器和超过2000台的高功率光纤激光器。国产光纤激光器在中小功率的出货量占比超过

90%,但多集中在中低功率领域。在中高功率方面,依然被国外企业占据。一般激光器厂家使用进口掺镱双包层光纤,因此也会指定各类器件使用的无源尾纤也配套同样的进口掺镱双包层光纤,导致国产光纤推进难度大。同时严格的验证标准和较长的验证周期,也导致迭代改进的速度落后。

长飞公司经过5年的研发,针对国产光纤激光器的需求,分别推出了低功率市场的有源及无源光纤的解决方案,以及中高功率连续激光器用的大模场双包层掺镱20/400光纤。

针对MOPA及典型调Q 20 W光纤激光器打标应用,10/125 DC掺镱光纤(ytterbium doped fibre, YDF)的高吸收系数和高光-光转换效率,确保一级使用4 m左右,对于MOPA型激光器可降低光纤的使用长度,压缩成本,而915 nm附近的平坦吸收峰降低热管理要求,简化散热设计;对于调Q型可降低一级谐振腔长和腔内损耗,压缩脉宽,提高二级脉宽的展宽冗余量,是高质量打标的可靠保证。

长飞20/125的DC YDF采用大模场设计,20  $\mu\text{m}$ 的纤芯掺杂经过优化设计后,能保持 $M^2 < 1.5$ 的光束输出,如图6所示。长飞通过使用优化的特种拉丝工艺,在提高光纤的环境稳定性方面有明显进展,尤其是针对高温高湿环境的快速老化验证。在通过24 h,125  $^{\circ}\text{C}$ ,1.5个大气压的老化后,光纤玻璃包层与内涂层之间依然保持一致的剥离力,再经过500 h连续烤机验证,功率波动不超过5%,测试结果证实,125  $\mu\text{m}$ 系列的掺镱双包层光纤能通过严苛的环境老化验证和长时间的稳定性验证。

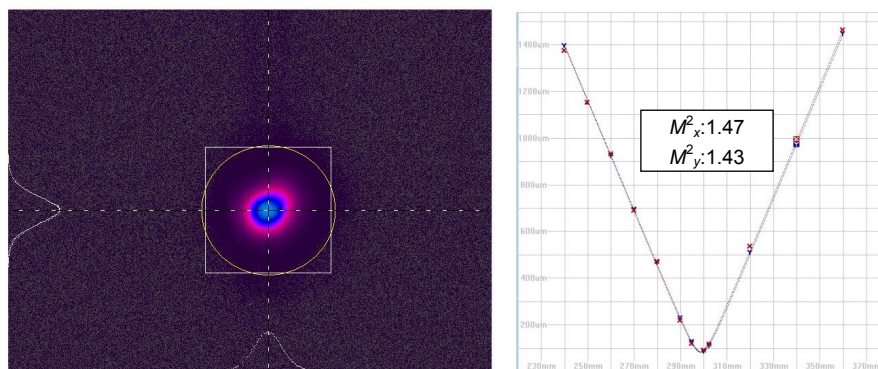


图6 20/125 光束质量测试结果

Fig. 6 The quality of fiber laser beam using 20/125 YDF

中高功率连续激光器的大量成本在泵源总功率和热管理。提高有源光纤的转换效率，能减少泵源的功率输出，降低泵源的热管理难度，同时更高的转换效率能降低光纤产生的热量，降低由于严重的发热造成光纤涂层的快速老化，提高光纤的寿命，保持更长时间的功率输出。长飞公司开发了 20/400 大模场双层掺镜光纤，由图 7(a)可以看出，在使用 915 nm 的泵浦光和 1080 nm 的光栅时，长飞 20/400 光纤的光-光转换效率达到 69%，同时，随着泵浦功率的增加，光-光效率呈现出增加的现象。同时为了验证更高功率的稳定，增加了一组 1400 W 的稳定性测试，测试结果显示，长飞 20/400 光纤 1 h 内功率波动值在 0.21%，非常稳定。

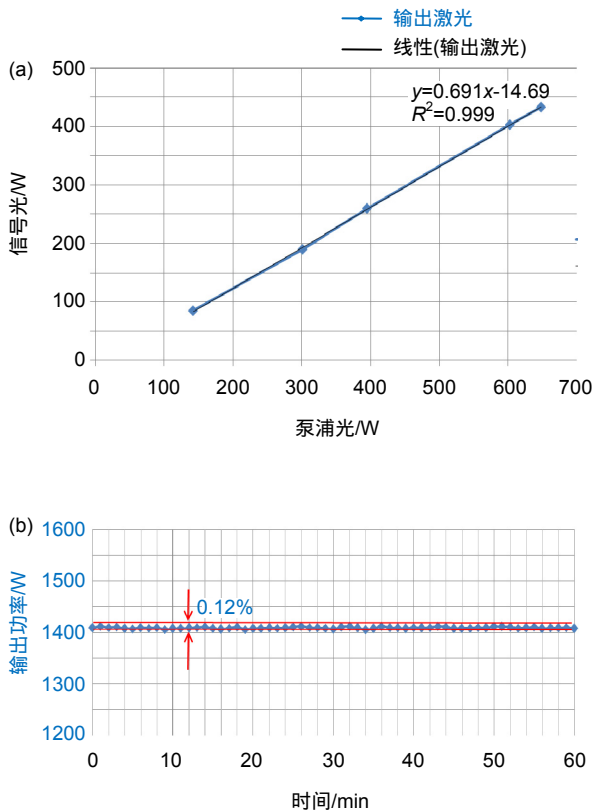


图 7 (a) 915 nm 泵浦光光转换效率; (b) 1400 W 连续稳定性测试

Fig. 7 (a) The light-to-light conversion efficiency of fiber laser; (b) The output power fluctuation at 1400 W

综上所述，长飞针对低功率打标激光器应用推出 125  $\mu\text{m}$  系列两款双层掺镜光纤 10/125, 20/125, 在高温高湿老化中涂层与玻璃包层的结合紧密，保证了长期的工作可靠性；20/400 光纤在中功率的转换效率

达到 69%，1400 W 输出的功率波动 0.21%。

### 3.2.3 传能光纤与紫外光纤

激光器能量的传递与输出是激光器系统中的末端功能，也是重要部分之一。利用光纤实现高传输效率、高可靠性的柔性传输与输出，是激光器的最佳选择，结合硬质涂料和特殊包层掺杂技术，大芯径高数值孔径的传能光纤可以实现超过千瓦级功率的能量输出，而双层技术将极大地提升光纤的长期可靠性。国产化大芯径光纤已广泛应用于特高压串补、换流阀、柔性直流、激光传能工控、激光生物医疗等领域。

随着紫外波段激光器技术的发展，对紫外传能光纤产品也提出了新的课题。普通传能光纤的纤芯材料，并不适合在紫外波段的传输应用。而紫外光纤是针对性地对光纤材料进行了高羟基掺杂技术的工艺优化，使得光纤可以在可见光、紫外波段高效率、高可靠性地工作，有力支持了激光显示、紫外印刷、食品卫生等行业的装备升级。

### 3.3 特殊环境用光纤

#### 3.3.1 密绕环境-弯曲不敏感光纤

在光纤制导、光纤水听器应用场合，对于光纤的强度、连续段长与抗弯曲性能都同时提出了更为严苛的要求<sup>[19-20]</sup>。该类应用涉及到多圈数小弯曲半径的密集光纤复绕，普通通信光纤一般只有 100 kpsi 的光纤筛选强度，约 30 mm 半径的弯曲半径，远远无法满足要求。弯曲不敏感光纤通过特殊的波导设计和涂料优化，实现了光纤良好的抗弯曲性能，最小弯曲半径可以达到 5 mm。通过对关键玻璃原材料、预制棒以及光纤生产环境和工艺的严格控制，保障光纤的筛选强度达到 200 kpsi，各项机械可靠性指标满足 IEC 国际标准，高强度下的光纤连续段长达到至少 10 km 以上。同时，光纤的尺寸从常规的 125  $\mu\text{m}$  进一步小型化，实现了 80  $\mu\text{m}$  的细径高强度抗弯曲光纤。该系列的光纤产品已经广泛应用于国内相关的军工企业，未来将结合特种硬质涂料技术的发展，实现更小尺寸(60  $\mu\text{m}$ /40  $\mu\text{m}$ )、更高强度和更强的抗弯性能(<5 mm 弯曲半径)。

#### 3.3.2 辐射环境-抗辐射光纤

传统的通信单模或者多模光纤，因为光纤的材料结构存在缺陷，在辐射环境下，会短期内急剧失效，造成通信的中断。为此，必须从光纤的材料结构本身入手进行设计，提高光纤的抗辐射性能。因为辐射环境主要涉及太空与核电设施等敏感领域，国际上长期

以来没有大范围的技术交流,相关高端产品的进口也存在一定的限制。国内相关军工企业对该类光纤的国产化需求一直较为迫切。该类光纤所工作的环境其辐射条件各不相同,国际上也没有统一的光纤产品标准,一般参考美军标 MIL-PRF-49291/6-05 标准对光纤的抗辐射性能进行测试。全新的“纯硅芯”概念的材料结构设计,已经实现了具有较好抗辐射性能的单模光纤与多模光纤产品,可以在剂量率较高、总剂量达到上万戈瑞(Gray, Gy)的辐照环境中使用。部分光纤产品已经在国家航空航天领域得到了应用。抗辐射光纤技术是一项具有较高技术难度的特种光纤技术,其技术的突破,将带来一系列产品的功能升级与应用拓展,比如将抗辐射光纤技术应用于保偏光纤,将使得保偏光纤可以在更为广阔的领域发挥作用。

### 3.3.3 高温环境-耐高温光纤

与辐射环境类似,另外一种恶劣环境的情况为高温环境。同样的,普通的通信单模或多模光纤,在 100 °C 以上的环境中会因为涂覆材料失效而导致光纤损耗增加,造成通信的中断。在这一涉及到“功能梯度材料”的关键光纤技术问题上,以长飞公司为代表的国内单位依靠涂料技术团队,成功实现了适合 150 °C 以及 300 °C 工作的涂料设计与性能验证,实现了特种聚酰亚胺涂料(PI-polyimide)的热固化及低速拉丝的拉丝技术平台,并实现了高温的环境可靠性测试技术平台。光纤本征损耗与高温老化后的附加损耗水平都与国际先进水平保持一致,光纤强度可以达到 100 kpsi,各项机械可靠性测试结果完全满足通信光纤标准。同时,几何指标参数控制精度达到领先水平。

将“波导结构”与“材料结构”上的技术优势相结合,将耐高温性能与具有其它特性的特种光纤进行组合,该类特殊环境应用的特种光纤将衍生为系列化的通信与传感功能兼有的特种耐高温光纤产品。图 8 为长飞公司的聚酰亚胺涂覆的耐高温光纤在 300 °C 的长期附加衰减测试结果。

### 3.4 传感功能增强型特种光纤

近年来,分布式光纤传感技术受到国内外学者的广泛关注与研究。其主要是通过光时域反射仪(optical time domain reflectometry, OTDR)技术获取整个光纤链路的信息,具有显著的“长距离分布式”特点,因而被应用于石油、天然气管道监控,桥梁、堤坝等大型结构健康检测以及航空航天等领域。其中,基于布里渊散射效应的分布式传感技术能够实现温度、应力双参量检测,获得米甚至厘米级的高空间分辨率,同时传感距离可达数十至百余千米,因而被持续关注并获得广泛应用<sup>[21-26]</sup>。然而,基于标准单模光纤的布里渊传感系统普遍存在温度、应力交叉敏感以及单一信道无法进行多维度、多参量的同时测量等问题,而具有空分复用特性的多芯、少模光纤的研制将有助于解决上述问题并为探索新的传感机理创造了条件。

#### 3.4.1 分布式温度传感用多模光纤

由于多模光纤的拉曼增益高、受激阈值高,因此分布式测温产品多采用多模光纤作为传感光纤。但传统的通信多模光纤仅优化了波长 850 nm 和 1300 nm 处的衰减,较高的 C 波段衰减严重影响了长距离测量的信噪比,另一方面较大的模间色散会造成长距离测

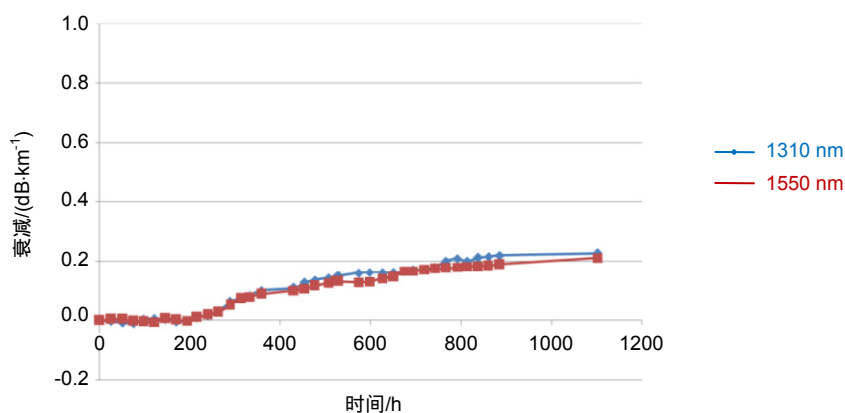


图 8 长飞公司 PI 光纤的高温性能(1100 h, 附加损耗小于 0.3 dB/km)

Fig. 8 The induced attenuation of PI fiber at 300 °C (1100 h, the total induced attenuation is less than 0.3 dB/km)



试下空间分辨率的劣化。此外，普通多模光纤因其几何一致性较差，会导致接续点测得的温度出现跳变。

长飞公司开发了分布式测温系统光纤(distributed temperature sensing-fibre, DTS-Fibre),具有梯度渐变型折射率分布,通过优化剖面设计和工艺控制,确保了光纤在长波长窗口(1300 nm、1550 nm)具有优异的光学和几何特性,采用特殊涂覆材料和工艺,实现耐高温性能。图 9 为长飞公司 DTSF 折射率剖面设计图,分布式测温系统光纤的几何指标和数值孔径指标满足 BI-OM2 的标准,引入光纤折射率“沟槽”,将多模光纤大部分的模态控制在纤芯传输,提高光纤的抗弯曲性能。除此以外,由于此光纤应用于 DTS 系统,优化了光纤在 C 波段上带宽,使 1550 nm 处带宽大于 1000 MHz·km。DTSF 光纤采用先进的等离子体化学气相沉

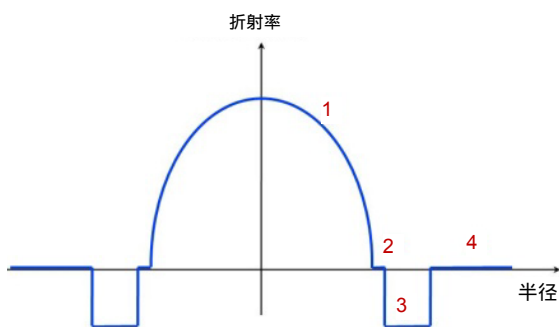


图 9 DTSF 折射率剖面设计图

Fig. 9 The refractive index profile of the MMF for temperature sensing

积(PCVD)工艺制造,光纤有优良的几何、光学、环境和机械特性。对 DTSF 光纤的衰减谱及带宽进行测试的结果如图 10 所示。

性能优化后的测温多模光纤结合长飞 DTS 主机测试结果显示,温度曲线平整,测温距离在 25 km 时,温度分辨率优于 2 °C,空间分辨率约 2 m~3 m。此外,该概念光纤还可以针对抗弯和耐高温涂层进行设计和处理,使该光纤更适合成缆以及高温环境应用。通过 DTS 工作波长处衰减的优化,提高了长距离测温的信噪比;C 波段带宽的优化提高了长距离 DTS 的空间分辨率,解决了目前 DTS 系统在长距离传输中空间分辨率劣化;几何一致性的优化,提高了系统的测温精度,以及实际工程中不可避免的光缆接续点温度一致性。

### 3.4.2 分布式温度传感用少模光纤

基于多模光纤的 DTS 优势在于多模光纤具有较大的有效模场面积和较高的拉曼增益系数,易于通过自发拉曼散射获得光纤沿线的温度信息。其劣势在于多模光纤的损耗较大,更重要的是由于多模光纤模间色散(模式差分群时延)引入的脉冲展宽导致长距离传感的空间分辨率不足,这在需要较高空间分辨率的温度测量场景下实际上限制了光纤的传感距离(通常多模系统长度局限于 8 km ~ 10 km)。基于单模光纤的分布式拉曼传感系统,其优势在于损耗较小,不存在模间色散导致的脉冲展宽,其劣势在于有效模场面积较小,为了避免产生受激拉曼散射,输入光功率受限从而探测距离受限。因此基于单模光纤的长距离分布式光纤温度传感器系统较为复杂、成本较高(需要进行分

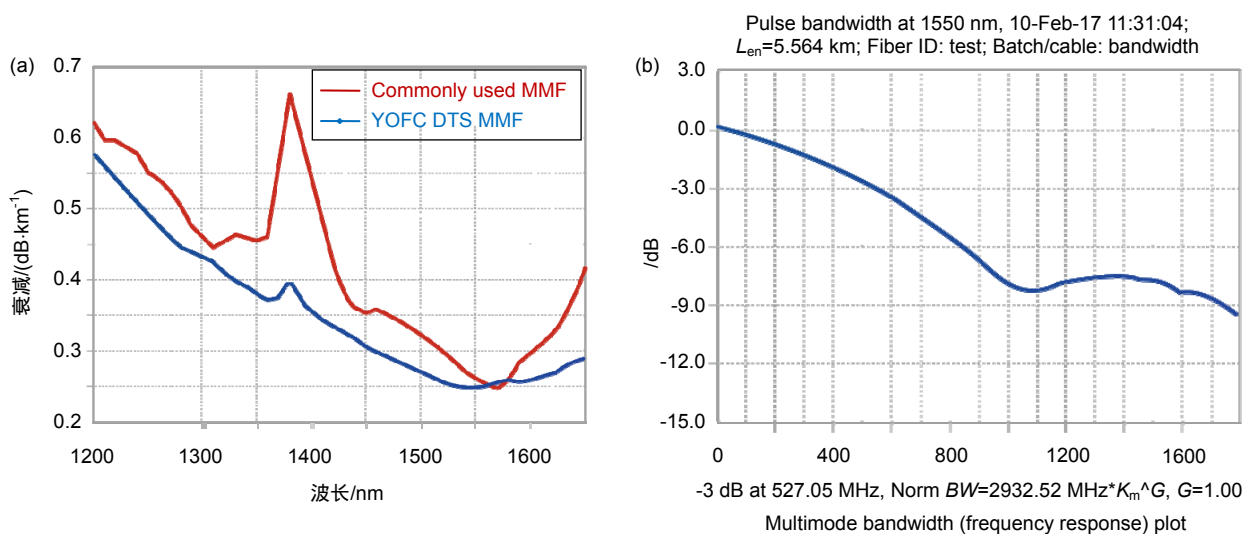


图 10 (a) DTSF 衰减谱; (b) DTSF 带宽

Fig. 10 (a) The attenuation spectrum and (b) bandwidth of DTSF

布式放大并进行复杂的信号处理)。而少模光纤和单模光纤相比,在只激励起基模的情况下,对比单模光纤而言,具有较大的模场面积,对比多模光纤而言,由于其特殊的折射率设计,具有模间色散极小的优势。利用少模光纤作为传感光纤,结合现有的单模光纤拉曼系统,可在保证高空间分辨率的同时,有效延长现有 DTS 的传感距离,并无需增加系统复杂度。

在拉曼分布式测温系统中,温度解调基于背向散射的反斯托克斯光强和斯托克斯光强,  $I_{as}/I_s \propto \exp(h\Delta\nu/kT)$ 。其中  $h$  是普朗克常数,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $\Delta\nu$  是反斯托克斯光与斯托克斯光之间的频率差。因此拉曼分布式测温系统的温度解调分辨率取决于拉曼散射光的信噪比。因此增加注入到传感光纤中的脉冲功率可以有效提高系统性能,而脉冲光功率的大小受限于受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS),一旦泵浦脉冲光功率超过 SRS 阈值功率,后向拉曼散射光的曲线就会失真。SRS 阈值功率  $P_R \approx 20(A_{eff}/g_R L_{eff})$ ,其中  $A_{eff}$  为光纤模场有效面积,  $g_R$  为拉曼增益系数,  $L_{eff}$  为光纤有效长度,由公式可看出,大有效模场面积的光纤更适合拉曼分布式测温系统。空间分辨率是基于 OTDR 技术的拉曼分布式测温系统另一个重要参数,空间分辨率  $\Delta z = \tau c / 2n_{eff}$ ,其中  $\tau$  为泵浦光脉冲宽度,  $n_{eff}$  为光纤有效折射率,由此得出,拉曼分布式测温系统的空间分辨率由泵浦光的脉冲宽度决定。尽管基于大模场面积的多模光纤具有更高的受激拉曼阈值,但由于模式色散引起的脉冲展宽在长距离测温中会导致空间分辨率恶化。

与普通通信多模光纤相比,长飞开展了分布式测温少模光纤的研制和应用研究,仅支持两种空间模式,通过拉锥熔接技术显著抑制基模与其他高阶模耦合,准基模运行避免了模间色散导致脉宽展宽,同时大有

效面积显著提高了入纤光功率,最终实现了基于少模光纤的长距离高空间分辨率分布式光纤测温系统产品。图 11 为长飞分布式测温少模光纤结合少模 DTS 主机测试的结果,测温距离大于 20 km 时,温度分辨率优于 4 °C,空间分辨率约 3 m。针对少模光纤的测温机理优化 DTS 系统,有望实现 50 km 量级的测温距离,对铁路、电力线、长距离油气管道等工程的在线状态监测有现实需求。

### 3.4.3 分布式三维形状传感用多芯光纤

2016 年华中科技大学唐明教授研究团队在国际上首次报道了偏心纤芯中的布里渊频移对弯曲敏感的特征<sup>[27]</sup>,如图 12 所示。其本质是由弯曲导致外层纤芯受到的拉伸或者挤压纵向应力作用,而处于中性轴的中间芯则不受影响。基于此特性,该团队进一步研究了基于七芯光纤的长距离分布式弯曲传感和三维形状传感技术,成功实现了空间分辨率 20 cm、传感距离 1 km 的曲率测量,测量结果的半径误差小于 8%、旋转角度误差低于 3%。与美国国家航空航天局(NASA)开发的基于多芯光纤光栅的三维形状传感<sup>[28-33]</sup>相比,该技术不需要对多芯光纤做任何处理,而且解调算法相对简单,传感距离长,具有独特的优势。

其中七芯光纤为长飞公司所拉制,包括同质七芯光纤和异质七芯光纤,它们的具体几何参数为:一个纤芯位于几何中心,外层芯围绕中间芯呈正六边形分布。包层直径约为 150 μm,芯间距约为 42 μm。为了抑制芯间串扰,光纤设计中在每个纤芯和包层之间引入了低折射率的沟道结构,最终实现光纤芯间串扰低至 -45 dB/100 km。

### 3.4.4 分布式温度应变传感用异质多芯光纤

布里渊分布式光纤传感器普遍存在温度、应力交叉敏感的问题。为了实现两者的可区分测量,传统单

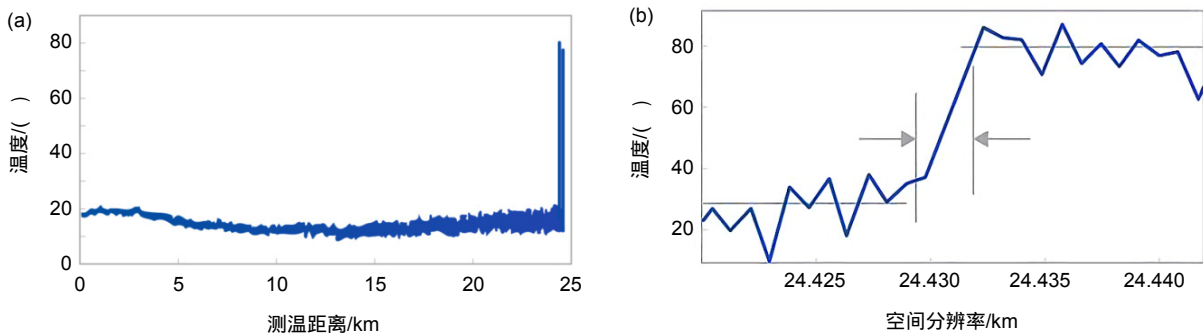


图 11 (a) 长飞测温少模光纤温度分辨率曲线图; (b) 长飞测温少模光纤空间分辨率曲线图  
Fig. 11 (a) The temperature resolution of DTS based on FMF; (b) The spatial resolution of DTS based on FMF

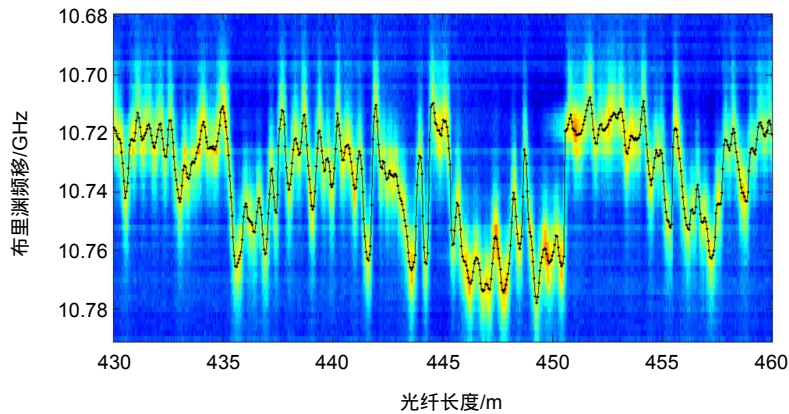


图 12 偏心纤芯中布里渊频移表现出强烈的弯曲敏感特性<sup>[27]</sup>

Fig. 12 The curvature sensitivity of multifore fiber in terms of Brillouin gain spectrum<sup>[27]</sup>

模光纤中通常所采用的方式如下：1) 测量色散位移光纤的多个布里渊频移峰<sup>[34]</sup>；2) 同时测量布里渊频移和归一化的布里渊增益强度<sup>[35-37]</sup>；3) 拉曼、布里渊混合系统<sup>[38-42]</sup>。而异质多芯光纤中不同纤芯所用的材料有所不同，因而各芯布里渊频移的温度响应系数与应力响应系数也有所差异。异质多芯光纤的这种特性有望为温度、应力交叉敏感问题提供新的解决方式。长飞公司制备的异质七芯光纤中外层纤芯与中间芯所用的预制棒材料不相同，因此它们的有效折射率有所不同(如图 13 所示) 进而具有不同的温度与应力响应系数。

基于此可构建如下的温度应力的系数矩阵，实现双参量同时解调：

$$\begin{bmatrix} \Delta \nu_B^{cen} \\ \Delta \nu_B^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T^{cen} & C_\varepsilon^{cen} \\ C_T^{out} & C_\varepsilon^{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix}。$$

其中： $\Delta \nu_B^{cen}$ 、 $\Delta \nu_B^{out}$  分别为中间芯与外层芯的布里渊频移变化量， $\Delta T$ 、 $\Delta \varepsilon$  分别为沿光纤分布的温度、应变的变化量， $C_T^{cen}$ 、 $C_T^{out}$  分别为中间芯与外层芯的布里渊频移的温度响应系数， $C_\varepsilon^{cen}$ 、 $C_\varepsilon^{out}$  分别为中间芯与外层芯的布里渊频移的应力响应系数。2017 年，

Zhao 等人提出基于异质七芯光纤的布里渊分布式传感系统，实现了温度、应力双参量同时解调，温度误差为 1 °C，应力误差为 9  $\mu\varepsilon$ 。此外，利用外层芯的对称性，可以有效消除弯曲的影响。

### 3.4.5 分布式弯曲传感用少模光纤

少模光纤，相对于单模光纤而言，具有更多的空间模式，从而可作为实现空分复用的另一种有效介质。少模光纤在传感领域也扮演不可忽视的角色。2001 年，印度理工学院的 Kumar 等人理论研究了少模光纤模式干涉仪的应力响应作用机理，并通过实验进行了验证<sup>[43]</sup>。国内外学者围绕基于少模光纤的干涉仪结构开展了一系列点式传感工作研究，主要通过检测干涉谱的移动解调出温度、应力、弯曲等参量<sup>[44-50]</sup>。在分布式传感领域，韩国中央大学的 Song 教授团队及澳大利亚墨尔本大学的 Li 等人相继研究了不同空间模式下的布里渊散射特征<sup>[51]</sup>。结果表明，不同空间模式对应的布里渊频移对温度、应力响应具有差异性，为解决布里渊交叉敏感问题提供了具有潜力的方案。

此外，少模光纤模场有效面积较大的特性在传感

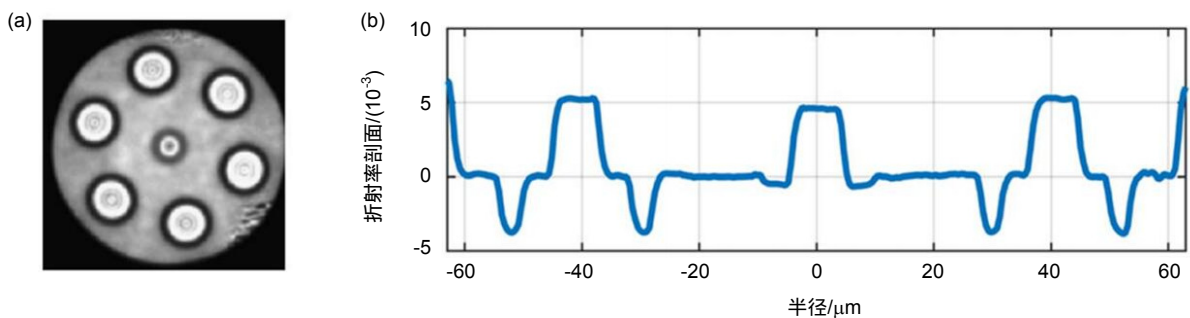


图 13 (a) 实验所用的异质多芯光纤的横截面视图；(b) 径向相对折射率分布<sup>[27]</sup>

Fig. 13 (a) The cross section of multicore fiber; (b) The refractive index profile of multicore fiber<sup>[27]</sup>



领域获得了独特的应用。研究表明, 弯曲会导致光纤横向折射分布不均, 在光纤中传播的光为了满足相速度的一致, 会向折射率高的部分偏移。由于少模光纤基模的模场面积比单模光纤大得多, 因此少模光纤中弯曲导致的布里渊频移将会更加明显。Wu 等人对上述理论进行仿真与实验验证, 并实现了基于少模光纤测量半径为 0.7 cm~3.4 cm 的分布式曲率传感技术<sup>[52]</sup>。图 14 为仿真结果。

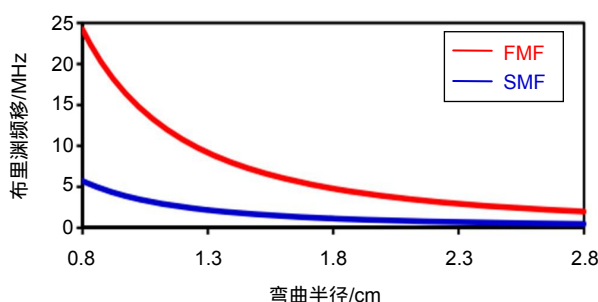


图 14 布里渊频移变化量随弯曲半径关系<sup>[52]</sup>  
Fig. 14 The Brillouin frequency shift of SMF and FMF vs. bending radius<sup>[52]</sup>

## 4 总结与展望

除了上述介绍的结合细分应用的多种特种光纤的进展之外, 还有许多其它特种光纤及应用。例如基于背向瑞利散射原理的声学传感应用相关的瑞利散射增强型 DAS 光纤, 该光纤通过在玻璃材料结构中引入缺陷形成特殊的芯层材料, 使得光纤具有更高的瑞利散射系数, 可有效提升系统传输信噪比以及传感性能。

光子晶体光纤也是特种光纤的一个重要分支, 基于该光纤特殊的微结构以及各种新型机理、效应, 光子晶体光纤在气体、形貌等传感方面也可以起到非常好的作用。

总的来说, 随着特种光纤在不同领域的应用不断拓展创新, 特种光纤技术将向着小型化、高可靠性、环境多样性、功能多样化的方向发展。特种光纤会在细分应用领域衍生出多系列的新型光纤, 为光纤传感技术的发展提供更多、更新、更好、更可靠的光纤产品。

## 致谢

本文部分工作由国家重点研发计划“先进光纤传感材料与器件关键技术及应用”(2017YFB0405500)资

助, 在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 王廷云. 特种光纤与光纤通信[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016.
- [2] Liu T G, Wang S, Jiang J F, *et al.* Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(8): 1681–1692.
- [3] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2014, **35**(8): 1681–1692.
- [3] Takeda S I, Aoki Y, Nagao Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors[J]. *Composite Structures*, 2012, **94**(3): 813–819.
- [4] Dandridge A, Cogdell G B. Fiber optic sensors for navy applications[J]. *IEEE LCS*, 1991, **2**(1): 81–89.
- [5] Peng W, Banerji S, Kim Y C, *et al.* Investigation of dual-channel fiber-optic surface plasmon resonance sensing for biological applications[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(22): 2988–2990.
- [6] Integrated Publishing, Inc. Fabrication of optical fibers[EB/OL]. <http://www.tpub.com/neets/tm/107-5.htm>.
- [7] Dutton H S. Understanding optical communications[EB/OL]. [2009–02–19]. <http://medea.uib.es/salvador/coms-optiques, adicional/ibm/ch06/06-02.html>.
- [8] Stadnik D. Optical fiber technology[EB/OL]. <http://csrgch.pw.edu.pl/tutorials/fiber>.
- [9] Pfuch A, Heft A, Weidl R, *et al.* Characterization of SiO<sub>2</sub> thin films prepared by plasma-activated chemical vapour deposition[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, **201**(1–2): 189–196.
- [10] Lefèvre H C. *The Fiber-Optic Gyroscope*[M]. London: Artech House Inc., 1993.
- [11] Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. All-single-mode fiber-optic gyroscope[J]. *Optics Letters*, 1981, **6**(4): 198–200.
- [12] Sanders G A, Szafraniec B, Liu R Y, *et al.* Fiber optic gyros for space, marine, and aviation applications[J]. *Proceeding of SPIE*, 1996, **2837**: 61–71.
- [13] Bohnert K, Gabus P, Kostovic J, *et al.* Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3–5): 511–526.
- [14] Michie C. Polarimetric optical fiber sensors[M]//Yin S Z, Ruffin P B, Yu F T S. *Fiber Optic Sensors*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [15] Lin H, Huang S C. Fiber-optics multiplexed interferometric current sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **121**(2): 333–338.
- [16] Foroni M, Ruggeri L, Poli F, *et al.* S+C+L band double-pass EDFA[C]// *Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications*. Whistler Canada Washington, DC: OSA, 2006: JWB44.
- [17] Nix M, Yam S S H. Highly efficient dual wavelength pumping scheme for thulium-doped fiber amplifier[C]//*Proceedings of the 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and electro-optics Society*. Montreal, Que., Canada: IEEE, 2006: 390–391.
- [18] Miyazaki T, Inagaki K, Karasawa Y, *et al.* Nd-doped double-clad fiber amplifier at 1.06 μm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, **16**(4): 562–566.
- [19] Li M J. Bend-insensitive optical fibers for FTTH applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, **7234**: 72340B.
- [20] Cheng Y, Li S Y, Li J Y, *et al.* Theory research and manufacture of bend insensitive optical fiber[J]. *Optics & Optoelectronic*



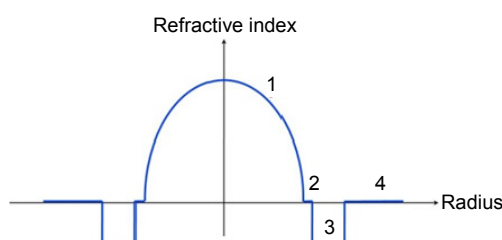
- Technology*, 2005, **3**(6): 38–40.
- 成煜, 李诗愈, 李进延, 等. 抗弯光纤的理论研究与制造[J]. 光学与光电技术, 2005, **3**(6): 38–40.
- [21] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, **12**(7): 8601–8639.
- [22] Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152–4187.
- [23] Motil A, Bergman A, Tur M. [INVITED] State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **78**: 81–103.
- [24] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100km sensing length[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(2): 277–279.
- [25] Wang F, Zhang X P, Lu Y G, et al. Spatial resolution analysis for discrete Fourier transform-based Brillouin optical time domain reflectometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(2): 025202.
- [26] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(9): 1229–1235.
- [27] Zhao Z Y, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(22): 25211–25223.
- [28] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Spatial-division multiplexed Brillouin distributed sensing based on a heterogeneous multi-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(1): 171–174.
- [29] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Spatial-division multiplexed hybrid Raman and Brillouin optical time-domain reflectometry based on multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(22): 25111–25118.
- [30] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(3): 2967–2973.
- [31] Moore J P. Shape sensing using multi-core fiber[C]//*Proceedings of 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015: Th1C.2.
- [32] NASA. Real-Time 3D Shape Rendering: CA 93523–0273[R]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 2013.
- [33] Rogge M D, Moore J P. Shape sensing using a multi-core optical fiber having an arbitrary initial shape in the presence of extrinsic forces: US-Patent-8,746,076[P]. 2014–06–10.
- [34] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7): 834–842.
- [35] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(7): 450–452.
- [36] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(11): 1276–1278.
- [37] Bolognini G, Soto M A, Pasquale F D. Fiber-optic distributed sensor based on hybrid Raman and Brillouin scattering employing multiwavelength Fabry–Pérot lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(20): 1523–1525.
- [38] Bolognini G, Soto M A. Optical pulse coding in hybrid distributed sensing based on Raman and Brillouin scattering employing Fabry-Perot lasers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(8): 8459–8465.
- [39] Taki M, Signorini A, Oton C J, et al. Hybrid Raman/Brillouin-optical-time-domain- analysis-distributed optical fiber sensors based on cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(20): 4162–4165.
- [40] Sasaki Y, Takenaga K, Matsuo S, et al. Few-mode multicore fibers for long-haul transmission line[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, **35**: 19–27.
- [41] Mizuno T, Takara H, Sano A, et al. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(2): 582–592.
- [42] Mizuno T, Takara H, Shibahara K, et al. Dense space division multiplexed transmission over multicore and multimode fiber for long-haul transport systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(6): 1484–1493.
- [43] Kumar A, Goel N K, Varshney R K. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> mode interference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(3): 358–362.
- [44] Chen J, Lu P, Liu D M, et al. Optical fiber curvature sensor based on few mode fiber[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(17): 4776–4778.
- [45] Su J, Dong X P, Lu C X. Intensity detection scheme of sensors based on the modal interference effect of few mode fiber[J]. *Measurement*, 2016, **79**: 182–187.
- [46] Salik E, Medrano M, Cohoon G, et al. SMS fiber sensor utilizing a few-mode fiber exhibits critical wavelength behavior[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(7): 593–595.
- [47] Su J, Dong X P, Lu C X. Property of bent few-mode fiber and its application in displacement sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(13): 1387–1390.
- [48] Luo C, Lu P, Fu X, et al. All-fiber sensor based on few-mode fiber offset splicing structure cascaded with long-period fiber grating for curvature and acoustic measurement[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, **32**(2): 224–229.
- [49] Zhang J. Few-mode fiber based sensor in biomedical application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9480**: 94800O.
- [50] Song K Y, Kim Y H. Characterization of stimulated Brillouin scattering in a few-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(22): 4841–4844.
- [51] Li A, Hu Q, Shieh W. Characterization of stimulated Brillouin scattering in a circular-core two-mode fiber using optical time-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(26): 31894–31906.
- [52] Wu H, Wang R X, Liu D M, et al. Few-mode fiber based distributed curvature sensor through quasi-single-mode Brillouin frequency shift[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(7): 1514–1517.

# Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing

Tong Weijun<sup>1</sup>, Yang Chen<sup>1,2</sup>, Liu Tongqing<sup>1\*</sup>, Zhang Xinben<sup>1</sup>,  
Yang Kun<sup>1</sup>, Yang Yucheng<sup>1</sup>, Tang Ming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Specialty Product Business Unit, Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan, Hubei 430073, China;

<sup>2</sup>Wuhan National Lab for Optoelectronics (WNLO) & National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China



The refractive index profile of the MMF for temperature sensing

**Overview:** The paper introduced four primary approaches for fiber core-rod preform fabrication: the MCVD (modified chemical vapor deposition) process, the PCVD (plasma chemical vapor deposition) process, the OVD (outside vapor deposition) process and the VAD (vapor axial deposition) process. Due to the flexible control of sophisticated refractive index profile and the capability of rare-earth element doping, the PCVD and MCVD processes are widely utilized for specialty fiber preform fabrication.

The progresses of specialty fibers used for sensing were reviewed, organized in four sections, namely, specialty fibers based on polarization, functional specialty fibers as a gain medium for fiber-optic sensing, specialty fibers for harsh environment, and fibers for distributed sensing. The reduced-diameter polarization-maintaining fibers (PMF), such as PMFs with 80  $\mu\text{m}$  (cladding)/135  $\mu\text{m}$  (coating) and 60  $\mu\text{m}$ /100  $\mu\text{m}$ , have been developed to meet the demand of small-size gyroscope applications with comparable mechanical and optical performance. YOFC has successfully fabricated high-birefringence spun fiber for fiber-optic current transformer (FOCT) applications. The results of tested FOCT system with the spun fiber coil as the sensing element showed great agreement with temperature change; Rare-earth doped fibers, which are an essential part of fiber amplifiers and fiber lasers, have achieved high absorption coefficient and high light/light conversion efficiency for lasers. The 20/125 double-cladding ytterbium-doped fiber fabricated by YOFC has ensured a laser output of  $M^2 < 1.5$ ; Specialty fibers for harsh environment use also play a crucial role in fiber-optic sensing in various extreme environment applications. High strength bend-insensitive fibers have been developed in order to meet the requirement of optical hydrophone applications with 200 kpsi proof test and bending radius as small as less than 5 mm. The radiation hard fibers with pure silica core produced by YOFC have passed the test in the environment of up to 10000 Gy. For high temperature resistant fibers, test results showed the polyimide-coated fiber was able to withstand as high as 300  $^{\circ}\text{C}$  and also ensure the optical and mechanical properties; Additionally, the paper reviewed a number of novel specialty fibers that have been used in distributed sensing applications, such as the optimized multimode fiber (MMF) for distributed temperature sensing (DTS), few-mode fiber (FMF) for DTS. The results showed the DTS system employing the optimized MMF and FMF could effectively extend the measurement range without deterioration of the spatial resolution and temperature resolution. Also, the Brillouin optical time domain analysis systems based on multicore fibers and FMF have been reported for distributed shape sensing.

In conclusion, the paper reviewed the progress of specialty fibers used for fiber sensing and envisioned the trend of specialty fibers to be more compact, more robust, and suitable for extreme environment.

**Citation:** Tong W J, Yang C, Liu T Q, *et al.* Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180243

Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB045500)

\* E-mail: liutongqing@yofc.com