

激光与光电子学进展

基于锥形聚合物波导的高灵敏光纤
温度传感探头

丛爱民, 李敏*, 曹万苍, 梁宇宏, 马文强

赤峰学院物理与智能制造工程学院, 内蒙古 赤峰 024000

摘要 基于简单的蘸取技术和紫外光固化技术集成锥形聚合物波导结构与光纤制备了一种高灵敏光纤温度传感探头。实验结果表明,该结构在低温时的温度灵敏度为 123.6 pm/°C,且其灵敏度随温度的升高呈非线性增加趋势。其中,聚合物波导的结构紧凑,轴向尺寸为 300 μm,径向最小尺寸为 2 μm。基于该波导制备的探头具有较好的温度响应特性、生物相容性且能实现点探测,在生物医疗等领域有着重要的应用前景。

关键词 光纤光学; 传感器; 温度; 紫外光固化; 聚合物

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1906003

Highly Sensitive Optical Fiber Temperature-Sensing Probe Based on
Conical Polymer Waveguide

Cong Aimin, Li Min*, Cao Wancang, Liang Yuhong, Ma Wenqiang

School of Physics and Intelligent Manufacturing Engineering, Chifeng College, Chifeng,
Inner Mongolia 024000, China

Abstract In this paper, a highly sensitive optical fiber temperature-sensing probe is prepared by integrating the conical polymer waveguide with an optical fiber using simple dipping and ultraviolet curing techniques. The experimental results show that the temperature sensitivity of the structure at low temperatures is 123.6 pm/°C, and the sensitivity observes a nonlinear increasing trend with an increase in temperature. Among them, the polymer waveguide has a compact structure, with an axial dimension of 300 μm and a minimum radial dimension of 2 μm. This prepared probe based on the waveguide has good temperature response characteristics and biocompatibility. It can also realize point detection and has significant application prospects in the field of biomedicine.

Key words fiber optics; sensor; temperature; ultraviolet curing; polymer

OCIS codes 060.2370; 120.3180; 050.2230

1 引言

温度是基础科学中最基本的参数之一,生物医学、工业和环境科学等众多领域都对温度参数的高

精度探测和控制有着较高的要求,因此,研制精确测量温度参数的传感器件至关重要。近年来,人们已经研究制备了多种温度传感器件,其中,光纤温度传感器具有成本低、响应快、抗电磁干扰能力强

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-02-05; 录用日期: 2021-02-12

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY19214)、赤峰学院教育教学研究项目(JYXMY202025, JYXMY202022)、赤峰学院应用型示范课程建设项目(SFK20200904)

通信作者: *phdlimin@163.com

以及多路复用的优点,得到了人们的广泛关注^[1-5]。目前用于光纤温度传感的干涉型器件主要包含光纤布拉格光栅型^[6-9]、马赫-曾德尔干涉型^[10-13]、迈克耳孙干涉型^[14-15]和法布里-珀罗(F-P)干涉型^[16-19]器件。其中,F-P干涉仪光纤温度传感器具有结构简单、交叉灵敏度低和对环境温度变化响应灵敏等特点,在相关领域中得到了广泛的应用。F-P干涉仪传感器主要分为两大类,一类是基于空气腔的F-P干涉仪,另一类是基于介质腔的F-P干涉仪。空气腔F-P干涉仪的传感机理主要取决于温度对空气腔长度的调制,而光纤的热膨胀系数约为 $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$,因此,这类传感器只能实现相对较低的温度灵敏度。相比空气腔F-P干涉仪,介质腔F-P干涉仪的温度灵敏度更高,原因是介质腔干涉仪的传感单元通常为具有较高热学系数或热膨胀系数的新型材料^[20-23]。如Zhang等^[19]利用聚合物材料在光纤头部蘸取聚合物薄膜的方式制备了光纤温度传感探头,聚合薄膜在光纤端面形成双光束干涉的F-P谐振腔。聚合材料具有的高热膨胀效应极大提高了该介质腔F-P干涉仪的温度灵敏度,但聚合物薄膜的尺寸与光纤直径相当,不能真正实现温度的点探测。

针对上述问题,本文基于高热光系数和高热膨胀系数的聚合物材料,通过简单的蘸取和紫外光固化技术在光纤端面制备了一个聚合物锥形波导结构,并将锥形波导与光纤集成获得了一个高灵敏的光纤温度传感探针。聚合物探针沿光纤径向的最小尺寸为 $2 \mu\text{m}$,可真正实现环境温度的点探测。该探头的传感机理是基于聚合物波导的热光效应和热膨胀效应,传感器的温度灵敏度与聚合物波导的尺寸成正比,即波导的径向长度越长,其灵敏度就越高,但尺寸过大会降低结构的机械强度,且不利于其在实际生产中的应用。为了兼顾结构对温度灵敏度、机械强度和实际生产需要,设计并在光纤端面集成了一个轴向长度为 $300 \mu\text{m}$,径向最小尺寸为 $2 \mu\text{m}$ 的聚合物波导结构。实验结果表明,该结构在低温时的温度灵敏度为 $123.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,随着温度的升高,其灵敏度呈非线性增加趋势,且该传感探头可真正实现环境温度的点探测。此外,聚合物波导具有的生物相容性使光纤传感探头在生物医学、工业和环境科学等领域有着重要的应用前景。

2 结构的制备和传感原理

光纤端面的锥形聚合波导通过简单的蘸取技术和紫外光固化技术并与光纤集成获得高灵敏的光纤温度传感器。首先,将单模光纤的末端面切平后固定在光纤熔接机上进行清洁放电,以清理掉光纤端面残留的碎屑,并通过熔接机观察光纤端面的平整度,选取倾斜角小于 5° 的光纤备用。然后,在暗室环境下用一次性吸管取出 5 mL 的SU-8光刻胶(GM 1070)。光刻胶的流动性较强,为了在制备结构的过程中保持设计的形状,将取出的光刻胶滴在载玻片上静置 1 h (该过程可使光刻胶中的溶剂挥发,进一步增大光刻胶的粘度,易于控制制备结构的形状,同时尽可能地排除光刻胶中的气泡)。将端面切割平整的光纤固定在精密三维移动升降台上,控制升降台的高度使端面平整的光纤竖直向下移动,并将其浸没在光刻胶内,随后以一定的速度将光纤从光刻胶中均匀向上拉出,在光纤端面获得一个锥形的聚合物结构。此时的光刻胶依然为粘度较高的液体,为了得到稳定的聚合物波导结构,需将该结构置于紫外光源(UVLED, Xp-104)下进行紫外光固化。SU-8光刻胶中的光引发剂对紫外光敏感,经过 15 s 的照射后聚合物会交联为固体,且被牢牢绑定在光纤端面上。最终,获得了一个基于聚合物波导结构的光纤温度传感探头,其光学图片如图1(a)所示。可以发现,光纤端面获得了一个完美的锥形聚合物结构,该结构的形状规则且表面光滑,锥形聚合物沿轴向的长度为 $300 \mu\text{m}$,径向最小长度为 $2 \mu\text{m}$ 。

将光纤传感探头分别与宽带光源(安扬, SC-5-FC)和光纤光谱仪(横河, AQ6370D)连接,通过光谱仪监测该结构的反射干涉谱,室温下测得的干涉谱如图1(b)所示。由于锥形聚合物的结构规则且表面光滑,可以发现,在测量范围内该结构有一个完美的反射干涉谱(干涉谱的损耗低,干涉峰的最小对比度约为 4 dB)。为了与聚合物探针光纤传感结构进行对比,利用光纤切割工具将单模光纤端面切平,制备了一个仅靠光纤端面反射的光纤探头,其光学图片如图1(c)所示。将该结构通过环形器分别与宽带光源和光纤光谱仪连接,在与聚合物探针光纤传感探头相同条件下记录该结构的反射干涉谱,结果如图1(d)所示。可以发现,切平的光纤端面不发生干涉。图1(b)为集成聚合物探针的光纤传感结构的反射干涉谱,由于聚合物探针在光纤

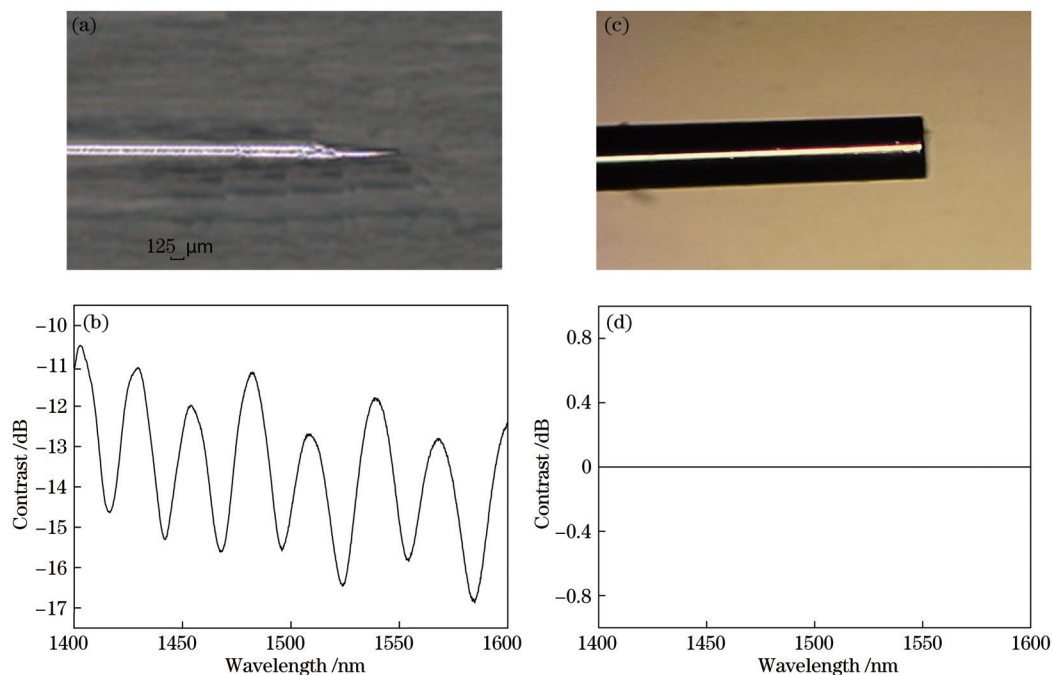


图 1 光纤的结构及光谱。(a)锥形聚合物的光学图片;(b)锥形聚合物的反射干涉谱;(c)光纤端面的光学图片;(d)光纤端面的反射干涉谱

Fig. 1 Structure and spectrum of the optical fiber. (a) Optical picture of the tapered polymer; (b) reflection interference spectrum of the tapered polymer; (c) optical picture of the fiber end face; (d) reflection interference spectrum of the fiber end face

端面形成一个双光束干涉的 F-P 谐振腔,因此,其反射干涉谱中出现了明显的干涉条纹。

当一束光 I_0 从单模光纤入射时,首先会在光纤与聚合物界面发生反射和透射,反射光束的光强为 I_1 ,透射的部分光线在锥形聚合物波导中继续传播,到达聚合物与空气的界面再次发生反射,反射光强为 I_2 ,如图 2 所示。两束反射光发生干涉形成反射干涉谱,假设光纤、聚合物和空气的折射率分别为 n_1 、 n_2 和 n_3 ,聚合物的锥长为 L 。根据菲涅耳反射原理可知,传感探针最终的反射光强分布 $I(\lambda)$ 为^[24]

$$I(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4\pi L n_2 / \lambda), \quad (1)$$

式中, λ 为光的波长。传感探头干涉峰的中心波长位置 λ_m 可表示为

$$\lambda_m = \frac{4n_2 L}{2m + 1}, \quad (2)$$

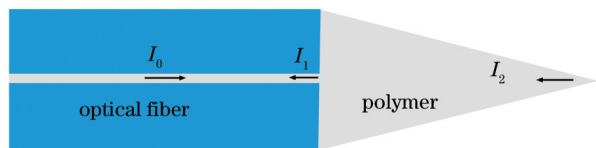


图 2 光在传感探头中传输的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light transmission in the sensing probe

式中, m 为干涉峰的干涉级。由于锥形聚合物具有较高的热光系数和热膨胀系数,当环境温度发生变化时,其折射率和长度均会发生变化,即温度会对 (2) 式中聚合物折射率 n_2 和聚合物锥长 L 进行调制。温度 T 引起的波长漂移量可表示为

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \frac{4L}{2m + 1} \frac{\partial n_2}{\partial T} + \frac{4n_2}{2m + 1} \frac{\partial L}{\partial T}. \quad (3)$$

聚合物的热光系数为 $-1.84 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,且聚合物的折射率随着温度的升高而降低,使干涉峰中心波长随着温度的升高向短波长方向移动;聚合物材料的热膨胀系数为 $52 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,且聚合物锥体的长随温度的升高逐渐变长,干涉峰中心波长向长波长方向移动。但此时聚合物的热膨胀效应起主导作用,因此,最终的反射干涉谱随着温度的升高逐渐向长波长方向移动。通过监测反射干涉谱中干涉峰的中心波长位置可实现对环境温度的高灵敏传感探测。

3 分析与讨论

为了研究锥形聚合物波导对环境温度的响应特性,搭建了一套温度测试系统。该系统包括宽光源、环形器、光纤光谱仪和可编程温控箱,如图 3 所示。传感探头固定在可编程温控箱内靠近温度

探测器的位置,当宽带光源输出的光经环形器传输到光纤传感探头时,在锥形聚合物锥处反射并由光谱仪探测记录其反射干涉谱。其中,环境温度由可程式温控箱的液晶面板处实时控制和监测。

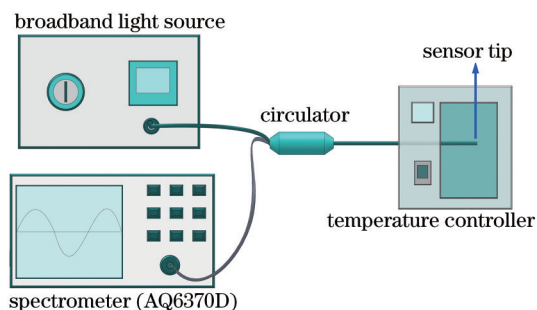


图 3 传感探头温度特性的测试装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring device for the temperature characteristics of sensor probe

通过控制可程式温控箱使光纤传感探头周围的温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,步长为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。记录不同温度下该结构的反射干涉谱,结果如图 4 所示。其

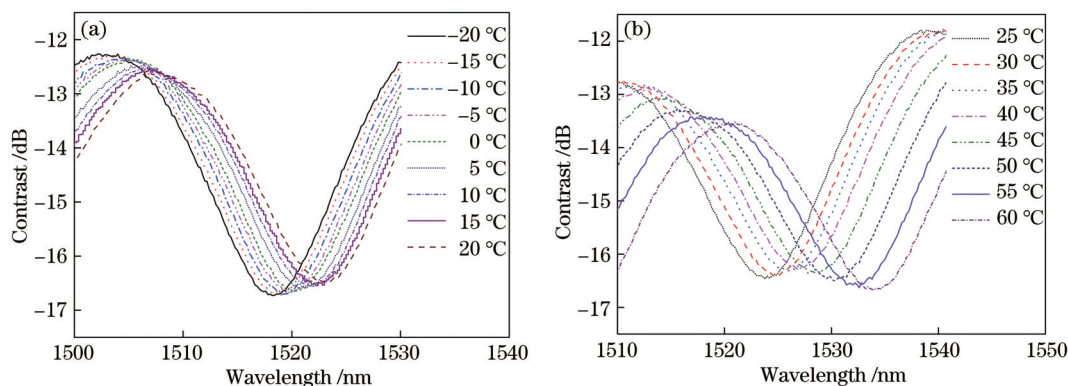


图 4 反射干涉谱随环境温度的变化曲线。(a)低温环境;(b)高温环境

Fig. 4 Variation curve of reflection interference spectrum with environmental temperature. (a) Low temperature environment; (b) high temperature environment

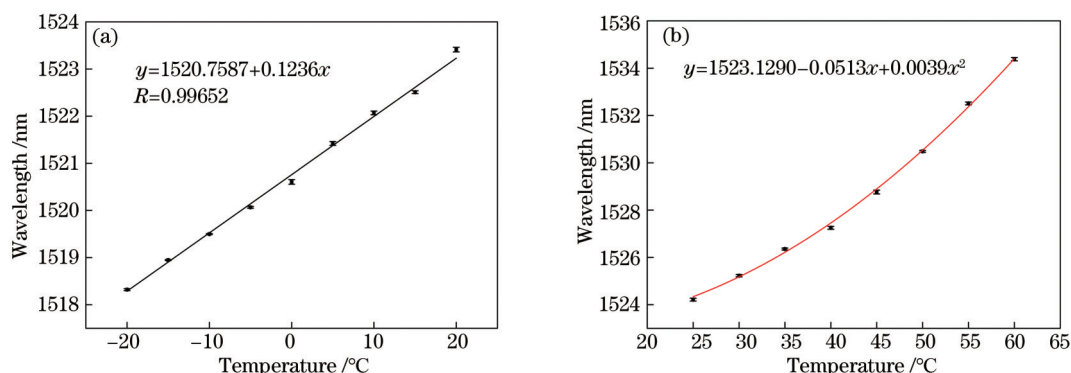


图 5 反射干涉峰的中心波长位置。(a)低温环境;(b)高温环境

Fig. 5 Position of the center wavelength of the reflection interference peak. (a) Low temperature environment; (b) high temperature environment

中,图 4(a)为低温环境中($-20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)光纤传感探头反射干涉谱的变化情况,图 4(b)为高温环境中($25\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)光纤传感探头干涉谱的变化情况。可以发现,随着温度的增加,干涉谱发生了明显的红移。当环境温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,1520 nm 附近干涉峰的中心波长位置从 1518.3194 nm 移动到 1523.4117 nm ,温度变化 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 使干涉峰移动了 5.0923 nm 。当环境温度从室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,干涉峰中心波长从 1524.2140 nm 移动到 1534.3812 nm ,温度变化 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 使干涉峰移动了 10.1672 nm ;且干涉峰的移动速度随着温度的升高逐渐加快,原因是 SU-8 光刻胶材料在高温处的热膨胀系数比低温时大,使该结构在高温环境中具有更好的温度响应特性。

重复进行三次实验,计算每个温度点处干涉峰中心波长的平均值及测量误差,图 5(a)和图 5(b)分别为低温和高温环境下结构的线性拟合结果。其中, y 为干涉峰的中心波长, x 为温度, R 为线性度。

可以发现,该探头在低温环境中的温度灵敏度为 $0.1236 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,且在低温时该传感探头具有很好的线性度,可达到 0.99652 。随着温度的升高,聚合物材料的热膨胀系数和热光系数变大,此时传感探头的干涉峰随温度变化的移动更加明显,逐渐呈非线性变化趋势。

4 结 论

通过简单的蘸取方式和紫外光固化方法在光纤端面集成锥形聚合物波导制备光纤温度传感探针,该结构对环境温度具有很好的响应特性。实验结果表明,该结构在低温环境中的温度灵敏度为 $123.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,随着温度的升高,其灵敏度呈非线性增加趋势。聚合物波导沿径向的最小尺寸为 $2 \mu\text{m}$,可以实现环境温度的点探测;且集成制备的探头具有较好的温度响应特性、生物兼容性,在生物医疗等领域有着重要的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Liu Y C, Badcock R A, Fang X Y, et al. Selecting of FBG coatings for quench detection in HTS coils [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-5.
- [2] Lee C L, Yang C X, Liang T Y, et al. Novel airflow sensor using laser heated Sn-microsphere airgap fiber Fabry-Pérot interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(22): 1775-1778.
- [3] Naim N F, Sudin S N M, Sarnin S S, et al. Design of fiber Bragg grating (FBG) temperature sensor based on optical frequency domain reflectometer (OFDR) [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, 10(3): 3158.
- [4] Tafulo P A R, Jorge P A S, Santos J L, et al. Intrinsic Fabry-Pérot cavity sensor based on etched multimode graded index fiber for strain and temperature measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 8-12.
- [5] Wang T, Tian F, Tang W Q, et al. Brillouin frequency shift extraction method for distributed optical fiber temperature sensing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170631.
王婷, 田凤, 汤文青, 等. 分布式光纤温度传感系统的布里渊频移提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170631.
- [6] Wang Q S, Wang W J, Guo X, et al. Error correction method for distributed fiber Raman temperature sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170602.
王青山, 王伟杰, 郭旭, 等. 分布式拉曼光纤温度传感器的误差修正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170602.
- [7] Gao S C, Zhang W G, Zhang H, et al. Fiber modal interferometer with embedded fiber Bragg grating for simultaneous measurements of refractive index and temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 188: 931-936.
- [8] Ali M M, Islam R, Lim K S, et al. PCF-cavity FBG Fabry-Pérot resonator for simultaneous measurement of pressure and temperature[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 6921-6925.
- [9] Li Y L, Yang K, Li X W. Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 368-375.
- [10] Chen Y F, Wan H D, Chen Q, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0110001.
陈彧芳, 万洪丹, 陈乾, 等. 基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0110001.
- [11] Wu D, Zhu T, Chiang K S, et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(5): 805-810.
- [12] Narendran G, Ramachandran K, Kumar N. An inline sensing of coolant temperature inside a micro-channel for applications in ultra dense packed high power electronics[J]. Optik, 2016, 127(2): 871-875.
- [13] Liou J H, Yu C P. All-fiber Mach-Zehnder interferometer based on two liquid infiltrations in a photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6946-6951.
- [14] Huang J, Lan X W, Song Y, et al. Microwave interrogated sapphire fiber Michelson interferometer for high temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(13): 1398-1401.
- [15] Duan L, Zhang P, Tang M, et al. Heterogeneous all-solid multicore fiber based multipath Michelson interferometer for high temperature sensing[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20210-20218.
- [16] Oliveira R, Bilro L, Marques T H R, et al. Simultaneous detection of humidity and temperature

- through an adhesive based Fabry-Pérot cavity combined with polymer fiber Bragg grating[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114: 37-43.
- [17] Ouyang Y, Xu X F, Zhao Y J, et al. Temperature compensated refractometer based on parallel fiber Fabry-Pérot interferometers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(13): 1262-1265.
- [18] Flores R, Janeiro R, Viegas J. Optical fibre Fabry-Pérot interferometer based on inline microcavities for salinity and temperature sensing[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9556.
- [19] Zhang X Y, Yu Y S, Zhu C C, et al. Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 7-10.
- [20] Lee C L, Liu W F, Weng Z Y, et al. Hybrid AG-FFPI/RLPFG for simultaneously sensing refractive index and temperature[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(17): 1231-1233.
- [21] Llera M, Aellen T, Hervas J, et al. Liquid-air based Fabry-Pérot cavity on fiber tip sensor[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8054-8065.
- [22] Yang K M, He J, Wang Y, et al. Ultrasensitive temperature sensor based on a fiber Fabry-Pérot interferometer created in a mercury-filled silica tube [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-9.
- [23] Li M, Liu Y, Gao R X, et al. Ultracompact fiber sensor tip based on liquid polymer-filled Fabry-Pérot cavity with high temperature sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 233: 496-501.
- [24] Liu Z W, Qiao X G, Wang R H. Miniaturized fiber-taper-based Fabry-Pérot interferometer for high-temperature sensing[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 256-259.