

激光与光电子学进展

融锥多芯光纤弯曲传感器

朱晓亮^{1,2,3*}, 虞瑶¹, 张晓东⁴, 陈吟啸¹, 项飞², 潘寒洁¹, 宋鑫本¹, 毕晓彬¹¹浙江工商大学信息与电子工程学院(萨塞克斯人工智能学院), 浙江 杭州 310018;²富通集团有限公司, 浙江 杭州 311400;³浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310058;⁴杭州科技职业技术学院机电学院, 浙江 杭州 311402

摘要 利用光纤熔拉锥技术,对一种中心对称、具有较大芯间距的多芯光纤进行了优化。融锥后的光纤具有倏逝场强、传感灵敏度高的特点,但由于其柔性差难于用作弯曲传感测量。本文设计了一种柔性传感器,使优化后的融锥光纤可用于弯曲传感测量。利用超模耦合理论对优化后多芯光纤传感器的透射谱进行了分析,并对其弯曲传感特性进行了实验研究。实验结果表明,该柔性融锥光纤传感器的干涉条纹与弯曲曲率有很好的线性关系。优化后的融锥光纤弯曲传感器的灵敏度为 2.90 nm/m^{-1} 。

关键词 遥感与传感器; 光纤传感器; 多芯光纤; 弯曲传感器; 超模; 柔性结构

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220565

Bending Sensor Based on Tapered Multicore Fiber

Zhu Xiaoliang^{1,2,3*}, Yu Yao¹, Zhang Xiaodong⁴, Chen Yinxiao¹, Xiang Fei², Pan Hanjie¹,
Song Xinben¹, Bi Xiaobin¹¹College of Information and Electronic Engineering (Sussex Artificial Intelligence Institute), Zhejiang
Gongshang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;²Futong Group Co., Ltd., Hangzhou 311400, Zhejiang, China;³College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;⁴College of Mechanical and Electrical, Hangzhou Polytechnic, Hangzhou 311402, Zhejiang, China

Abstract A fiber tapering technique is used to optimize a central symmetry multicore fiber that has a large core spacing. The tapered fiber has the characteristics of a strong evanescent field and high sensing sensitivity; however, it is difficult to use as a bending sensor because of its poor flexibility. This paper proposes a flexible structure design so that the optimized tapered fiber can be used as a bending sensor. The transmission spectrum of the optimized multicore optical fiber sensor is analyzed using supermode coupling theory. In addition, the bending sensing characteristics of the sensor are experimentally studied. The experimental results indicate that there is a good linear relationship between the interference fringes and bending curvature. The sensitivity of the optimized tapered fiber sensor is 2.90 nm/m^{-1} .

Key words remote sensing and sensors; optical fiber sensor; multicore optical fiber; bending sensor; super mode; flexible structure

1 引言

传统单模光纤(SMF)是由外包层包裹的中央纤芯构成,而多芯光纤(MCF)是在同一包层中有多个纤芯的一种新型光纤。由于多芯光纤的芯间距是固定的,因此基于MCF的传感器其干涉谱精度要高于基于

SMF制作的传感臂分离型传感器。MCF以其体积小、成本低、灵敏度高优点吸引了众多研究人员的兴趣,近年来利用MCF进行气体或液体的折射率、温度和弯曲等测量的文献不断出现。例如利用MCF制作的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)具有易于连接^[1-2]、结构紧凑的优点。

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-06; 录用日期: 2022-02-16; 网络首发日期: 2022-02-26

基金项目: 浙江省自然科学基金基础公益研究计划(LGG20E040001)、杭州科技职业技术学院课题(HKZYB-2018-1)

通信作者: *zhuxiaoliang@zjgsu.edu.cn

然而,由于使用 MCF 制作的 MZI 其干涉谱是由 MCF 各纤芯光波耦合形成的,因此干涉程度与 MCF 芯间距密切相关。因此, MCF 弯曲传感器的缺点之一是不能通过改变和优化 MCF 结构以获得更高的灵敏度。

熔融拉锥技术是一种可以改变 MCF 结构和提高灵敏度的有效方法。它能有效地激发锥区的倏逝模。近年来,大量文献对融锥光纤进行了研究,发现融锥光纤具有简单、灵敏度高的优点^[3-4]。但由于融锥后的光纤具有柔韧性差、易断裂的缺点,因此未见融锥光纤用于弯曲传感测量的报道。因此,有必要通过光纤融锥技术对 MCF 结构进行优化,并将其与柔性传感技术相结合,研究融锥光纤用于弯曲、形变传感器的可行性。

本文提出了一种融锥光纤弯曲传感器,对优化后的 MCF 弯曲传感特性进行了研究。实验结果表明,未经优化的 MCF 各纤芯之间无耦合无干涉谱输出,经过优化后的融锥光纤柔性传感器的干涉谱波长移动与弯曲曲率有很好的线性关系,弯曲灵敏度可达 2.90 nm/m^{-1} 。

2 实验装置

MCF 纤芯之间的耦合受其结构限制,即受 MCF 芯间距及纤芯与包层的折射率差值所限制,对于既定的 MCF,纤芯间的耦合光功率及使用其制作的传感器的灵敏度无法进一步改变或提高。应当注意的是,纤芯间距的显著增加将使纤芯彼此完全隔离。在这种情况下,纤芯之间不会发生光耦合。如图 1 中所用 MCF 芯间距 d 较大,当其与 SMF 熔接时,只有中心纤芯被激发,其他纤芯无光信号,其光谱如图 2 所示。对于芯间距 d 较大的 MCF, SMF-MCF-SMF 这样的设计不能用作弯曲传感^[5]。随着 MCF 的熔融拉锥, MCF 纤芯间的间距也逐渐变小,可实现对 MCF 芯间耦合程度的优化,进而可将其芯间干涉谱用于传感。

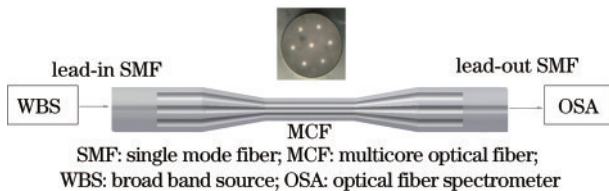


图 1 融锥 MCF 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tapered MCF

实验所用 MCF 纤芯直径为 $8.5 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,芯间距 d 约为 $39 \mu\text{m}$ 。MCF 包层和纤芯折射率分别为 1.457 和 1.463。传感元如图 1 所示,将 SMF 熔接在 MCF 两端, MCF 中央剥去涂覆层,并对 MCF 裸纤部分进行熔融拉锥处理。根据文献^[6]将融锥光纤包埋在低折射率聚合物中,可显著提高融锥光纤的稳定性。将 MCF 融锥后放入铜模具的凹槽中,模具内

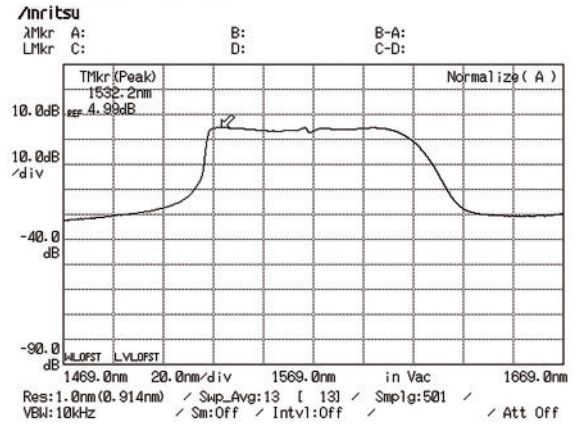


图 2 未融锥光谱图

Fig. 2 Spectrum without tapering

表面光滑,然后将聚二甲基硅氧烷(PDMS)注入凹槽中。将模具整体加热至 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保持 20 min,待模具冷却后脱模,可得 PDMS 封装后的融锥光纤传感元。

PDMS 封装后的融锥光纤具有更好的稳定性,传感装置如图 3 所示,将 SMF 输入端与宽带光源(WBS)连接,输出端 SMF 与光纤光谱仪(OSA)相连接。实验所用曲率塔如图 2 中所示,其不同凹口对应的曲率半径 R 分别为 0.50、0.45、0.40、0.35、0.30、0.25、0.20、0.15、0.10 m,将融锥光纤弯曲传感器置于不同位置固定后可进行弯曲测试。

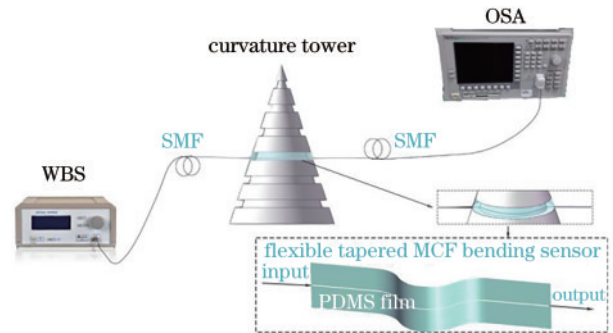


图 3 弯曲传感系统装置图

Fig. 3 Configuration of bending sensing system

3 传感原理与实验分析

如图 3 所示, WBS 发出的光通过 SMF 进入 MCF, 在 MCF 熔锥区由于各纤芯距离足够近,纤芯中的超模被同时激发。由于 MCF 各纤芯制造参数相同,因此忽略各纤芯的几何形状、掺杂浓度、芯间距的细微差异,根据超模线性叠加理论^[7],超模的振幅为

$$E^v(x, y, z) = \left[\sum_m E_m^v E(x, y) \right] \exp(\lambda_v z), \quad (1)$$

式中: $E^v(x, y, z)$ 为第 v 个超模的振幅; $E_m^v(x, y, z)$ 为 E^v 对应的第 m 个本征矢; λ_v 为耦合模方程第 v 个本征值; $E(x, y)$ 为 MCF 各纤芯的横向场分布,与纤芯半径和 MCF 折射率有关。

由式(1)计算 MCF 超模如图 4 所示,各模式用正整数 v 作序号标记, $v=1$ 时为同相超模。

由式(1)可知,超模强度分布仅与 d 有关,而与传输长度 z 无关,如果距离足够近,就会发生超模耦合。然而, MCF 熔融拉锥长度不是越小越好,因为随着熔融拉锥长度的增加, MCF 芯间距减小,芯间耦合增强。

当纤芯直径继续减小到一定程度后,各纤芯可忽略不计,包层变成了新的纤芯,光信号主要在锥区包层中以倏逝场的形式传输,各纤芯光信号损耗极大。因此,融锥区长度存在一个最优值。 MCF 纤芯间的耦合系数取决于各纤芯中模场的重叠程度,根据文献[8]计算得到模场半径 w 与各纤芯半径关系如图 5 所示。

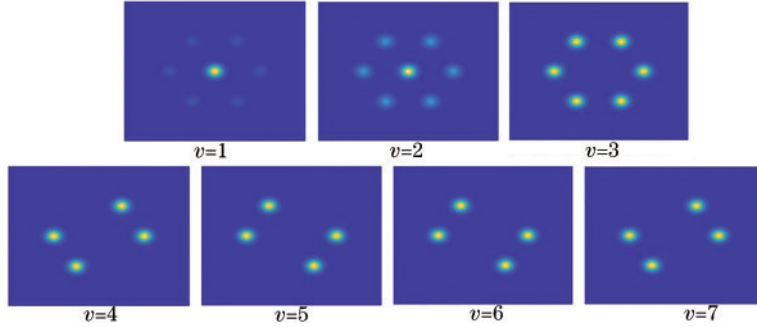


图 4 MCF 中的超模
Fig. 4 Super modes in MCF

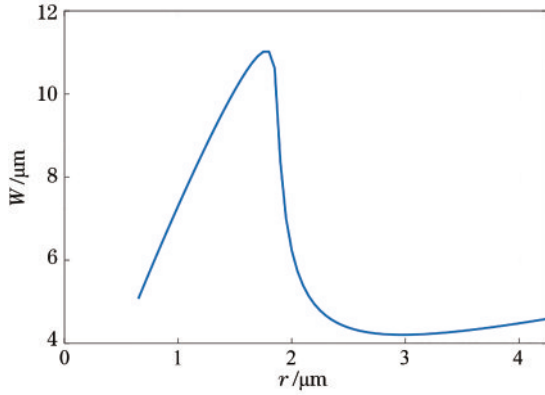


图 5 纤芯半径与模场半径的关系
Fig. 5 Relationship between core-radius and mode field-radius

如图 5 可知,随着纤芯半径的减小,纤芯中模场半径先增加、后减小。当纤芯半径 $r=1.75 \mu\text{m}$ 时,模场半径最大,此时纤芯间模场重叠最大,各纤芯耦合最大。随着拉锥的进行,因为纤芯过小,纤芯无法束缚纤芯导模,模场半径减小,纤芯包层成为一个新的包层。根据文献[9],锥区长度为纤芯半径 r 的函数:

$$r(\Delta z) = r_0 e^{-\Delta z/L_0}, \quad (2)$$

式中: $\Delta z = L/2$ 为融锥区长度的一半; $L_0 = 4 \text{ mm}$ 为火焰宽度; $r_0 = 62.5 \mu\text{m}$ 为 MCF 包层初始半径。将图 5 得到的最佳半径 $r=1.75 \mu\text{m}$ 带入式(2),经计算可得锥区长度 $L=7 \text{ mm}$ 。

各超模间干涉主要发生在第一超模与第二超模之间^[7],计算所得 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $L=7 \text{ mm}$ 对应理论干涉曲线如图 6 中点划线所示。光纤自然状态下, OSA 实验光谱如图 6 中实线所示。由图 6 可见,理论模拟与实验数据匹配较好。自由光谱范围 $\Delta\lambda$ 理论上为 54 nm , 实验中为 60 nm , 理论数据比实验数据略小,这是由于其他次级超模之间也有干涉发生造成的。

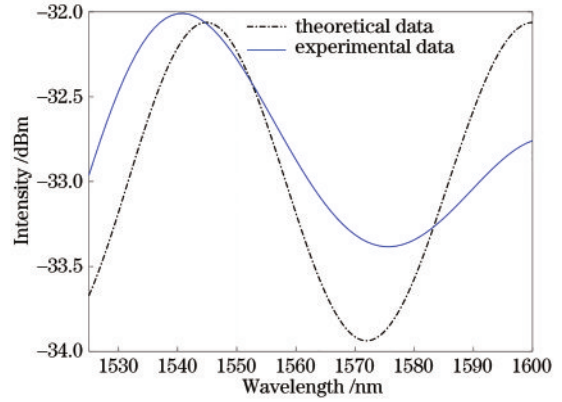


图 6 理论数据与实验数据的透射谱
Fig. 6 Transmission spectra of theoretical and experimental data

对应图 3 实验中不同曲率半径 $R=0.50 \text{ m}$, 0.45 m , 0.40 m , \dots , 0.10 m , 将透射光谱数据对应标记为 1, 2, 3, \dots , 9, 实验所得透射光谱如图 7(a) 所示。 $\rho = 1/R$ 为光纤弯曲曲率, 由图 7(a) 得到不同曲率 ρ 与波谷波长的关系曲线, 如图 7(b) 所示。

由图 7 可知: 1) 该 MCF 柔性传感器用于弯曲传感测量, 其灵敏度为 2.90 nm/m^{-1} 。与文献[7]中 MCF 弯曲传感器灵敏度 2.65 nm/m^{-1} 相比, 传感性能较好; 2) 当曲率增加即曲率半径减小时, 干涉条纹向短波长方向移动, 损耗增加, 振幅减小。根据文献[10], 弯曲光纤的有效折射率 $n_{\text{eq}}(r)$ 分布为

$$n_{\text{eq}}(r) = n(x, y) \exp(r/R), \quad (3)$$

式中: R 为光纤的曲率半径; r 为以光纤中心为圆心时极坐标位置; $n(x, y)$ 为以光纤中心为圆心时直角坐标系中 (x, y) 处对应的介质折射率。

由式(3)可知, 当融锥光纤曲率半径减小时, MCF 有效折射率差值减小, 所以对于同一波谷, 波长 λ_m 将

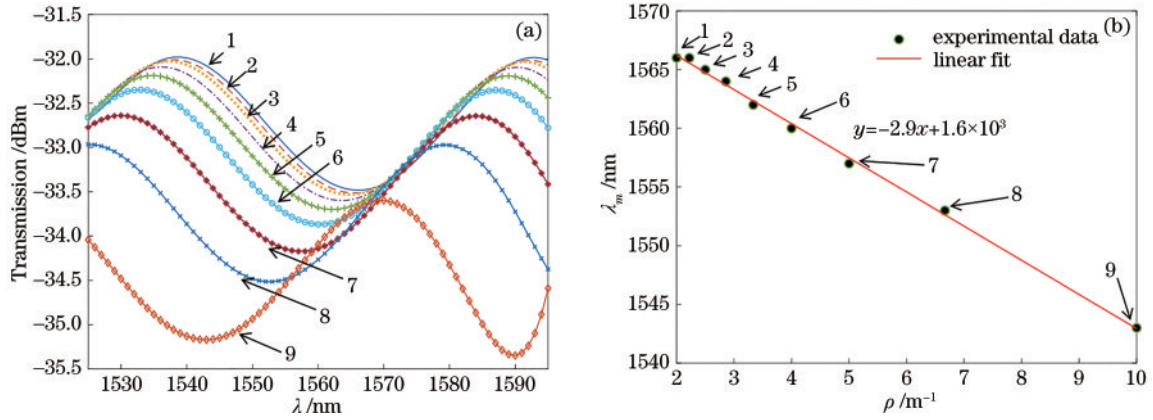


图7 透射谱及其弯曲传感特性。(a)对应不同曲率 ρ 的透射光谱;(b) ρ 和 λ_m 关系曲线

Fig.7 Transmission spectrum and its curvature sensing characteristics. (a) Transmission spectrum according to different ρ ; (b) relationship curve of ρ and λ_m

向短波长移动。融锥光纤弯曲时,面向曲率中心的光纤部分被压缩,另一部分被拉长。这导致了同一横截面处光纤等效折射率不再圆对称分布。不同 R 所对应的干涉谱理论仿真及重复性实验,因涉及 n_{eq} 的复杂计算,将在未来的工作中进行。

需要注意的是,MCF未经熔融拉锥时,输出光谱如图2所示。由图2可知:1)大芯距MCF由于芯间距较远,只有中央纤芯被激发,无法激发超模,因此无芯间耦合现象,其光谱与经SMF输出的WBS光谱相近;2)在0.1~0.5 m范围内改变曲率半径 R ,光谱无明显变化,说明未融锥MCF因无芯间干涉现象故在该范围内对弯曲不敏感;3)由图2与图7对比可知,使用熔融拉锥技术及PDMS封装技术对芯间无耦合的MCF进行结构优化后,可显著提高大芯距MCF的弯曲灵敏度。

此外,对该融锥光纤弯曲传感器进行了温度敏感性研究,发现在20℃~100℃范围内,光谱无明显变化,这是由于PDMS比热容较空气大,降低了温度对融锥区光纤的影响。在100℃~650℃之间测试时,PDMS由于高温失去柔韧性,质脆易断,不适于弯曲传感测量。

4 结 论

MCF纤芯之间的耦合与各纤芯间距离有关,对于芯间距较大的MCF,纤芯间无耦合,因此不能直接用于弯曲曲率的测量。融锥光纤具有倏逝场强、灵敏度高的特点,但由于其柔韧性差、易断裂,因而未见其用于弯曲传感器的报道。本文使用熔融拉锥技术对一种芯间无耦合的MCF结构进行了优化,并设计制作了一种柔性融锥光纤弯曲传感器。利用超模耦合理论对传感器的工作原理进行了分析,与实验所得透射光谱现象相吻合。实验结果表明:融锥光纤弯曲传感器的光谱移动与弯曲曲率有良好的线性关系;经融锥优化后的MCF弯曲灵敏度为2.90 nm/m⁻¹。本文证明利用PDMS封装可增加融锥光纤柔韧性,使融锥光纤可应用于弯曲、形变等传感测量。该研究结果对MCF的设计制作及融锥

光纤用做柔性传感器、可穿戴设备具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Mumtaz F, Dai Y T, Ashraf M A. Inter-cross demodulated refractive index and temperature sensor by an etched multi-core fiber of a MZI structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(24): 6948-6953.
- [2] Zhan X, Liu Y P, Tang M, et al. Few-mode multicore fiber enabled integrated Mach-Zehnder interferometers for temperature and strain discrimination[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15332-15342.
- [3] 闫栋, 陈南光, 田振, 等. 基于多芯光纤超模干涉的温度传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0706007.
Yan D, Chen N G, Tian Z, et al. Temperature sensor based on multicore fiber supermode interference[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0706007.
- [4] Zhang C X, Pang F F, Liu H H, et al. Highly efficient excitation of LP₀₁ mode in ring-core fibers by tapering for optimizing OAM generation[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(2): 020602.
- [5] Goncharenko I A, Marsin'yak M, Konoiko A I, et al. Optimization of the structure of an optical vectorial bend and stress sensor based on a three-core microstructured fiber[J]. Measurement Techniques, 2013, 56(1): 65-71.
- [6] Lorenzi R, Jung Y, Brambilla G. In-line absorption sensor based on coiled optical microfiber[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(17): 173504.
- [7] Zhou Y, Wang Y, Liu H B, et al. High-sensitive bending sensor based on a seven-core fiber[J]. Optics Communications, 2021, 483: 126617.
- [8] Zhu X L, Yuan L B, Liu Z H, et al. Coupling theoretical model between single-core fiber and twin-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(23): 5235-5239.
- [9] Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(4): 432-438.
- [10] Heiblum M, Harris J. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(2): 75-83.