

引用本文:张泽霖,秦钰,周慧,等.面向通感一体系统的耐弯三芯光纤[J].光通信技术,2023,48(1):80-84.

面向通感一体系统的耐弯三芯光纤

张泽霖^{1,2},秦钰^{1,2},周慧¹,许维维¹,蒋新力³,马麟⁴,沈一春^{1*},肖力敏²

(1.中天科技精密材料有限公司,江苏南通 226009;2.复旦大学信息科学与工程学院,上海 200433;

3.中天科技集团有限公司,江苏南通 226463;4.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:为了同时兼顾狭小空间下的光纤数据通信与环境感知,设计并制备了一种面向通感一体系统的耐弯三芯光纤。该光纤采用三角形纤芯排布和深掺氟折射率沟道结构,标准外径为 125 μm ,优化了 O 波段(1 260~1 360 nm)的传输特性,具有与 G.657.A1 光纤相似的布里渊增益谱(BGS)分布。测试结果表明:在 1 310 nm 波长处,芯层的平均损耗为 0.58 dB/km,平均芯间串扰低于 -50 dB/km;当最小弯曲半径 $R=10$ mm 且缠绕 50 圈时,光纤的弯曲损耗低于 0.1 dB。

关键词:三芯光纤;弯曲损耗;受激布里渊散射;快速测量;数据通信

中图分类号:TN914;TN252 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)01-0080-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Bending-resistant three-core optical fiber used for communication and sensing integrated system

ZHANG Zelin^{1,2}, QIN Yu^{1,2}, ZHOU Hui¹,

XU Weiwei¹, JIANG Xinli³, MA Lin⁴, SHEN Yichun^{1*}, XIAO Limin²

(1. Zhongtian Technology Advanced Materials Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226009, China;

2. School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

3. Zhongtian Technology Group Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226463, China;

4. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to take into account both optical fiber data communication and environment perception in a narrow space, a flexural three-core optical fiber is designed and prepared for the integrated system. The fiber has a triangular core arrangement and a deeply fluorine-doped refractive index channel structure with a standard outer diameter of 125 μm . The transmission characteristics of the O-band (1 260~1 360 nm) are optimized, and the Brillouin gain spectrum(BGS) distribution is similar to that of the G.657.A1 optical fiber. The test results show that the average loss of the core layer is 0.58 dB/km at 1 310 nm wavelength, and the average intercore crosstalk is lower than -50 dB/km. When the minimum bending radius $R=10$ mm and winding 50 times, the bending loss of the optical fiber is less than 0.1 dB.

Key words: three-core optical fiber, bending loss, stimulated Brillouin scattering, fast measurement, data communication

0 引言

近年来,云计算、高清视频等数据流量业务迅速发展,由于传统的单芯单模光纤的传输容量受限于非

线性香农极限,预计在未来数年内,光网络容量将面临极大的扩展难题^[1]。基于多芯光纤的空分复用技术通过增加空间复用维度,能够将多根纤芯富集在同一光纤包层内,有效提高光纤密度和传输容量,因此是缓解单模通信光纤容量危机的有效途径^[2]。此外,凭借多芯光纤独特的结构特性,其在光纤传感应用领域的技术优势也逐渐被人们所认识。例如,通过在多芯光纤内选择部分纤芯或全部纤芯进行光栅刻写,可以实现点式传感,用于测量形状曲率、温度等物理量^[3];或者将相位敏感型光时域反射计(Φ -OTDR)、喇曼光时

收稿日期:2023-06-16。

作者简介:张泽霖(1993—),男,汉族,山东淄博人,博士后,主要研究方向是特种光纤制造、光纤通信、光纤激光及传感关键技术,主持和参与市级、省部级项目 5 项,荣获学会、市级学术成果奖励 3 项。

* **通信作者:**沈一春(1979—),男,博士,正高级工程师,主要从事光纤通信、光纤制造、企业管理等工作。



域反射计(ROTDR)等多种传感方式集合于同一多芯光纤的不同纤芯,可以实现温度、振动、应变等多物理参量的分布式传感^[4]。

光纤通信系统与传感系统在设备器件及传输介质上具有高度的共性和兼容性,因此基于多芯光纤的通信感知一体化系统已成为近期的研究热点^[5-6]。近年来,大多数通感一体系统采用七芯及以上的大芯数光纤,这种光纤与现有设备的兼容性较低。此外,在复杂狭小的传输环境下,较小的弯曲半径极易引起明显的弯曲损耗及信道串扰,降低了通信及传感系统的信噪比^[1,6]。针对多参量同时传感的场景,现有的分布式通感一体系统大多采用单一传感机制与特定纤芯进行匹配^[3],这种方式的空间信道利用率较低,系统复杂度较高。

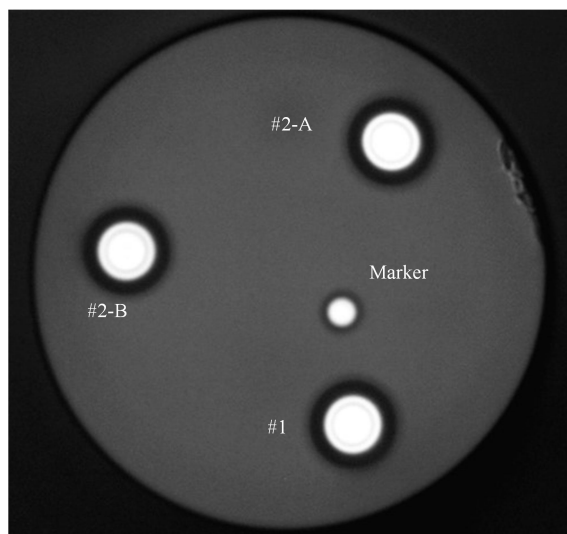
基于此,本文设计并制备一种面向通感一体系统的耐弯三芯光纤,用于数据传输和传感多参量测量。

1 光纤设计与制备

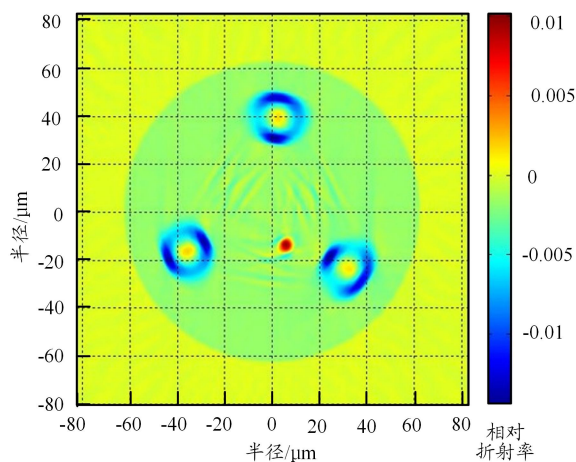
本文设计的光纤采用三角形纤芯排布和深掺氟折射率沟道结构,标准外径为 125 μm 。此外,该光纤优化了 O 波段(1 260~1 360 nm)的传输特性,具有与 G.657.A1 光纤相似的布里渊增益谱(BGS)分布^[7-8],可以在同一光纤内实现数据通信与分布式多参量传感的融合。这种设计保证了每根纤芯具有优异的耐弯特性、较低的光纤色散,并且在 O 波段能够满足单模光纤传输的要求。其中,较深的沟道能够有效抑制芯间串扰,避免因光纤弯曲而引起的串扰激增。通过优化单芯芯层折射率关键参数,本文设计的耐弯三芯光纤在 1 310 nm 波长处的模场直径为 8.4 μm ,光纤的截止波长、零色散波长分别在 1 080、1 280 nm 附近。

为了制备多芯光纤,并确保光纤具有高尺寸精度,以降低对扇入扇出(FIFO)器件的制备难度,本文采用高纯二氧化硅母材打孔、匹配芯棒插入在线拉丝的工艺制备多芯光纤^[9],并采用管内沉积工艺制备芯棒。为了匹配打孔尺寸,对芯棒进行多次精准延伸、腐蚀以减少芯棒与石英母体间隙,降低拉丝芯层不圆度。具体制备过程如下:首先,使用轴向气相沉积工艺制备得到高纯二氧化硅母棒,经过延伸、切割和退火处理后,得到匹配打孔规格的预制棒母材;其次,在数控立式钻床上进行高精度定位打孔,打孔位置精度控制在 ± 0.1 mm;接着,在石墨炉内进行进一步退火处理,以充分释放棒体内部应力;然后,当多芯光纤预制棒组装完毕后,在抽负压条件下,采用多参量精细控制

的在线拉丝工艺拉制耐弯三芯光纤;最后,经过 2 次丙烯酸酯基聚合物涂敷和固化处理后,得到涂敷外径为 245 μm 、裸纤外径为 125 μm 的耐弯三芯光纤。拉制光纤的光纤剖面及二维折射率分布测试结果如图 1 所示。图中的 #1、#2-A、#2-B 为光纤的三芯,Marker 为标记棒。可以看出,经过光纤拉丝后,耐弯三芯光纤的包层折射率分布均匀,3 个纤芯的芯层折射率未发生畸变,与光纤预先设计保持一致。因此,本文设计与制备的耐弯三芯光纤具有折射率一致性。



(a) 光学显微镜端面结构



(b) 二维折射率分布

图 1 拉制光纤的光纤剖面及二维折射率分布测试结果

2 光纤特性测试结果

2.1 光纤芯层损耗和芯间串扰测试

本文选用 1 根 22.45 km 长的耐弯三芯光纤作为测试样品,分别采用光时域反射计(OTDR)测试方法、光纤截断法对任意纤芯的芯层损耗进行测试,2 种测

张泽霖,秦钰,周慧,等:面向通感一体系统的耐弯耐弯三芯光纤

试方法的芯层损耗测试结果如表 1 所示。可以看出,当波长为 1 310 nm 时,2 种测试方法的平均损耗相同,均为 0.58 dB/km;当波长为 1 550 nm 时,采用 OTDR 测试方法测得的平均损耗比采用光纤截断法略低。此外,本文的纤芯折射率被设计为与 O 波段传输相匹配,因此在 C 波段(1 530~1 565 nm),纤芯模场面积会更大。由于模场面积的增大,光更容易溢出纤芯,导致衰减增大。因此,当波长为 1 550 nm 时耐弯三芯光纤的芯层损耗比波长为 1 310 nm 时的大,其中更接近 Marker 的 #1 纤芯损耗最大。

表 1 耐弯三芯光纤芯层损耗测试值

测试方法	波长/nm	芯层损耗/(dB/km)			平均损耗/(dB/km)
		#1	#2-A	#2-B	
OTDR 测试方法	1 310	0.57	0.58	0.59	0.58
	1 550	2.55	1.43	1.91	1.96
光纤截断法	1 310	0.56	0.57	0.61	0.58
	1 550	2.48	1.79	1.99	2.09

为了降低芯层损耗,可以通过优化工艺,如降低打孔内壁粗糙度、减小延伸芯棒外径波动等,从而将芯层的衰减降低至 0.38~0.41 dB/km(波长为 1 310 nm 时)。

本文采用 OTDR 对耐弯三芯光纤的芯间串扰进行了测试,测得的平均芯间串扰为-50 dB/km 以下。这种较低的芯间串扰主要源于光纤的大芯层间距和深掺氟折射率沟道的合理设计^[1]。

2.2 耐弯三芯光纤的弯曲损耗测试

首先,本文采用单套管拉丝工艺制备了 9 μm/125 μm 尺寸规格的单芯光纤,并对其弯曲损耗进行了测试,结果如表 2 所示。可以看出,当波长为 1 310 nm,弯曲半径 R=10 mm 且缠绕 50 圈时光纤的弯曲损耗低于 0.1 dB。然后,对耐弯三芯光纤在相同的弯曲半径下进行了弯曲损耗测试,测试结果如表 3、表 4 所示。可以看出,当波长为 1 310 nm 时,耐弯三芯光纤的耐弯曲特性较好,3 根纤芯的弯曲损耗与单芯光纤保持一致,均低于 0.1 dB;当波长为 1 550 nm 波长时,弯曲半径 R=10 mm 时的弯曲损耗偏大,而 R=20、30、80 mm 时的

表 2 单芯光纤弯曲损耗测试值

波长/nm	缠绕 50 圈时光纤的弯曲损耗/dB			
	R=80 mm	R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
1 310	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1 550	<0.1	<0.1	<0.1	1.14

表 3 耐弯三芯光纤在 1 310 nm 波长处的弯曲损耗测试值

纤芯	缠绕 50 圈时的弯曲损耗/dB			
	R=80 mm	R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
#1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
#2-A	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
#2-B	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

表 4 耐弯三芯光纤在 1 550 nm 波长处的弯曲损耗测试值

纤芯	缠绕 50 圈时的弯曲损耗/dB			
	R=80 mm	R=30 mm	R=20 mm	R=10 mm
#1	<0.1	<0.1	<0.1	2.01
#2-A	<0.1	<0.1	<0.1	1.97
#2-B	<0.1	<0.1	<0.1	1.90

弯曲损耗均低于 0.1 dB。由此可见,该耐弯三芯光纤具备优良的抗弯特性,使其在狭小空间环境下可以实现高速数据通信及光传感信号的稳定可靠传输。

3 光纤受激布里渊散射(SBS)特性

本文采用有限元分析方法,从声光耦合波方程出发,对纤芯内 SBS^[8]过程进行数值求解。根据文献[10~11]中的相关公式,并结合纤芯折射率分布及边界条件,计算得出耐弯三芯光纤在 1 310 nm 波长处纤芯基模(LP₀₁)及声学模式 A₁、A₂、A₃ 沿半径方向的模场分布如图 2 所示。可以看出,在波长为 1 310 nm 时纤芯 LP₀₁ 呈现高斯分布。LP₀₁ 模式可激发 3 种角向对称的 A₁、A₂、A₃,这些声模式的振幅均被限制在半径小于 4.7 μm 的纤芯区域内。

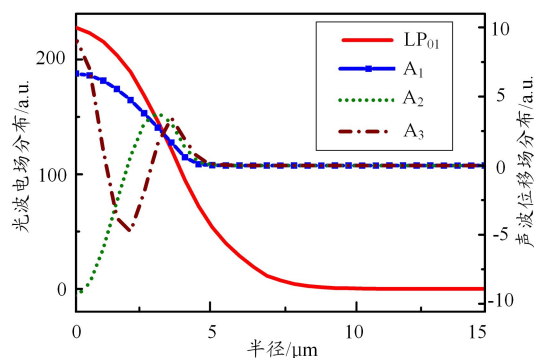


图 2 耐弯三芯光纤在 1 310 nm 波长处纤芯 LP₀₁ 及 A₁、A₂、A₃ 沿半径方向的模场分布

背向散射的低频 Stokes 光在频域上呈现洛伦兹线形分布,对任意声学模式 A_j (j 为纵向声学模式个数)激发的 BGS^[12]增益 $g_B^j(\nu)$ 可表示为

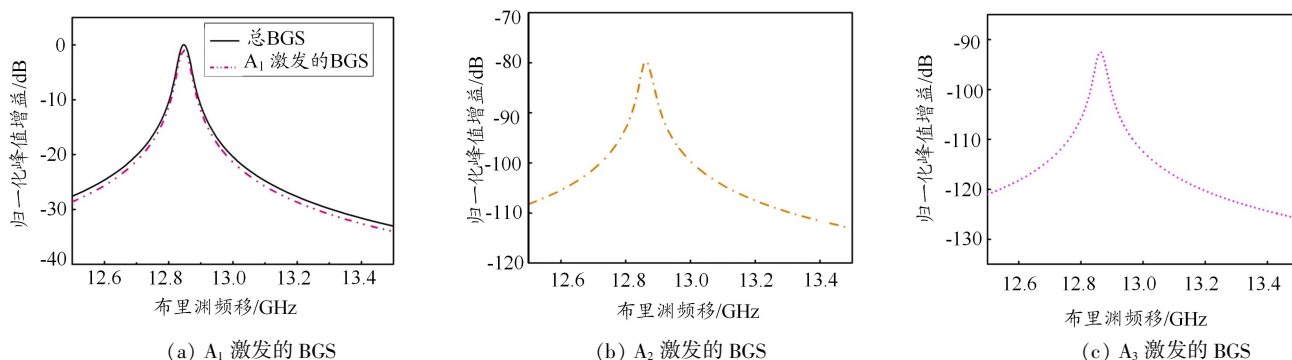


图3 耐弯三芯光纤 BGS 仿真结果及声模场分布

$$g_B^j(\nu) = \frac{g_0(\Gamma_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (1)$$

其中, Γ_B 为布里渊散射峰线宽, $\Gamma_B = \tau^{-1}$, τ 为声子寿命^[10]; g_0 为峰值增益系数, ν 为频率, ν_B 为布里渊散射峰值频率。通过求解式(1), 得出 3 个声学模式激发的归一化 BGS 数值仿真结果如图 3 所示。可以看出, 相较于 A_1 激发的 BGS, A_2 、 A_3 激发的 BGS 峰值增益分别低约 80、93 dB。因此, 纤芯内总 BGS 呈现单峰分布。

将耐弯三芯光纤及 G.657.A1 光纤相关参数代入 SBS 阈值公式^[12-13], 便可求得 2 种光纤的 SBS 阈值。SBS 阈值公式为

$$P_{SBS_th} \cong \frac{21KA_{eff}}{g_0L_{eff}} \quad (2)$$

其中, K 为偏振系数, L_{eff} 为光纤有效长度, A_{eff} 为光模式有效面积。

根据式(2), 可计算出 SBS 阈值随光纤链路传输长度的变化情况如图 4 所示。可以看出, 随着光纤传输链路长度的增加, SBS 阈值逐渐减小; 在 2 km 的光纤传输链路范围内, 该耐弯三芯光纤与 G.657.A1 光纤的 SBS 阈值大致相同。因此, 参照文献[14], 本文也可以

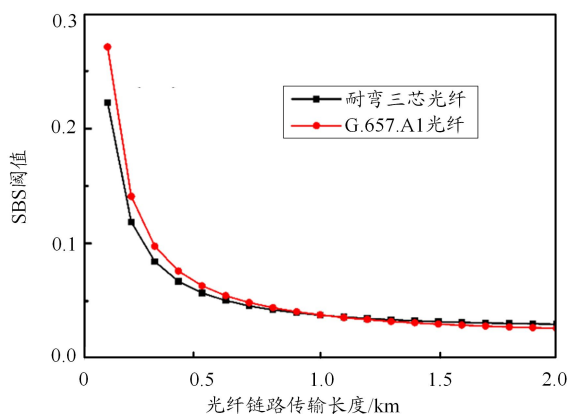


图4 SBS 阈值随光纤链路传输长度变化

采用类似涂敷 G.657.A1 光纤的方法, 使用 BGS 双斜坡技术和聚酰亚胺材料涂敷耐弯三芯光纤, 以增强光纤的电气稳定性和机械耐用性。

4 结束语

本文设计并制备了一种面向通感一体系统的耐弯耐弯三芯光纤, 优化了光纤 O 波的传输特性。采用三角形纤芯排布及深掺氟折射率沟道设计, 有效兼顾了其耐弯曲及低串扰特性。光纤特性测试结果表明: 当波长为 1 550 nm 时, 平均损耗为 0.58 dB/km, 当波长为 1 310 nm 时, 平均损耗为 1.96~2.09 dB/km; 平均芯间串扰低于 -50 dB/km; 当 $R=20, 30, 80$ nm 时, 弯曲损耗均低于 0.1 dB。

若采用这种耐弯三芯光纤作为传感光纤, 其较宽的谱宽可以有效拓展 BGS 斜坡线性区域, 扩大温度或应变测量范围, 有望在狭小空间下同时监测空间形状的曲率、温度、应变等物理参量^[14-15]。另外, 通过合理地调整芯层折射率设计, 可以将该耐弯三芯光纤的传输波段进一步拓展至 S+C+L 波段, 有效增强通感一体多芯光纤针对不同应用场景的兼容性, 用于航空飞行器、变电输电及油气勘探等狭小空间的高速数据通信与多物理量快速感知。

致谢: 本文的有限元仿真相关工作得到了复旦大学的帮助与支持。

参考文献:

- [1] JIANG S, MA L, VELAZQUEZ M N, et al. Design of 125- μ m cladding diameter multicore fibers with high core multiplexing factor for wide-band optical transmission[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 55-61.
- [2] YUAN H, FURDEK M, MUHAMMAD A, et al. Space-division multiplexing in data center networks: on multi-core fiber solutions and crosstalk-suppressed resource allocation [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 272-288.

张泽霖,秦钰,周慧,等:面向通感一体系统的耐弯耐弯三芯光纤

- [3] 苏柏缙,钟立熙,许鸥,等. 多芯光纤光栅写入技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 48-65.
- [4] 冯谦, 马天骄, 欧进萍. 多芯光纤安防工程一体化同步感知系统[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(4): 208-217.
- [5] 黄文秀, 伊斯兰·阿什里, 毛渊. 混合传感 - 通信光学系统及方法; CN115485597A[P]. 2022-12-16.
- [6] 闫连山,何海军,邹喜华,等. 一种同频共用光纤通信感知一体化系统;CN115913378A[P]. 2023-04-04.
- [7] 陶宏伟,孙莉萍. 100G QSFP28 CWD4 光发射组件的研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(4): 92-96.
- [8] PENG J, LU Y, ZHANG Z, et al. Distributed temperature and strain measurement based on Brillouin gain spectrum and Brillouin beat spectrum [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(21): 1217-1220.
- [9] 喻煌,曲华昕,彭楚宇,等. 单模 19 芯光纤及其制备[C]// 中国通信学会. 2019 中国信息通信大会论文集(CICC 2019). 北京:中国工信出版集团, 2019: 147-149.
- [10] KOBAYAKOV A, KUMAR S, CHOWDHURY D Q, et al. Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold [J]. Optics Express, 2005, 13(14): 5338-5346.
- [11] 潘宇航. 普通单模与光子晶体光纤的布里渊增益谱特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.
- [12] AGRAWAL G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第 2 版. 贾东方, 余震虹, 译. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [13] ZHANG Z, LU Y, PAN Y, et al. Trench-assisted multimode fiber used in Brillouin optical time domain sensors [J]. Optics Express, 2019, 27 (8): 11396-11405.
- [14] PENG J, LU Y, ZHANG Y, et al. Double-slope assisted Brillouin optical time domain reflectometry with linear regions merging [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(15): 819-822.
- [15] 赵志勇. 空分复用分布式光纤传感技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.