

多芯少模光纤在传感领域的应用

特种产品事业部 刘彤庆 李博睿 童维军

摘要：基于多芯光纤和少模光纤的空分复用技术，一方面可以显著提升光纤通信系统的传输容量；另一方面，由于多芯光纤中不同纤芯、少模光纤中不同空间模式在同一光纤中共同传输时拥有不同的空间分布，这些空分光场特性会对周围环境参数的变化产生不同的响应，在此基础上可利用多芯光纤和少模光纤开展更前沿的传感技术研究。本文介绍了基于多芯光纤和少模光纤的系列传感技术，以及多种新型高性能光纤传感器的研究进展。

关键词：空分复用技术 多芯光纤 少模光纤 高性能光纤传感器

1 引言

基于多芯光纤和少模光纤的空分复用技术，一方面可以显著提升光纤通信系统的传输容量；另一方面，由于多芯光纤中不同纤芯、少模光纤中不同空间模式在同一光纤中共同传输时拥有不同的空间分布，这些空分光场特性会对周围环境参数的变化产生不同的响应，在此基础上可利用多芯光纤和少模光纤开展更前沿的传感技术研究。

作为全球光纤光缆行业的领导者，长飞公司一直致力于高性能特种光纤在多个领域的应用。近年来，长飞公司已联合华中科技大学光通信与光网络工程研究团队，联合研究空分复用技术的同时，也开展了基于多芯光纤和少模光纤的系列传感技术研究，并通过对多芯/少模光纤的物理、结构特性的探索，实现了多种新型高性能光纤传感器。

2 基于多芯光纤传感技术研究进展

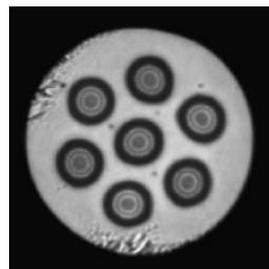


图 1 七芯光纤截面图



图 2 七芯光纤耦合器

凭借联合研发团队研制的高质量多芯光纤（注：光纤在 1550nm 衰减 0.20dB/km 左右，串扰低于 -40dB/100km，见图 1）以及空分复用/解复用器（注：插入损耗 < 1.5dB，串扰 < -45dB，回波反射 < -50dB，见图 2），多种高性能的光纤传感器已经得到实现。

2.1 多芯光纤矢量弯曲传感器

如图 3 所示，在异质型多芯光纤同位置的不同芯上刻制布拉格光栅，由于中间芯与外围芯折射率差异，它们的布拉格系数也不相同。为了同时测量这两种不同的布拉格光栅的反射结果，我们利用一段多模光纤将多芯光纤中纤芯和一个外围芯与普通单模光纤相连接。

测试结果表明，外围芯布拉格光栅的曲率系数是光纤弯曲方向角的正弦。并且由于中间芯与外围芯的系数不同，可以用中间芯来补偿环境的温度变化，最终不仅实现了曲率的测量，也实现

了光纤弯曲方向的测量，如图 4 所示。

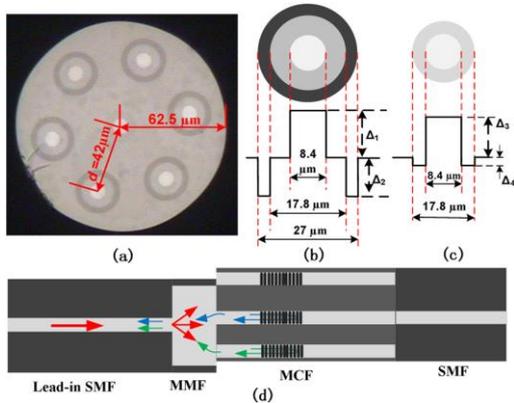


图 3 (a) 异质性七芯光纤截面图 (b) 外围芯 (c) 中间芯 (d) 传感器结构

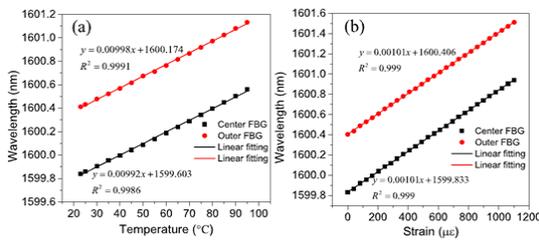


图 4 (a) 温度系数测量结果 (b) 应力系数测量结果

2.2 多芯光纤高温传感器

如图 5 所示，通过对多芯光纤和单模光纤进行拉锥，并在多芯光纤末端进行电弧放电形成一个反射面，实现线内的迈克尔逊干涉结构。从单模光纤进入的光信号先在拉锥区域耦合进多芯光纤中的外围芯，然后通过末端反射，重新在拉锥区域形成干涉。

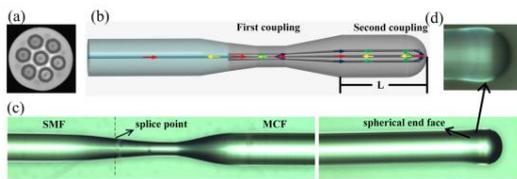


图 5 (a) 多芯光纤截面 (b) 光纤示意结构 (c) 显微镜下光纤照片 (d) 显微镜下末端反射面

由于多芯光纤中的空分复用和多径干涉结构，大大增强了该迈克尔逊干涉仪的温度响应系数，最终实现了 $165 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度，远高于普通的迈克尔逊干涉仪。同时实现了 900°C 以上的高温测量，如图 6 所示

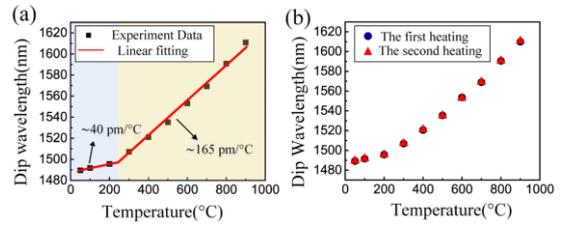


图 6 (a) 温度系数测量结果 (b) 两次测量结果比较

2.3 多芯光纤多参量传感器

如图 7(a) 所示，通过对异质型多芯光纤进行电弧放电拉锥处理，在拉锥处增强了纤芯之间的耦合，两个拉锥点以及中间的多芯光纤构造成了一个线内的马赫泽德干涉仪结构。由于异质型多芯光纤各个纤芯材料不同，它们的折射率变化对外界环境的响应也不同，因此各个芯的干涉系数也不相同。利用我们的低损耗复用/解复用器，最终实现了中间芯温度系数 $47.37 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、应力系数 $1.10 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，外围芯温度系数 $53.20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、应力系数 $0.84 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，如图 7(b) (c) 所示。最终，实现了利用一根多芯光纤对温度和应力进行同时测量，测量误差小于 5%。

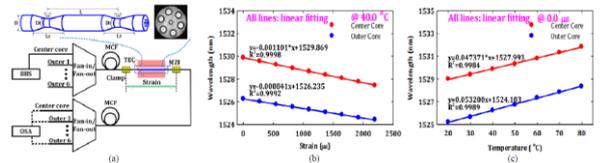


图 7 (a) 多芯光纤多参数测量实验装置 (b) 应力系数测量结果 (c) 温度系数测量结果

2.4 多芯光纤三维形变分布式测量技术

通过对异质型多芯光纤的布里渊频移的研究，研发团队发现当多芯光纤缠绕在直径 15 cm 的光纤盘上时，外围芯的布里渊频移会发生明显的变化，如图 8(a) 所示，而中间芯则无变化。通过进一步研究，发现外围芯的布里渊频移与光纤弯曲有明显的关系，并进行了定标得到了曲率系数： $2.0576 \pm 0.02132 \text{ MHz}/\text{m}^{-1}$ 。通过该技术，光纤分布式曲率和形变的测量得到了实现。

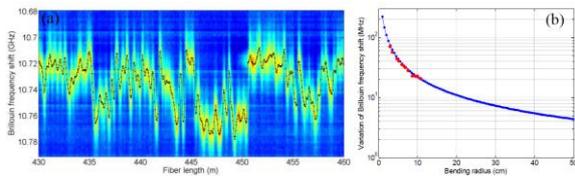


图 8 (a) 外围芯布里渊增益谱 (b) 外围芯弯曲半径与布里渊频移关系

3 基于少模光纤的分布式弯曲传感技术研究进展

少模光纤是一种单芯光纤，与普通单模光纤相比拥有较大的模场面积，允许少量的光纤模式在光纤中共同传输。通过中心对准熔融拉锥，将少模光纤与单模器件相连接，并且保证只激励起少模光纤中的基模。通过（如图 9 所示）布里渊时域分析仪对少模光纤的弯曲布里渊系数进行测量，结果表明少模光纤的弯曲布里渊频移比单模光纤要灵敏得多，最终测得少模光纤的弯曲布里渊频移系数为 $11.49\text{MHz}\cdot\text{cm}^2$ ，如图 10 所示。

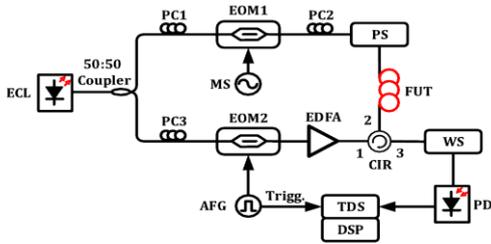


图 9 基于少模光纤的分布式曲率测量装置

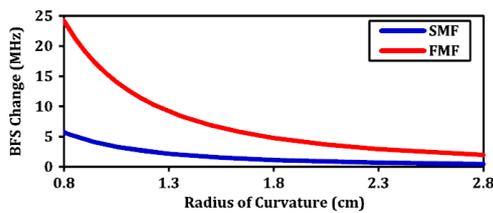


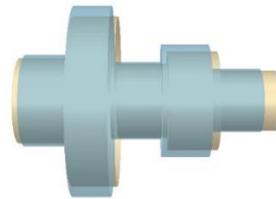
图 10 单模光纤和少模光纤弯曲布里渊频移响应结果

利用该成果实现了基于少模光纤的三维形貌

测量。将少模光纤均匀绕至在如图 11 (a) 所示的泡沫模型上，通过对该段光纤的布里渊频移测量，得到了该段光纤的弯曲半径以及不同弯曲半径情况下的光纤长度。最终恢复出了所测物体的三维形貌，如图 11 (b) 所示，蓝色为真实物体，金色为测量恢复结果。



(a)



(b)

图 11 (a) 待测物体 (b) 三维形貌测量结果

展望未来，多芯光纤和少模光纤将在弯曲、高温传感、多参量传感和三维形变分布式传感等技术应用中发挥越来越重要和独特的作用，也将不断突破单多模光纤或常规光纤传感器在传感应用中的瓶颈，拓宽特种光纤在传感应用领域的崭新维度。

长飞光纤光缆股份有限公司

Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company

地址：武汉市光谷大道9号（430073）

ADD: No.9 Optics Valley Avenue, Wuhan, Hubei, China(P.C.: 430073)

电话(Tel): +86 400-991-6698

邮箱(Email): marketing@yofc.com

www.yofc.com