小芯径多模光纤拉曼分布式温度传感器

何祖源[1,2],刘银萍[2],马 麟[2*],杨 晨[1],童维军[1]

(1. 长飞光纤光缆股份有限公司 光纤光缆制备技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;
2. 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘 要: 设计并制作了一种用于拉曼分布式温度传感的具有大有效模场面积和低模式色散的渐变折射率的小芯径多模光纤,同时达到了高空间分辨率和高温度分辨率。在现有的拉曼分布式温度传感系统基础上,测量了使用不同传感光纤和注入条件下的温度和空间分辨率。在满注入工作模式下,基于小芯径多模光纤的拉曼分布式温度传感器在 25 km 处达到了 1 ℃的温度分辨率,空间分辨率的劣化仅为 0.13 m,作为对比,使用多模光纤的拉曼分布式温度传感器的空间分辨率劣化了 1.58 m。在单模注入条件下,基于小芯径多模光纤的拉曼分布式温度传感器在 25 km 处达到了 4.7 ℃的温度分辨率,相对使用单模光纤有 2.2 ℃的提升,同时空间分辨率没有劣化。

关键词: 光纤传感; 温度传感器; 拉曼散射; 光时域反射计

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0422002

Raman distributed temperature sensor using multimode fiber with reduced core size

He Zuyuan[1,2], Liu Yinping[2], Ma Lin[2*], Yang Chen[1], Tong Weijun[1]

(1. State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company (YOFC), Wuhan 430074, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A graded-index multimode fiber (GI-MMF) with reduced core size was designed and fabricated with large effective mode area and low intermodal dispersion for Raman distribution temperature sensor (RDTS) to simultaneously achieve high spatial and temperature resolution. In experiment, the temperature and spatial resolution of the RDTS was measured using different types of fibers under different launch conditions based on a commercially available RDTS system. By using the GI-MMF under the overfilled launch condition, a 1 ℃ temperature resolution was achieved with a spatial resolution degradation of 0.13 m at the distance of 25 km. The spatial resolution degradation using the standard MMF is 1.58 m in comparison. Moreover, the RDTS using the proposed GI-MMF under the single mode launch condition achieved a temperature resolution of 4.7 ℃ temperature resolution at the

收稿日期: 2018-11-16; **修订日期:** 2018-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500);国家自然科学基金(61775138)

作者简介: 何祖源(1962-),男,教授,博士,主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究。Email: zuyuanhe@sjtu.edu.cn

distance of 25 km with a 2.2 ℃ improvement and no degradation on spatial resolution compared with that using the standard SMF.

Key words: optical fiber sensing; temperature sensor; Raman backscattering; OTDR

0 引 言

光纤传感器因其具有体积小、无源、抗腐蚀、抗电磁干扰以及传感点数多等优势,在振动、温度、应变、磁场与生物传感等应用中被广泛应用[1-6]。基于光时域反射技术和自发拉曼散射的拉曼分布式温度传感器可获得整根光纤的温度信息,具有高空间和温度分辨率的优点,因此被广泛应用在油气管道监测,火灾报警系统等领域[7-8]。在拉曼分布式温度传感系统中,通过检测注入到光纤中的探测脉冲背向自发拉曼散射光来获取温度信息。由于自发拉曼散射光非常微弱,通常需要高功率的探测脉冲光来提高信噪比。为了提高发生受激拉曼散射的阈值功率,具有大模场面积和高非线性阈值的多模光纤常被用作传感光纤[9]。然而,由于多模光纤具有较大的模式色散,在长测量距离下,空间分辨率会受到严重的影响。一个采用 10 ns 宽度探测脉冲的标准多模光纤拉曼分布式温度传感系统,其理论空间分辨率为 1 m,而由于模式色散影响,在 10 km 和 35 km 处的空间分辨率分别下降到 1.2 m 和 4 m[10]。因此,在长距离应用中,常采用单模光纤作为传感光纤,以避免空间分辨率的退化。单模光纤的非线性阈值很低,因此温度分辨率不够理想。近期,一个基于阶跃折射率分布少模光纤的拉曼分布式温度传感系统被提出,相对于单模光纤,温度分辨率由 10 ℃提升到 6 ℃。由于是准单模注入,光纤的有效模场面积受限,信噪比的提升较为有限[11]。

文中提出了一种基于小芯径多模光纤的拉曼分布式温度传感器。所设计和拉制的小芯径多模光纤具有大有效模场面积和低模间色散,可实现高温度分辨率和空间分辨率长距离测量。通过使用尾纤为 OM1 多模光纤或单模光纤的波分复用器与传感光纤熔接,来实现满注入或者单模注入的工作方式。满注入时,传感光纤的大部分模式被激发,而单模注入条件下,仅有基模和少量高阶模被激发。在实验中,采用 10 ns 的探测脉冲,基于标准多模光纤的拉曼分布式温度传感系统在 21 km 处的空间分辨率为 2.58 m,温度分辨率为 0.7 ℃。通过采用和现有多模拉曼温度传感系统相同的满注入方式,基于所设计的小芯径多模光纤的分布式拉曼温度传感器在 25 km 处实现了 1℃的温度分辨率和 1.13 m 的空间分辨率。在单模注入条件下,基于小芯径多模光纤的拉曼分布式温度传感器在 25 km 处达到了 4.7 ℃的温度分辨率,相对使用单模光纤有 2.2 ℃的提升,同时空间分辨率没有劣化。此外,文中提出的小芯径多模光纤可以良好兼容现有的多模和单模拉曼分布式温度传感系统,具有实际应用价值。

1 传感光纤的设计与制造

笔者采用小芯径多模光纤设计具有高信噪比表现和长测量距离的拉曼分布式温度传感系统。为了抑制模间色散,文中采用渐变折射率分布的纤芯结构,折射率分布可由公式(1)表示:

$$n(r)=n_0\sqrt{1-2\Delta(r/R)^{\alpha}} \tag{1}$$

式中:n_0 为纤芯中心的折射率;R 为纤芯半径;Δ 为纤芯和包层的相对折射率差;α 为折射率分布系数。通常,大的模场面积可以注入更高的功率,同时也会引入更大的模式色散。因此,拉曼分布式温度传感器的温度分辨率和空间分辨率之间存在着相互制约的关系。为了实现足够大的模场面积同时获得小的模间色散,笔者利用有限元法探究了 1 550 nm 波长处差分模式延迟(Differential Mode Delay,DMD)和有效模场面积(Effective Mode Area,A_{eff})与光纤半径的依赖关系。仿真结果如图 1 所示。为了和传统拉曼分布式温度传感系统所用的标准多模光纤相匹配,将相对折射率差和 α 分别固定在 1.1%和 2.0。蓝线和红线分别表示基模的有效模场面积和少模光纤所支持最高阶模式相对基模的模间群延迟。从图中可以看出,有效模场面积基本随着半径的增大而线性增大。当半径小于 14 μm 时,最高阶模式的模间群延迟随着半径增长缓慢,当半径大于 14 μm 时,模间群延迟随着半径的增大急剧增长。因此,选取半径

为 12 μm 以获得小的模间群延迟，同时保证较为理想的信噪比表现。所设计的小芯径多模光纤的差分模间延时仅为传统标准多模光纤的 9%，而预期信噪比相对多模光纤只下降了 3 dB。

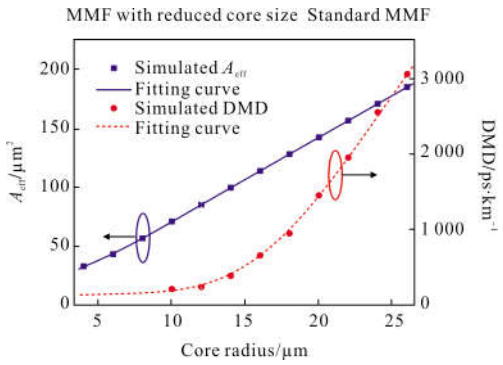


图 1 小芯径多模光纤的模间群延迟(DMD)和有效模场面积(A_{eff})与光纤半径 R 之间的关系

Fig.1 Dependences of the DMD and A_{eff} of the GI-MMF on the core radius R

笔者探究了模间群延迟和有效模场面积与 α 的依赖关系，计算结果如表 1 所示。可以看出，最佳的 α 值在 2.0 附近。LP_{02} 模相对基模的差分模间延时绝对值最大值大约为 176.1 ps/km。LP_{21} 和 LP_{02} 的模场面积大于 200 m^2，表明在满注入温度计的条件下，所设计的光纤具有较理想的非线性阈值和信噪比表现。

所设计的光纤通过等离子体化学气相沉积法拉制，光纤各方面性能均未受到明显影响。拉制光纤的折射率分布图由 S14 光纤折射率分析器测得，结果如图 2 所示。利用截断法测得光纤在 1 550 nm 处的衰减为 0.24 dB/km。设计的小芯径多模光纤可以与多模波分复用器或单模波分复用器熔接并在低熔接损耗下实现满注入与单模注入。从芯径为 62.5 μm 的 OM1 多模光纤到设计的小芯径多模光纤的平均熔接损耗为 1 dB，从小芯径多模光纤到单模光纤的平均熔接损耗则为 0.2 dB。

表 1 所设计的小芯径多模光纤的仿真参数

Tab.1 Simulated parameters of the GI-MMF

	DMD/ps·km^{-1}			A_{eff} /μm^2			
Mode	LP_{11}	LP_{21}	LP_{02}	LP_{01}	LP_{11}	LP_{21}	LP_{02}
α=1.9	−230.3	−616.4	−711.3	83	169.3	204.7	174.1
α=2.0	−0.6	−88.7	−176.1	85.2	171.1	202.8	212.3
α=2.1	238.5	404.7	293.6	87.4	172.7	218.2	167.3

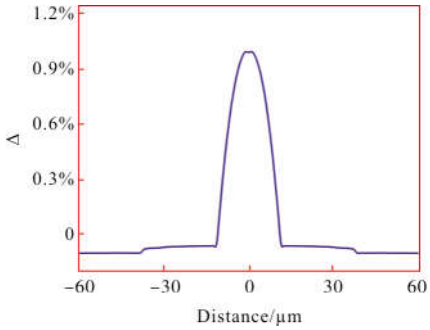


图 2 设计的小芯径多模光纤折射率分布测量结果

Fig.2 Measured refractive index profile of the GI-MMF

2 实验系统与实验结果

实验系统如图 3 所示。一个高功率激光器被用作激光源，其输出功率为 17 dBm。激光器的输出光经由一个强度调制器调制成一系列光脉冲。强度调制器则由一个任意信号发生器所产生的电脉冲信号驱动。脉冲信号的宽度为 10 ns，脉冲重复率为 10 kHz。调制产生的光脉冲由一个掺铒光纤放大器放大，放大后的光脉冲峰值功率略低于待测光纤的非线性阈值。掺铒光纤放大器产生的放大自发辐射噪声由光滤波器滤除。经过光滤波器后，探测光脉冲经过一个波分复用器，注入至待测光纤中。笔者使用一

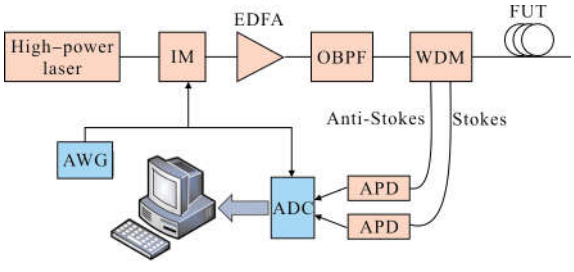


图 3 实验装置图

Fig.3 Experimental setup

个芯径为 62.5 μm 的多模波分复用器实现满注入，或者使用一个单模波分复用器来达成单模注入条件。待测光纤的自发后向拉曼散射光被波分复用器分为斯托克斯光和反斯托克斯光，并由两个雪崩光电探测器接收。光电探测器的输出信号由一个采样率为 250 MHz，采样精度为 12 位的 2 通道信号采集卡接收。由于测温精度和温度分辨率均与信号信噪比紧密相关，为了提高信噪比，采集到的信号被平均 100 000 次，所需的测量时间小于 90 s。

首先在满注入条件下进行实验，以提升注入至小芯径多模光纤中的光功率。由于高阶模得到激发，光纤的模场面积将会增大，非线性阈值也会提高，因此拉曼分布式温度传感器的测量信噪比可以得到显著的提升。光纤中设置了三个传感段，分别位于 10、19、23 km 处。传感段光纤通过水浴控制温度，传感段光纤长度约为 20 m。实验中，室温约为 25 ℃。在满注入条件下，斯托克斯光和反斯托克斯光的损耗系数经拟合分别为 0.247、0.289 dB/km。测量得到的光纤沿线温度曲线如图 4(a)~(c)所示。测温精度用多次测量的平均值与测量值的均方根差表征。测温距离越长，信噪比越低，测温精度越差，通常采用光纤末端的测温精度作为最大误差范围。为了确定系统的准确度，使用一个精度为 0.1 ℃的温度计测量水温作为真实温度，在 25 km 测温距离和 0~100 ℃ 测温范围内，系统多次测量的平均值与真实温度之间的最大偏差为系统的准确度。经过计算，满注入条件下，在 25 km 范围内使用小芯径多模光纤的测温精度为±0.7 ℃，测温准确度为 1.0 ℃，使用标准多模光纤的测温精度为±0.5 ℃，测温准确度为 0.8 ℃。利用制造的小芯径多模光纤和标准多模光纤作为传感光纤所实现的温度分辨率与距离之间的关系如图 4(d)所示，温度分辨率定义为在信噪比为 1 的情况下，信号所表征的温差，通过计算 1 km 距离窗口内温度曲线的均方根误差得到。由结果可见，利用小芯径多模光纤实现的拉曼分布式温度传感器的温度分辨率接近基于标准多模光纤的拉曼分布式温度传感器。采用小芯径多模光纤，在 25 km 处，得到了 1 ℃的温度分辨率。同时，为分析在满注入条件下的空间分辨率下降的情况，如图 5(a)~(c)所示，分别测量了在 10、19、23 km 距离处的空间分辨率，测量空间分辨率的具体方法是观察空间阶跃温度响应，温度响应 10%~90%所对应的空间长度即为空间分辨

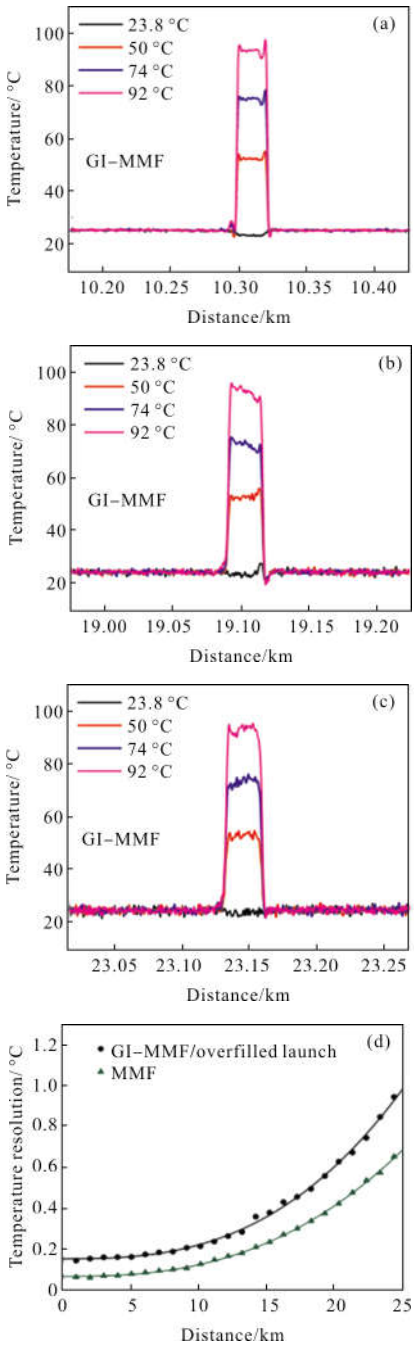


图 4 满注入条件下使用拉制的小芯径多模光纤在距离为(a) 10 km，(b) 19 km 和 (c) 23 km 处分别测量得到的温度曲线；(d) 使用拉制的小芯径多模光纤和标准多模光纤得到的温度分辨率曲线

Fig.4 Temperature profiles of the fabricated GI-MMF under the overfilled launch condition at (a) 10 km, (b) 19 km, and (c) 23 km; (d) temperature resolution profile using the GI-MMF and MMF

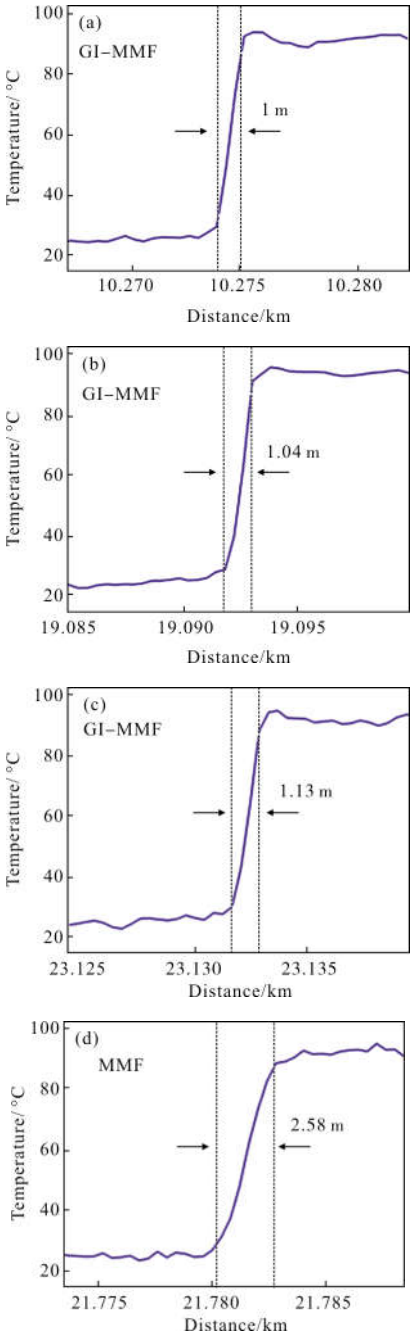
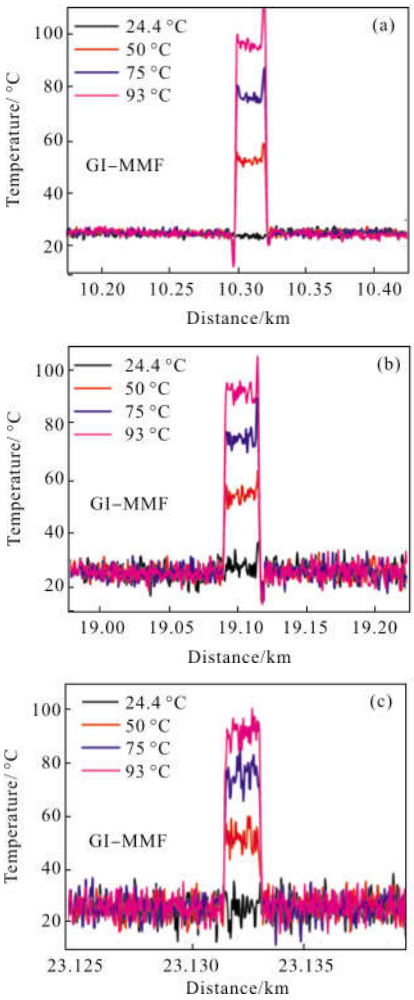


图 5 满注入条件下使用拉制的小芯径多模光纤的温度传感器在距离为(a) 10 km、(b) 19 km 和(c) 23 km 处的空间分辨率，以及 (d) 使用标准多模光纤的温度传感器在 22 km 处的空间分辨率

Fig.5 Spatial resolution of the RDTS based on the fabricated GI-MMF under the overfilled launch condition at (a) 10 km, (b) 19 km and (c) 23 km, and the spatial resolution of the RDTS based on (d) MMF at around 22 km

率。从图中可见，基于小芯径多模光纤的分布式拉曼温度传感器的空间分辨率在 19 km 处和 23 km 处分别降至 1.04 m 和 1.13 m。作为对比，笔者测量了基于标准多模光纤的分布式拉曼温度传感器的远端空间分辨率，如图 5(d)所示。在此情况下，由于更大的模间色散影响，在 22 km 处，空间分辨率降低至 2.58 m。

为实现更高的空间分辨率和更长的测量距离，利用准单模注入技术，构建了基于小芯径多模光纤的拉曼分布式温度传感器。在实验中，传感段光纤设置与图 4 所示相同。传感段光纤的温度曲线如图 6(a)~(c)所示。在准单模注入条件下，在 25 km 范围内使用小芯径多模光纤的测温精度为±2.0 ℃，测温准确度为 1.8 ℃，使用标准多模光纤的测温精度为±3.0 ℃，测温准确度为 2.2 ℃。利用设计的小芯径多模光纤和单模光纤所达到的温度分辨率曲线如图 6(d)所示。在 25 km 距离处，利用小芯径多模光纤达到了 4.7 ℃的温度分辨率，相较于单模光纤有 2.2 ℃的提升。除此之外，如图 6(e)~(f)所示，在准单模注入条件下，基于小芯径多模光纤和单模光纤所达到的空间



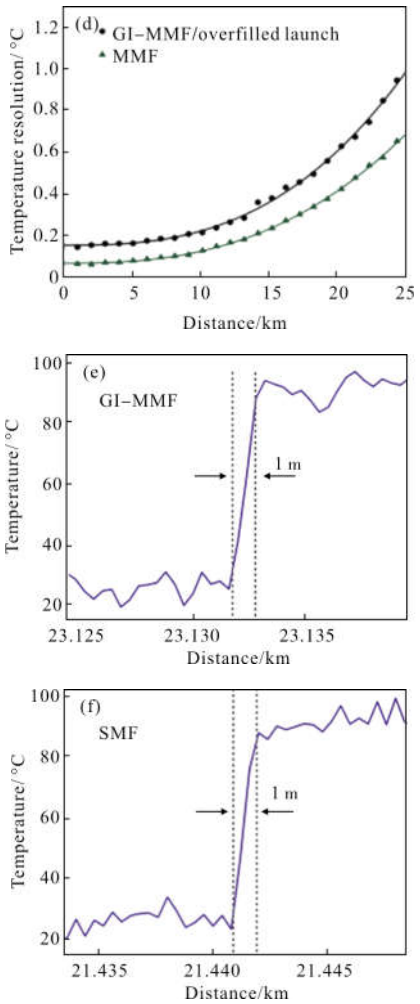


图 6 使用拉制的小芯径多模光纤在准单模注入条件下在距离为 (a) 10 km,(b) 19 km 和(c) 23 km 处分别测量得到的温度曲线,(d)使用小芯径多模光纤和单模光纤得到的温度分辨率曲线,以及使用(e)小芯径多模光纤和(f)单模光纤的拉曼分布式温度传感器的远端空间分辨率

Fig.6 Temperature profiles of the fabricated GI-MMF under the quasi-single mode launch condition at (a) 10 km, (b) 19 km, and (c) 23 km, and (d) temperature resolution profiles of the GI-FMF and SMF. The far-end spatial resolution of the RDTS based on (e) GI-MMF and (f) SMF

分辨率没有劣化。作为总结,利用 10 ns 宽度的探测脉冲, 基于不同光纤和不同工作模式下实现的拉曼分布式温度传感器所能达到的温度分辨率和空间分辨率如表 2 所示。结果表明,在满注入工作模式下,采用所设计的小芯径多模光纤能提供足以和多模光纤相比的温度分辨率, 同时其模间色散导致的空间分辨率劣化可以忽略。

表 2 使用不同光纤和不同注入条件的拉曼分布式温度传感器的空间分辨率和温度分辨率

Tab.2 Spatial and temperature resolution of the RDTS using different fibers and operation conditions

Fiber type	Launch condition	Spatial resolution/m	Temperature resolution/℃	Fiber length/km
Designed fiber	Quasi-single mode	1	4.7	25
	Overfilled	~1.13	1.0	25
MMF	Multimode	~2.58	0.7	25
SMF	Single mode	1	6.9	25

3 结 论

笔者提出了一个基于特殊设计的小芯径多模光纤的拉曼分布式温度传感器,其可以在长测量距离内同时实现高空间分辨率和温度分辨率。所使用的小芯径多模光纤通过优化设计与拉制,获得了大有效模场面积和小的模间色散。在实验中,构建了一个可商用化的拉曼分布式温度传感器系统,在 10 ns 探测脉冲宽度下, 对比了不同传感光纤和不同工作模式下系统的空间分辨率和温度分辨率。使用标准多模光纤时,25 km 距离处空间分辨率下降至 2.58 m, 温度分辨率为 0.7 ℃。利用设计的小芯径多模光纤与满注入条件,在相同距离处,实现了 1 ℃的温度分辨率和 1.13 m 的空间分辨率。除此之外,所设计的小芯径多模光纤与现有的基于单模光纤和多模光纤的拉曼分布式温度传感器具有良好的兼容性。

参考文献:

[1] Shang Ying, Wang Chen, Liu Xiaohui, et al. Optical distributed acoustic sensing based on the phase optical time-domain reflectometry [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(3): 0321003.

[2] Gu Hongcan, Huang Junbin, Cheng Ling, et al. 20-1 250 Hz fiber laser acceleration sensing system [J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10(4): 469-476. (in Chinese)

[3] Gao Xiaodan, Peng Jiankun, Lv Dajuan. Optical fiber temperature sensor based on Fabry-Perot coating

interference [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(1): 0122002. (in Chinese)

[4] Shen Tao, Sun Binchao, Feng Yue. Mach-Zehneder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2018, 26(6): 1338-1345. (in Chinese)

[5] Zhong Zhicheng, Zhao Bin, Lin Jun, et al. Three dimensional in-situ stress sensor based on optical fiber sensing technology [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2018, 26(2): 325-335. (in Chinese)

[6] Li Qiushun, Cai Lei, Ma Yaohong, et al. Research progress of biosensors based on long period fiber grating[J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11(3): 475-502. (in Chinese)

[7] Nature Publishing Group. Technology focus: optical-fiber sensors[J]. ***Nature Photonics***, 2008, 2(3): 143-158.

[8] Hartog A H, Leach A P. Distributed temperature sensing in solid-core fibres [J]. ***Electronics Letters***, 1985, 21 (23): 1061-1062.

[9] Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W, et al. Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector [J]. ***Electronics Letters***, 1985, 21(13): 569-570.

[10] Signorini A, Faralli S, Soto M A, et al. 40 km long-range raman-based distributed temperature sensor with meter-scale spatial resolution [C]//Optical Fiber Communication, IEEE, 2010:1-3.

[11] Wang M, Wu H, Tang M, et al. Few-mode fiber based Raman distributed temperature sensing [J]. ***Optics Express***, 2017, 25(5): 4907-4916.