

DOI:10.16136/j.joel.2022.07.0730

基于锥形光纤和球形结构的双参量光纤传感器

陈 宁, 江 超, 刘昌宁*

(湖北师范大学 物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002)

摘要:本文设计了一款球-细芯-球结构的双参量光纤传感器,再通过光纤拉锥,对光纤传感器的折射率和轴向应变特性进行了前后对比,通过实验和理论分析可知,双球结构之间的细芯拉锥后,对传感器的应变和锥部区域的折射率灵敏度影响较大。该实验结构简单,制作方便,易于重复。该结构制作的双参量光纤传感器在拉锥后,锥部区域的折射率灵敏度比拉锥前提高了两倍以上,达到 50.53 nm/RIU,而轴向应变灵敏度也比拉锥前提高了两倍以上,可达到 2.908 pm/ $\mu\epsilon$,实验结果基本符合理论推导。

关键词:锥形光纤;球形结构;细芯光纤;折射率;轴向应变;光纤传感器

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)07-0694-06

Dual-parameter optical fiber sensors based on tapered fibers and spherical structures

CHEN Ning, JIANG Chao, LIU Changning*

(College of Physics and Electronic Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China)

Abstract: A dual-parameter optical fiber sensor with a ball-fine core-ball structure is designed, and then the refractive index and axial strain characteristics of the optical fiber sensor are compared before and after the optical fiber is tapered. Through experimental and theoretical analysis, it is known that, after the fine core between the two-ball structure is drawn, it has a greater impact on the strain of the sensor and the sensitivity of the refractive index in the tapered area. The experimental structure is simple, convenient to manufacture and easy to repeat. After the tapering of the dual-parameter optical fiber sensor fabricated by this structure, the refractive index sensitivity of the tapered area is more than twice that of before the tapering, reaching 50.53 nm/RIU, and the axial strain sensitivity is also twice as high as that before the tapering. At about 2.908 pm/ $\mu\epsilon$, the experimental results are basically in line with the theoretical derivation.

Key words: tapered fiber; spherical structure; thin core fiber; refractive index; axial strain; optical fiber sensors

1 引 言

光纤传感器具有灵敏度高、集成度高、抗电磁干扰性强等独特的优势,它逐渐被应用到工业生产和科学研究中^[1],特别是液体折射率的检测和应变传感特性的研究中。液体折射率是生物化学领域和医学行业的重要参数,常常应用到食品安

全检测、生物医学检测、环境检测中^[2]。应变主要应用于飞机、航天器、汽车和船舶的结构检查^[3]。而不同的结构对于折射率和应变的传感特性影响极大,例如陈耀飞等^[4]基于无芯光纤的 SMS 结构的研究,经实验测得其传感器的折射率灵敏度达到 431.4 nm/RIU,而李德强等^[5]提出的基于细芯光纤(thin core fiber, TCF)和双球结构的干涉型

* E-mail: liusir1001@163.com

收稿日期:2021-10-24 修订日期:2021-12-14

基金项目:2020 年度湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020014)和湖北师范大学研究生创新项目(20220501)资助项目

光纤传感器实验下的折射率灵敏度为 $33.625 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。卞继城等^[6]研究的马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)所测的应变灵敏度分别为 $0.75 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $1.39 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。LIU 等^[7]提出的一种基于单模光纤(single mode fiber, SMF)和多模渐变光纤的 MZI 传感器,其轴向应变响应灵敏度为 $18.6 \text{ pm}/\mu\epsilon$,灵敏度虽然较高,但是其中多模渐变光纤长度为 1.8 m ,极大地增加了传感器的封装难度。还有一些学者对于 S 型锥^[8]、两个花生型结构等^[9]结构进行研究^[10-18]。本文所针对的是基于光纤拉锥对传感器折射率和应变特性的研究,通过实验和理论相互比较,发现双球结构之间的 TCF 在拉锥之后,可以更好地实现光耦合和光传感,传感器锥部区域的折射率和应变灵敏度均有较大的提升,而且拉锥之后线性度更好。

2 传感器设计及工作原理分析

2.1 传感器的设计与制备

球型结构的显微镜图如图 1 所示,它采用标准的 SMF(武汉长飞光纤光缆有限公司生产,纤芯直径为 $9 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$)制作。传感器的制备过程简单,重复性强。仅由两段 SMF 经大型熔接机烧球模式,烧成两个直径为 $300 \mu\text{m}$ 的球,并在两球中间拼接一段 3.4 cm 的 TCF(武汉长飞光纤光缆有限公司生产,纤芯直径为 $3.8 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$)。

1) 取两段 SMF,将每段的任意一端涂覆层剥掉,用丙酮擦拭干净去掉涂覆层的 SMF,后用光纤切割刀切平,再将两根一端切平的 SMF 置于大芯径多功能光纤熔接机(型号为 FSM-100P+,日本藤仓公司制造),采用烧球模式,设置参数分别为烧球的直径为 $300 \mu\text{m}$,调整为 $-20 \mu\text{m}$,旋转速度 $50(^{\circ})/\text{s}$,加热旋转。加热过程中绝对功率 250 bits ,相对功率 50 bits ,中断添加功率 20 bits 。得到实验过程中所需要的双球结构。在显微镜下可以观察到该球的形状,如图 1 所示。

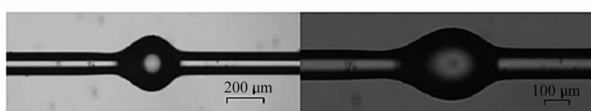


图 1 球型结构的显微镜图

Fig. 1 Micrographs of spherical structure

2) 将第一步中用 SMF 烧好的球形结构和 TCF 进行熔接,熔接好的结构实质是一个 MZI 干涉仪。

其中的双球类似于尺寸较短的多模光纤(multi-mode fiber, MMF),光入射到 SMF 纤芯的基模,在第一个球中激发出高阶模进入 TCF 的包层,在第二个球结构处,包层模被耦合回输出 SMF 的纤芯。

3) 将制作好的球-细芯-球结构再次置于大芯径多功能光纤熔接机中,选择分步拉锥模式。设置参数为拉锥至 $80 \mu\text{m}$,采取分步拉锥方式,第一次将 $125 \mu\text{m}$ 的 TCF 拉成直径为 $100 \mu\text{m}$,第二次将 $100 \mu\text{m}$ 拉成直径为 $80 \mu\text{m}$,放电量先从 120 bits 降到 100 bits ,再逐渐减小到 80 bits 。光纤直径大时,对应更大的放电量;光纤直径较小时,对应更小的放电量。在光纤逐渐变细的同时,如果不逐渐减少放电量,经过实验反复验证,最终将得不到所设定的腰锥直径,图 2 为拉锥前后对比示意图。

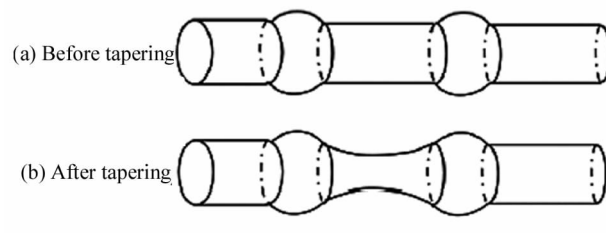


图 2 传感器拉锥前后结构示意图

Fig. 2 Diagram of the structure before and after the sensor tapered

2.2 传感器工作原理

本文是基于球形-细芯-球形结构拉锥之后的干涉型多参量传感器,该传感器是属于 MZI 干涉仪。从图 3 光路图中可知,入射 SMF 中的基模在进入第一个球型结构处发生耦合作用,纤芯中的基模激发出高阶模,一部分光被耦合到 TCF 的包层中传播,一部分光在细芯的纤芯中传播,因折射率不同,两路光会在第二个球型结构处被耦合回出射的 SMF 纤芯,导致相位差不同,最终形成干涉。



图 3 传感器结构光路图

Fig. 3 Light path diagram of sensor structure

根据干涉原理, MZI 干涉后的光强^[9]可以表示为:

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{cladding}} + 2\sqrt{I_{\text{core}} \times I_{\text{cladding}}} \cos\theta, \quad (1)$$

式中, I_{core} 和 I_{cladding} 分别为 TCF 中的纤芯模和包层模

的光强, $\cos\theta$ 中的 θ 为 TCF 中芯模和包层模总相位差。因此可以推导出相位差表达式^[9] 为:

$$\theta = \frac{2\pi L[n_{co}(\lambda) - n_{cl}(\lambda, n_{ex})]}{\lambda} = \frac{2\pi L\Delta n_{eff}}{\lambda}, \quad (2)$$

式中, L 为 TCF 的长度, n_{co} 为纤芯有效折射率, n_{cl} 为包层有效折射率, n_{ex} 是外界折射率, Δn_{eff} 是纤芯与包层有效折射率之差。

$$\lambda_m = \frac{2L\Delta n_{eff}}{2m+1}. \quad (3)$$

当 θ 满足 $\theta = (2m+1)\pi$ 时, 满足 MZI 的干涉条件, 则由式(3)推导出谐振峰的波长。

当传感器测量外界折射率参量时, 不考虑轴向应变的影响, 当外界折射率发生改变时, 主要造成 TCF 的包层有效折射率发生改变, 折射率灵敏度表达式为:

$$S_n = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n} = \frac{2}{2m+1} \left[\Delta n_{eff} \frac{\partial L}{\partial n} + L \left(\frac{\partial n_{eff}^{core}}{\partial n} - \frac{\partial n_{eff}^{cladding}}{\partial n} \right) \right], \quad (4)$$

式中, n 为光纤外部折射率, Δn_{eff} 为 TCF 中纤芯模和包层模之间的有效折射率之差, 且满足 $\Delta n_{eff} = n_{eff}^{core} - n_{eff}^{cladding}$, $\frac{\partial L}{\partial n}$ 表示 TCF 长度随外界折射率的变化量, $\frac{\partial n_{eff}^{core}}{\partial n}$ 和 $\frac{\partial n_{eff}^{cladding}}{\partial n}$ 则分别为 TCF 纤芯有效折射率和包层有效折射率随外界折射率的变化量。

当传感器测量轴向应变时, 由于光纤的弹光效应导致纤芯和包层的有效折射率发生改变, 同时传感器的长度 L 也由于应变而产生变化。因此, 轴向应变灵敏度公式为:

$$S_\epsilon = \frac{\partial \lambda_m}{\partial \epsilon} = \frac{2}{2m+1} \left[\Delta n_{eff} \frac{\partial L}{\partial \epsilon} + L \left(\frac{\partial n_{eff}^{core}}{\partial \epsilon} - \frac{\partial n_{eff}^{cladding}}{\partial \epsilon} \right) \right], \quad (5)$$

式中, ϵ 表示光纤所受的应变, $\frac{\partial L}{\partial \epsilon}$ 为光纤长度受应变的变化量, $\frac{\partial n_{eff}^{core}}{\partial \epsilon}$ 和 $\frac{\partial n_{eff}^{cladding}}{\partial \epsilon}$ 分别表示 TCF 纤芯有效折射率和包层有效折射率受应变影响的变化量。

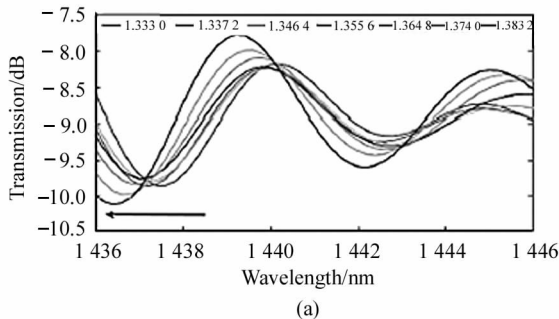


图5 拉锥前后传感器随折射率变化的漂移图:(a) 拉锥前;(b) 拉锥后

3 实验结果和分析

3.1 折射率实验

根据上述方法制备了传感器结构, 该传感器的两个球的直径约 $300 \mu\text{m}$, 两球之间的 TCF 长度为 3.4 cm , 并且根据文献, 分别在常温 25°C 下配置了浓度分别 0% 、 5% 、 10% 、 15% 、 20% 、 25% 、 30% 的蔗糖溶液, 其对应的折射率分别为 1.3330 、 1.3372 、 1.3464 、 1.3556 、 1.3648 、 1.3740 、 1.3832 。折射率实验装置如图4所示, 将结构两端连接上宽带光源 (broad band source, BBS) 和光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA), 所用宽带光源为自发辐射光源, 发光光谱范围为 $1250\text{--}1650 \text{ nm}$, 所用光谱分析仪的型号为 AQ6370D, $1300\text{--}1600 \text{ nm}$ 波段, 精度为 $\pm 0.01 \text{ nm}$, 分辨率为 0.05 , 为日本恒河公司所生产。实验前将入射 SMF 和出射 SMF 用光纤夹持器固定, 使其轴向应力固定, 将传感部分置于水槽中。实验过程中步骤一, 先注入需测量的溶液至完全浸没传感头, 测量记录数据之后, 抽净水槽中的溶液。步骤二, 向水槽中注入蒸馏水清洗水槽, 抽出蒸馏水, 继续注入无水乙醇, 等待 1 min , 使传感头和水槽中的无水乙醇完全挥发, 然后重复步骤一, 直至完成所有折射率测量实验。

由图5透射光谱的漂移图可以看出, 拉锥前后的结构都随折射率的增加, 光谱的波谷发生蓝移, 拉锥之前传感器的灵敏度为 21.13 nm/RIU , 而拉锥之后传感器灵敏度提高了两倍以上, 为 50.53 nm/RIU , 由图6可知, 拉锥前线性度为 0.8818 , 拉锥后

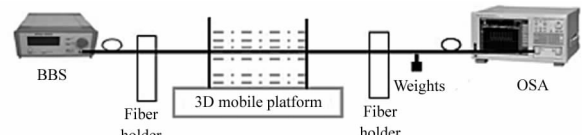


图4 传感器折射率实验装置图

Fig. 4 Diagram of the sensor refractive index experimental device

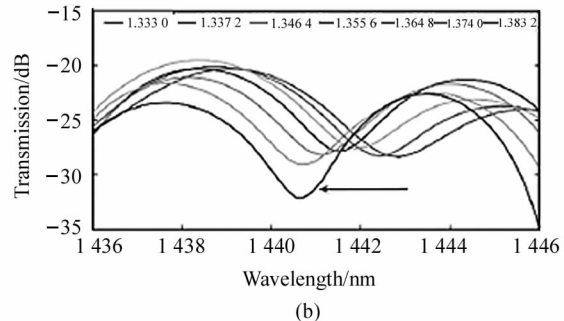


Fig. 5 Drift chart of the sensor changing with the refractive index before and after tapering: (a) Before tapering; (b) After tapering

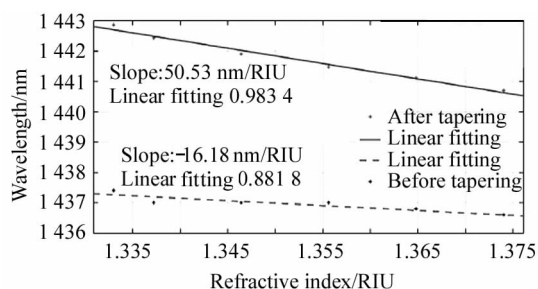


图6 拉锥前后传感器折射率灵敏度拟合图

Fig. 6 Sensor refractive index sensitivity fitting chart before and after tapering

的线性度达到 0.9834,线性度明显提升。

3.2 轴向应变实验

传感器的轴向应变实验装置如图7所示,实验

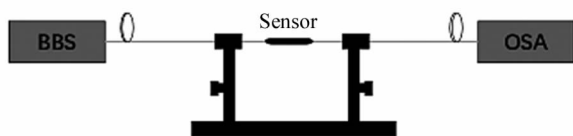


图7 传感器轴向应变实验装置图

Fig. 7 Diagram of the sensor axial strain experimental device

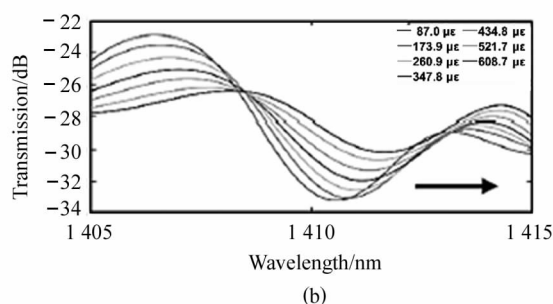
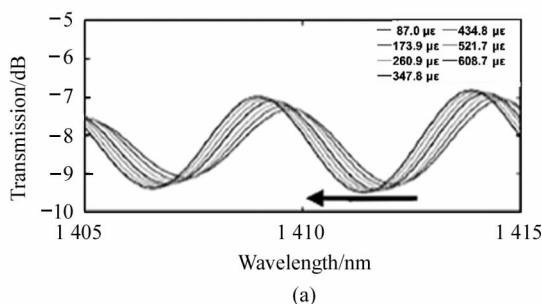


图8 拉锥前后传感器随轴向应变变化的漂移图

Fig. 8 Drift chart of the change of the sensor with axial strain before and after tapering

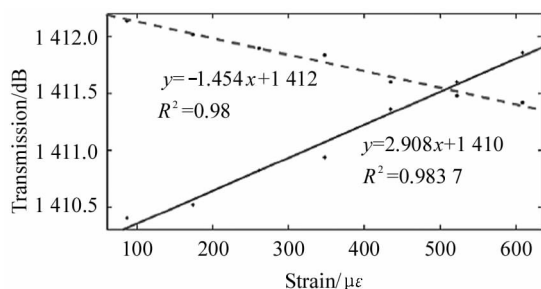


图9 拉锥前后传感器轴向应力灵敏度拟合图

Fig. 9 Sensor axial strain sensitivity fitting chart before and after tapering

3.3 结果讨论

图10为传感器拉锥后的初始光谱图,从光谱中

开始之前将传感器放在精密位移平台中心,用AB胶将光纤两端固定在有千分尺的位移台上,拉紧光纤使之处于绷直状态。

实验过程中固定保持左边的位移台静止,每次移动右边的位移台上的千分尺,产生不同的距离,则轴向应力也不同。轴向应变为 $\epsilon = \Delta d/d$,其中 ϵ 为对传感器的轴向应变变量, d 为用AB胶固定两端内的长度, Δd 为每次移动千分尺的位移累加量。为了测得轴向应变特性发生变化,每次转动右侧位移平台的千分尺,就记录一次光谱数据,图8是轴向应变实验结构透射谱变化情况。其中选取了Dip 1和Dip 2作为对照。

图8为记录传感器拉锥前后随轴向应变变化的透射谱光谱图,由两幅对比图可看出,拉锥后的传感器在同样的轴向应力作用下,光谱漂移程度明显大于拉锥前。由图9轴向应变的拟合图可知,拉锥前后结构灵敏度分别为 $-1.454 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $2.908 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

挑选了Dip 1和Dip 2两点来构成测量矩阵,基于Dip 1和Dip 2分别进行了折射率和应变特性的实验研究,通过波长调制解调法和测量矩阵可以实现对折射率和应变特性的同时测量,消除交叉敏感。图11分别为传感器折射率和轴向应变的灵敏度拟合图。可令Dip 1和Dip 2的中心波长为 λ_1 和 λ_2 ,则当传感器在实验过程中受外界折射率或应力变化时,造成中心波长 λ_1 和 λ_2 的漂移,分别为 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 。 α_1, α_2 分别为谐振峰Dip 1和Dip 2的折射率灵敏度, β_1, β_2 为Dip 1和Dip 2的应变灵敏度, Δn 和 $\Delta\epsilon$ 则为实验中折射率变化量和轴向应力变化量。因此可以写出矩阵公式表达式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}. \quad (6)$$

分别将谐振峰 Dip 1 和 Dip 2 的折射率和应力灵敏度代入矩阵公式。可写出表达式：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -49.26 & 0.002908 \\ -50.53 & 0.003623 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}. \quad (7)$$

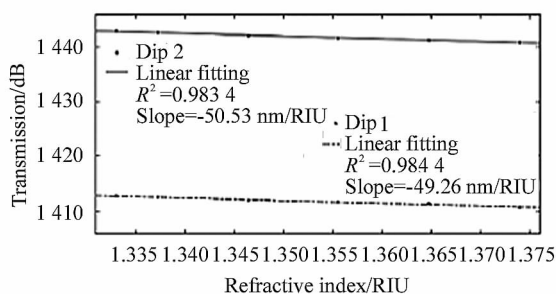


图 11 Dip 1 和 Dip 2 折射率和应变特性对比图

Fig. 11 Comparison diagram of Dip 1 and Dip 2 refractive index and strain characteristics

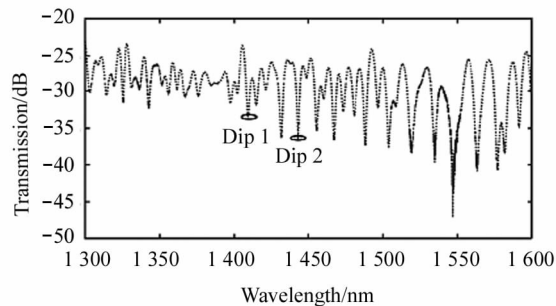
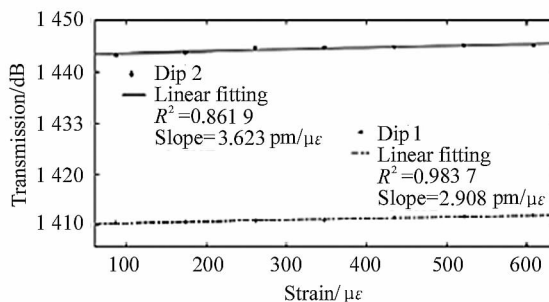


图 10 传感器拉锥后初始光谱图

Fig. 10 Initial spectrogram of sensor after tapering



4 结 论

光在 TCF 中传输时,将导模光场基本束缚在纤芯内部,导模对外界环境敏感度较弱,当双球形结构的中间 TCF 拉锥后,拉锥部分的光纤直径变细,锥部的光纤包层与纤芯的直径均变小,光在其间传播时存在较强的倏逝场,使得传感器透射谱的谐振中心波长对外界环境更为敏感。通过实验发现,传感器在拉锥之后折射率灵敏度提高了两倍以上,可达到 50.53 nm/RIU,线性度有了明显提升;应变灵敏度也提高了大约两倍,可达到 2.908 pm/μ ϵ 。经理论和实验相互印证,该传感器折射率和应力灵敏度均较好,可应用于食品安全、生物医学等方面的检测。

参考文献:

- [1] YANG B Y, NIU Y X, YANG B W, et al. High sensitivity balloon-like refractometric sensor based on singlemode-tapered multimode-singlemode fiber[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2018, 281: 42-47.
- [2] ZHOU M H, DONG X Y, YANG J Y, et al. Thin-core fiber M-Z interferometer sensor for multi-parameter measurement[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(6): 587-592.

周孟晖,董新永,杨菁怡,等.细芯光纤 M-Z 干涉传感器

多参数测量研究[J].光电子·激光,2016,27(6):587-592.

- [3] LIU P, CHEN Q Y. Asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of axial strain and temperature[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(6): 942-953.
 - [4] CHEN Y F, HAN Q, HE Y, et al. Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0905001.
- 陈耀飞,韩群,何洋,等.基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J].中国激光,2013,40(9): 0905001.
- [5] LI D Q, CAO Y, GONG S S, et al. Interferometric fiber sensor based on thin core fiber and double spherical-shape structure[J]. Chinese Journal of Sensors And Actuators[J]. 2018, 31(6): 857-860.
- 李德强,曹晔,宫顺顺,等.基于细芯光纤与双球结构的干涉型光纤传感器[J].传感技术学报. 2018, 31(6): 857-860.
- [6] BIAN J C, LANG T T, YU W J, et al. Study of fiber sensor for the simultaneous of temperature and strain based on Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(11): 2169-2174.
- 卞继城,郎婷婷,俞文杰,等.基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究[J].光电子·激

- 光,2015,26(11):2169-2174.
- [7] LIU Y, LI W. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(13): 2516-2519.
- [8] YU Y S, ZHU Y Q, ZHAO Y, et al. Research progress on S fiber taper[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148009.
- 于永森,朱永钦,赵阳,等. S型光纤锥的研究进展[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148009.
- [9] GONG H P, YANG X, NI K, et al. An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*. , 2014, 26(1): 22-24.
- [10] GENG Y F, LI X J, TAN X L, et al. Compact and ultrasensitive temperature sensor with a fully liquid-filled photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(1): 167-170.
- [11] DONG H Y, SUN S M, JIANG C, et al. Refractive index sensor based on single-mode optical fiber tapering[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(6): 37-40.
- [12] LU P, MEN L Q, SOOLEY K, et al. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(13): 131110.
- [13] FU H Y, ZHANG S W, CHEN H, et al. Graphene enhances the sensitivity of fiber-optic surface plasmon resonance biosensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5478-5482.
- [14] ZHAO Y, Deng Z Q, Hu H F. Fiber-optic SPR sensor for temperature measurement[J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2015, 64(11): 3099-3014.
- [15] ZHAO Y, GAO P, HU H F. Temperature insensitive refractive index sensor based on a combination interference structure[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(7): 697-700.
- [16] ZHAO Y, DENG Z Q, WANG Q. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2014, 192(3): 229-233.
- [17] AN J L, JIN Y X, SUN M M, et al. Relative humidity sensor based on SMS fiber structure with two waist-enlarged tapers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2683-2686.
- [18] LI N, CHEN X D, CHEN X P, et al. Subsecond response of humidity sensor based on graphene oxide quantum dots [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(6): 615-617.

作者简介:

刘昌宁 (1981—),男,博士,硕士生导师,研究方向为飞秒激光微加工和光纤传感技术。