

引用格式: SU Hang, ZHAO Chunlong, ZHANG Zhaorong, et al. High Sensitivity Fabry-Pérot Interferometric Temperature Sensor Based on Three Different Microcavity States[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906007

苏杭,赵纯龙,张钊溶,等. 基于三种不同微腔状态的F-P干涉型高灵敏度温度传感器[J].光子学报,2021,50(9):0906007

基于三种不同微腔状态的F-P干涉型高灵敏度 温度传感器

苏杭¹,赵纯龙¹,张钊溶¹,孔凡鑫¹,杨九如^{1,2},柳春郁^{1,2}

(1 黑龙江大学 电子工程学院, 哈尔滨 150080)

(2 电子工程黑龙江省高校重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要:设计了一种基于法布里-珀罗干涉结构的温度传感系统。分别利用空气、蒸馏水、5%NaCl溶液、无水乙醇、甲醇以及有机硅橡胶作为传感器的温度敏感材料,以提高温度灵敏度。实验结果表明,当腔内介质为空气时,F-P干涉结构的温度灵敏度与腔长成反比;而当液体材料作为腔内介质或固体材料作为F-P型检测探针时,腔的长度几乎不会影响结构的温度灵敏度,因为此时波长漂移的主要原因是材料热光系数的改变,温度灵敏度与材料的热光系数成正比。实验中,甲醇作为热光系数绝对值最高的液体,充满法布里-珀罗腔时温度灵敏度为 $-564\text{ pm}/^\circ\text{C}$,而固化后的有机硅橡胶直接作为法布里-珀罗型检测探针时温度灵敏度可高达 $1.15\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。该温度传感结构具有体积小、重复性好、灵活可塑性强等优点,在温度传感领域具有潜在的应用价值。

关键词:光纤光学;传感器;腔内介质;Fabry-Pérot干涉;温度;检测探针

中图分类号:TN252

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0906007

High Sensitivity Fabry-Pérot Interferometric Temperature Sensor Based on Three Different Microcavity States

SU Hang¹, ZHAO Chunlong¹, ZHANG Zhaorong¹, KONG Fanxin¹, YANG Jiuru^{1,2}, LIU Chunyu^{1,2}

(1 College of Electronics Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

(2 Key Lab of Electronics Engineering, Colleges of Heilongjiang Province, Harbin 150080, China)

Abstract: A temperature sensing system based on the Fabry-Pérot interference structure is designed. Air, distilled water, 5% NaCl solution, absolute ethanol, methanol and cured silicon rubber are used as the temperature sensitive materials of the sensor to improve the temperature sensitivity effectively. The experimental results show that when the medium in the cavity is air, the temperature sensitivity of the F-P interference structure is inversely proportional to the cavity length. However, when the medium in the cavity is liquid or the solid material constitutes F-P type detection probe, the length of the cavity will hardly affects the temperature sensitivity of the structure. Because at this time the main reason of the wavelength shift is the change of material's thermo-optical coefficient, the temperature sensitivity is proportional to it. In the experiment, methanol is the liquid with the highest absolute value of the thermo-optical coefficient. And when it is filled with F-P cavity, the temperature sensitivity is $-564\text{ pm}/^\circ\text{C}$. In addition, when the cured silicone rubber is used as an F-P type detection probe directly, the temperature sensitivity can be as high as $1.15\text{ nm}/^\circ\text{C}$. The temperature sensing structure has the advantages of small

基金项目:国家自然科学基金(No.61675066),黑龙江省高校专项资金项目(No.2020-KYYWF-1023)

第一作者:苏杭(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感。Email:2191260@s.hlj.edu.cn

导师(通讯作者):柳春郁(1975—),女,教授,博士,主要研究方向为光纤无源、有源器件以及光纤传感。Email:liuchunyu@hlju.edu.cn

收稿日期:2021-03-15;录用日期:2021-04-19

<http://www.photon.ac.cn>

size, good repeatability, strong flexibility and plasticity, and has potential application values in the field of temperature sensing in the future.

Key words: Fiber optics; Sensor; Cavity medium; Fabry-Pérot interference; Temperature; Detection probe

OCIS Codes: 060.2300; 060.2310; 060.2340; 060.2370; 060.2430

0 引言

与传统传感器相比,光纤传感器灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、易于集成、可适应于其他传感器所不适应的恶劣环境^[1-3],近年来被广泛用于建筑工程、医疗检测、军事科技和工业生产等领域中^[4-6]。其中,光纤法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Pérot Interference, FPI)在进行传感测量时,将物理量变化转化为干涉光的相位变化^[7-9],有效提高了响应速度、灵敏度和精确度,且稳定性好,被大量应用于生物、物理、化学等领域的传感监测^[10-11]。

目前,利用法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉原理实现对温度的测量^[12-13]已成为国内外研究的热点。2012年, RONG Qiangzhou等在单模光纤尖端涂上聚乙烯醇薄膜,使该传感头对温度敏感且可提供173.5 pm/°C的稳定温度灵敏度^[14]。2013年, ZHANG Xuanyu等将聚二甲基硅氧烷涂于单模光纤尖端作为F-P干涉腔,在25~60°C内温度灵敏度为385.46 pm/°C^[15]。2016年, LI Min等提出了一种基于超紧实液体聚合物填充的F-P干涉仪,实验采用双光子聚合技术在光纤端面上制备液体聚合物填充微结构,使其灵敏度达到877 pm/°C^[16]。2020年, LI Jin等提出一种利用聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)在二氧化硅毛细管中固定并封装微光纤与单模光纤的F-P干涉仪,实验通过调整微光纤的直径与腔长最终可在42~54°C之间得到6.383 nm/°C的温度灵敏度^[17]。可以看出,随着越来越多的材料与技术手段应用于FPI的传感结构,其温度灵敏度在逐渐提高,但仍存在结构复杂、制作困难等问题,所以制备结构简单且灵敏度高的FPI,实现对温度的有效监测成为再续研究的当务之急。

本文采用两个光纤连接的陶瓷头相向插入陶瓷插芯,利用其端面的菲涅尔反射获得干涉条纹,以解决两单模光纤直接构成F-P腔对芯困难的问题。其腔长及腔内介质易于调整,针对此特点提出了基于气体和液体两种不同状态所构成F-P腔的温度传感器。同时,还将液体胶质直接沉积于光纤连接的陶瓷头,待其固化后可直接形成固体F-P型温度检测探针。

1 实验原理

图1为基于光纤陶瓷头反射的F-P型光纤温度传感结构示意图,两个陶瓷头构成的反射端面向向插入陶瓷插芯中形成F-P微腔。在光纤中传输的光首先在端面 F_1 处发生反射,以 R_1 为反射率的部分光返回纤芯,其余部分透射进入F-P微腔后又在端面 F_2 处以 R_2 为反射率发生二次反射。两束反射光在纤芯相遇时会产生光程差,进而得到双光束干涉的干涉光谱。传感结构的半封闭特性可以很方便地调节F-P腔的长度,也可以方便地向腔内注入不同的液体材料,以提高温度灵敏度。

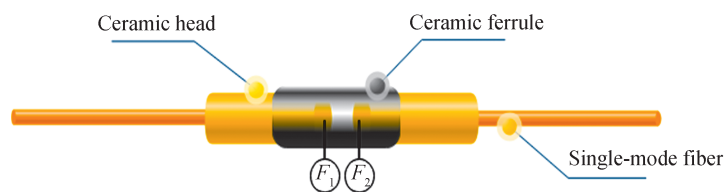


图1 基于光纤陶瓷头反射的F-P型光纤温度传感结构

Fig. 1 F-P type optical fiber temperature sensing structure based on reflection of optical fiber ceramic head

对由两光纤陶瓷头反射形成的F-P腔,当光波正向入射时,将产生双光束干涉型FPI,根据菲涅尔反射原理,干涉光强可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi \quad (1)$$

式中, I_1 表示反射面 F_1 处的光强, I_2 表示反射面 F_2 处的光强, φ 为F-P腔形成的相位差。当 $\varphi = (2k + 1)\pi$,

$k=0,1,2,\dots$,时,光束干涉相消,此时干涉谱线将出现波谷,干涉波谷波长的表达式为

$$\lambda_{\min} = \frac{4\pi nL}{2k+1} \quad (2)$$

式中, n 为腔内介质折射率, k 为波矢, L 为腔长。

由于干涉波谷的表达式可知,腔内介质的折射率和腔长都将影响干涉波谷的波长,且有

$$\Delta\lambda = \frac{4}{2k+1}(\Delta n \cdot L + \Delta L \cdot n) \quad (3)$$

式中, Δn 为温度影响下腔内介质的折射率变化量, ΔL 为温度影响下腔长的变化量。所以得到F-P型温度传感器的灵敏度表达式为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \left(\frac{\Delta n}{\Delta T \cdot n} + \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L} \right) \lambda \quad (4)$$

式中, $\frac{\Delta n}{\Delta T}$ 、 $\frac{\Delta L}{\Delta T}$ 分别表示腔内介质的热光系数和热膨胀系数。热光系数对应的热光效应是指温度变化引起的折射率变化;热膨胀系数对应的热膨胀效应是指温度变化引起的长度变化。实验中,对于空气填充的微腔,由于腔内介质始终为空气,且空气的热光系数为0,所以可忽略热光效应,只需分析热膨胀效应带来的波长变化。而对于液体填充的微腔,为避免密封腔不严导致液体蒸发,使液体F-P腔处于半开腔状态,将液体注入腔内后再置于充满该液体的管状容器中,整体作为温度传感结构。其中液体处于可流动的状态,可忽略热膨胀效应带来的波长变化,只需考虑热光效应即可。

对于固体F-P型检测探针,其干涉原理与上述基本相似,制备时需在光纤连接的陶瓷头端面均匀沉积有机硅橡胶,固化后即可形成检测探针,传感结构如图2。其中陶瓷头端面为反射端面 F_1 ,固化后的硅橡胶顶部为反射端面 F_2 。同样,两束反射光在纤芯相遇时会产生光程差,得到干涉光谱。

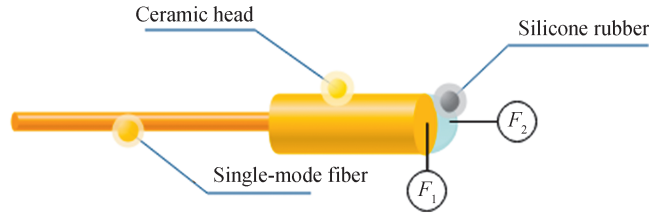


图2 固体F-P型检测探针
Fig. 2 Solid F-P type detection probe

2 实验及结果

2.1 传感结构的制备

实验中,将两根清洁干净的普通单模光纤跳线(FC型)相向插入陶瓷插芯,两陶瓷头之间留有微米级的空隙,即为空气填充的F-P腔。接着,用光纤环形器连接宽带光源、传感结构及光谱分析仪。根据干涉光谱的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)制作不同腔长的传感结构进行基于空气填充腔的F-P温度传感实验。

对于液体填充腔的传感结构,在空气腔的基础上用注射器向腔内注射不同液体,再将此结构放入带有相应液体的玻璃管中并进行封装,保证温度传感实验时腔内始终充满相应的液体。

同样,选用有机硅橡胶制作F-P型温度检测探针时,首先要将被涂覆的光纤跳线陶瓷头端面清洁干净,再将胶液均匀沉积到陶瓷头端面并进行离心旋转使胶液分布均匀,最后,令该结构置于空气中自然固化。该固化过程是一个由表面到内部的过程,为保证胶液固化完全不影响实验结果,传感结构将在室温及55%相对湿度的环境中固化24h。选择有机硅橡胶作为固态F-P结构的传感头是因为它具有透明、无毒、无污染、无腐蚀、耐高温 $-60\sim+200^\circ\text{C}$ 且电气绝缘性能佳等优点。固化后的有机硅橡胶即为F-P腔,硅橡胶的厚度即为腔长。依旧选取涂抹厚度不同的有机硅橡胶进行不同腔长的温度传感实验分析。

2.2 温度传感特性的研究

图3为温度测量的实验装置,传感器的输入/输出为单模光纤,分别连接到宽带光源和光谱仪,用于发射/接受宽带光信号。温度传感实验在15~55℃进行,传感结构置于加热板进行水浴加热,每隔2℃左右记录一次数据,分别分析基于空气腔、液体腔和固体腔的温度响应特性。

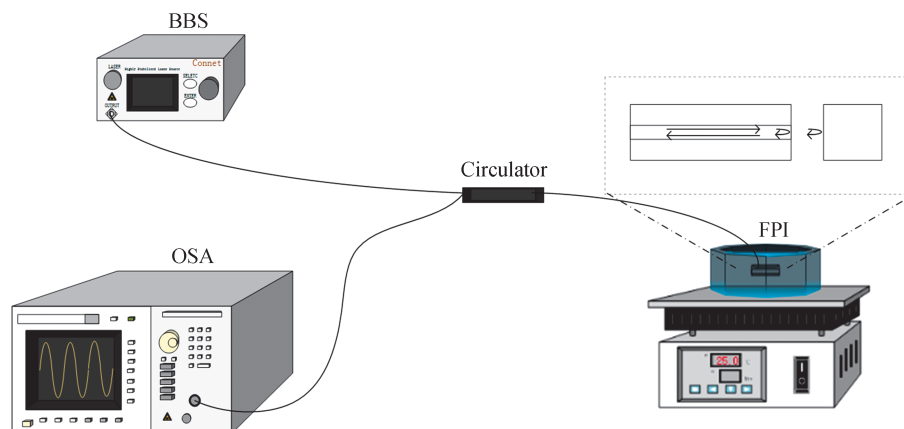
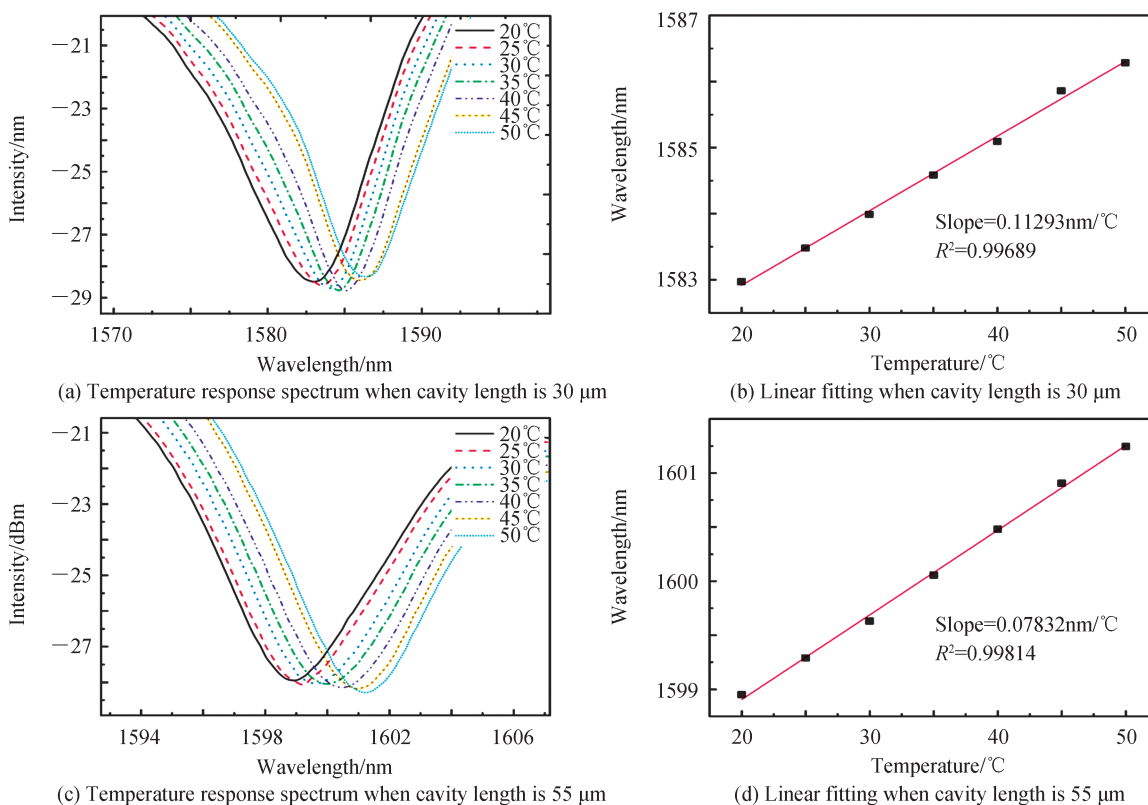


图3 温度传感实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature sensing experiment

实验首先对不同长度的空气填充腔进行温度传感实验,其温度响应光谱如图4(a)、(c)、(e)所示。结果表明,随着温度的提高,传感结构的谐振峰将发生红移。其相应的温度响应线性拟合曲线如图4(b)、(d)、(f)所示。可以看出,腔长会影响传感结构的温度敏感特性,腔长越长对外界温度变化越不敏感。实验中,腔长为235 μm 的结构温度灵敏度为30.36 $\text{pm}/^\circ\text{C}$;而腔长为55 μm 时,温度灵敏度为78.32 $\text{pm}/^\circ\text{C}$;腔长为30 μm 时,温度灵敏度可达112.93 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。实验还测试了腔长为其他数值时传感结构的温度灵敏度,结果都与仿真结果相吻合,如图5所示。



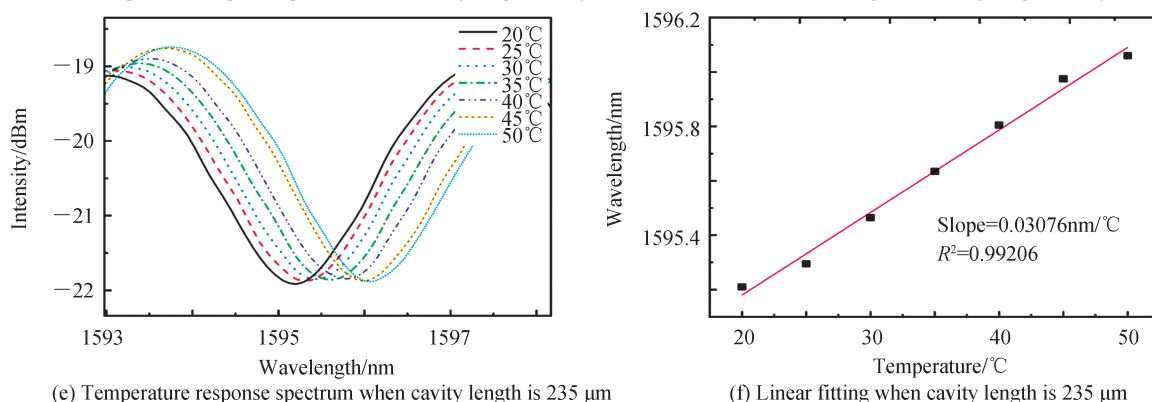


图4 空气填充F-P腔的温度响应光谱及线性拟合
Fig. 4 Temperature response spectrum and linear fitting of air-filled F-P cavity

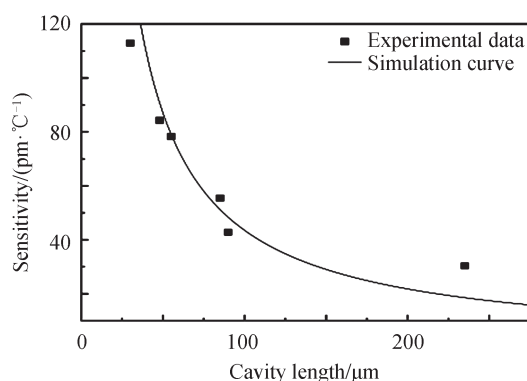


图5 腔长与温度灵敏度的仿真及实验对比
Fig. 5 Simulation and experimental comparison of cavity length and temperature sensitivity

由实验可知,基于空气填充的F-P干涉型传感结构的温度灵敏度较低,虽然缩小腔长能有效提高其温度灵敏度,但是极其有限。根据F-P干涉的传感原理可知,谐振峰的波长会随温度变化是由于热膨胀效应和热光效应。因为空气的热光系数为0,所以基于空气填充的温度传感结构的波长变化源自于热膨胀效应。若想热光效应发挥作用,则应考虑在腔内填充液体或直接利用其它固体制成F-P腔。

进行基于液体填充的F-P干涉温度传感实验。根据传感原理,在液体腔进行温度传感实验时可忽略热膨胀效应,因而排除了腔长对温度灵敏度的影响,此时只考虑液体在相应波长下的初始折射率。实验选取了蒸馏水、5%NaCl溶液、无水乙醇和甲醇四种热光系数不同的液体分别填充至F-P腔进行温度传感实验。温度响应测试中,通过水浴加热改变传感器的周围环境,实验温度在20~50°C范围内,每隔2°C左右记录一次数据。四种液体的温度响应光谱如图6(a)、(c)、(e)和(g)所示,对应的线性拟合曲线如图6(b)、(d)、(f)和(h)所示。测量结果对比发现,四种不同热光系数的液体注入F-P腔后的温度灵敏度分别为-105.64 pm/°C, -121.51 pm/°C, -470.62 pm/°C, -564.36 pm/°C。这与它们的热光系数大小相对应^[18-20]。实验证明当热光系数绝对值越大的液体注入微腔时,获得的温度灵敏度绝对值越大,相应的温度传感特性也就越好。测量值与理论值之间有微小的偏差是液体随温度升高蒸发降低了浓度造成的,这些误差均在允许范围内。

对于由有机硅橡胶制成的固体F-P型温度检测探针,由于其特殊的性质,依旧选取了不同腔长的传感头进行温度传感实验,实验结果表明腔长对温度灵敏度的影响极其微小,依然是热光效应在起主导作用。但此结构对硅橡胶的分布要求严格,应保证其厚度均匀才能获得准确的温度灵敏度。实验同样以2°C为步长,在20~50°C之间进行了对固体检测探针的温度传感特性研究,选取其中两次实验的温度响应图谱如图7(a)和(c)所示。结果表明,随着温度的升高,F-P结构的谐振峰将发生红移。其相应的温度响应线性拟合曲线如图7(b)和(d)所示。测量结果对比发现,两个不同腔长的固态F-P结构的温度灵敏度分别为1.150 39 nm/°C

和 $1.15138 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 与理论值相符。

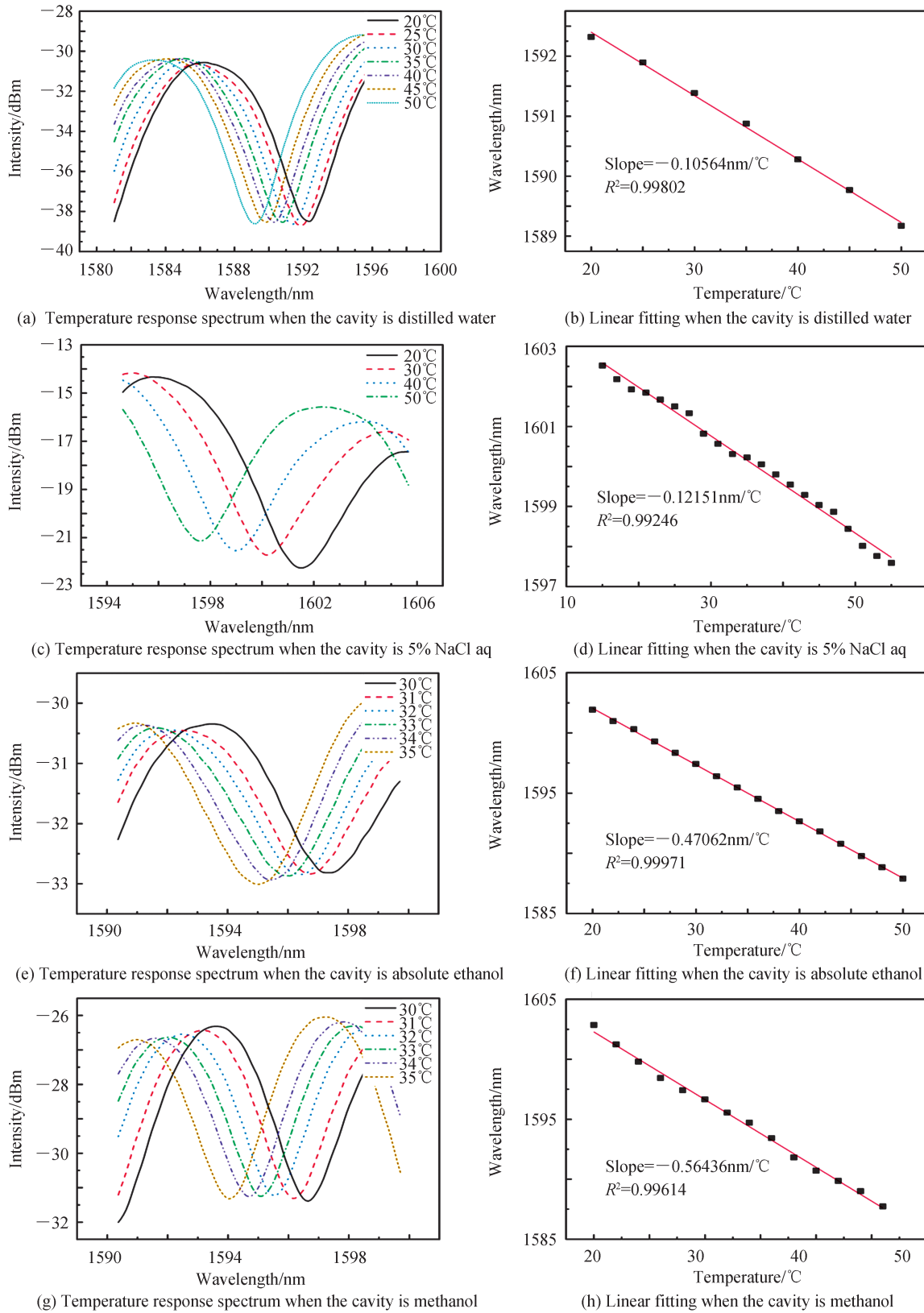


图 6 液体填充 F-P 腔的温度响应光谱及线性拟合

Fig. 6 Temperature response spectrum and linear fitting of liquid-filled F-P cavity

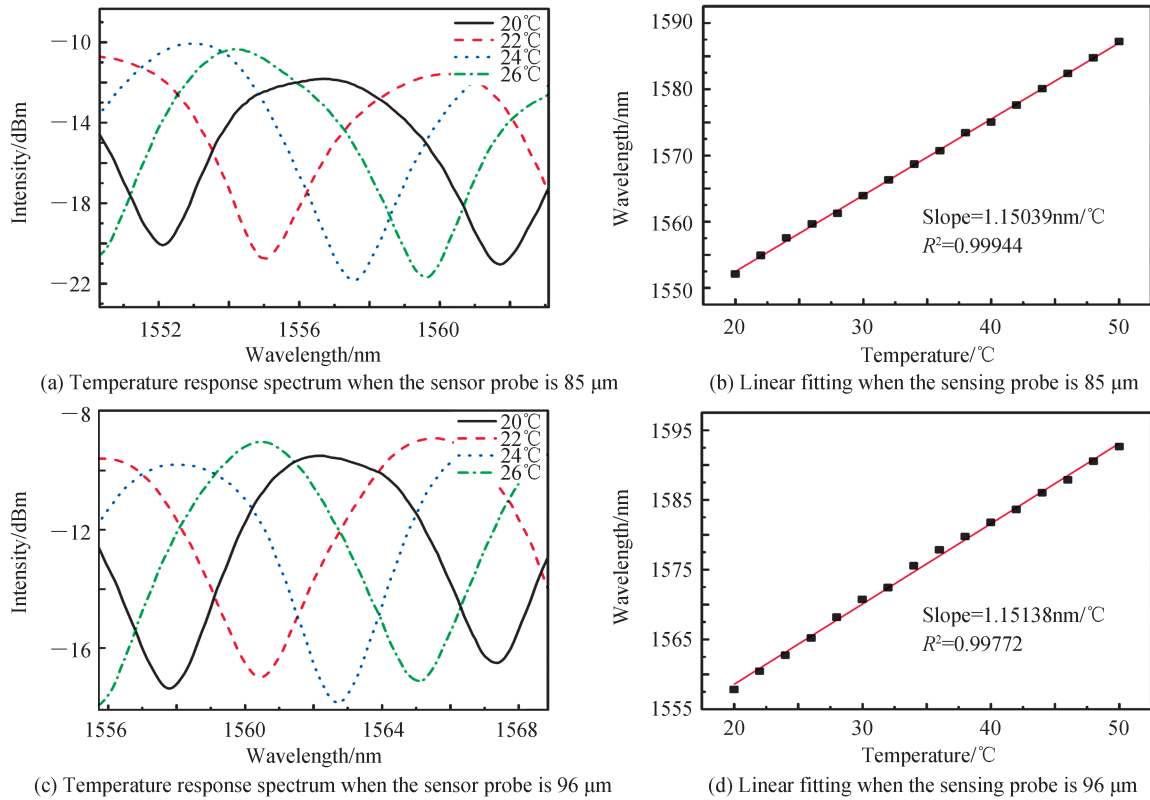


图7 固体F-P型温度检测探针的温度响应光谱及线性拟合

Fig. 7 Temperature response spectrum and linear fitting of solid F-P temperature detection probe

3 结论

本文提出了一种基于气体、液体和固体三种不同状态所构成F-P腔的温度传感器,利用两个完全相同的陶瓷头相向插入陶瓷插芯或利用单一陶瓷头与固体材料紧密结合实现双光束干涉。通过改变腔长与腔内填充介质进行不同程度的温度敏感实验。实验证明,当腔内填充空气时,热膨胀效应带来的波长漂移使传感器的灵敏度与腔长成反比;向腔内填充不同液体后,热光效应起主导作用,实验中得到基于甲醇液体的F-P腔可获得 $-564 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的温度灵敏度;对于由有机硅橡胶制成的固体F-P型检测探针,仍是热光效应主导使干涉波长发生漂移,实验获得了 $1.15 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的超高灵敏度,是普通F-P腔温度传感器的数倍到数十倍。实验所设计的F-P型传感器制作简单、成本低、可控性强且灵敏度高,在化学及生物温度传感领域具有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] JAUREGU-VAZQUEZ D, ESTUDILLO-AYALA J M, ROJAS-LAGUNA R, et al. An all fiber intrinsic Fabry-Perot interferometer based on an air-microcavity[J]. Sensors, 2013, 13(5): 6355-6364.
- [2] ZHANG Guilin, YANG Minghong, WANG Min. Large temperature sensitivity of fiber-optic extrinsic Fabry - Perot interferometer based on polymer-filled glass capillary[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 618-622.
- [3] LI Xuejin, YU Yongqin, HONG Xueming, et al. Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1140-1144.
李学金,于永芹,洪学明,等.基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J].中国激光,2009,36(5):1140-1144.
- [4] WANG Ning, TIAN Wenhao, ZHANG Haosheng, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor by graphene quantum dots[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 0906003.
王宁,田文昊,张昊生,等.石墨烯量子点法布里珀罗光纤湿度传感器[J].光子学报,2020,49(9):0906003.
- [5] CHEN Zhenshi, XIONG Songsong, GAO Shecheng, et al. High-temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer in microfiber tip[J]. Sensors, 2018, 18(1): 202.
- [6] CONG Aimin, LI Min, CAO Wancang, et al. High sensitive optical fiber temperature sensing probe based on conical polymer waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1906003
丛爱民,李敏,曹万苍,等.基于锥形聚合物波导的高灵敏光纤温度传感探头[J].激光与光电子学进展,2021,58(19):

1906003

- [7] LI Jin, YANG Juntong, MA Jinna. Highly sensitive temperature sensing performance of a microfiber Fabry-Perot interferometer with sealed micro-spherical reflector[J]. *Micromachines*, 2019, 10(11): 773.
- [8] LIU Fulu, ZHANG Yumin, MENG Fanyong, et al. Fiber temperature sensor based on the cascaded Fabry-Perot with end face coating and substrate sensitization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 105-111.
刘福祿,张钰民,孟凡勇,等.基于端面镀膜和基底增敏的级联法布里-珀罗光纤温度传感器[J].*仪器仪表学报*,2020,41(11):105-111.
- [9] MENG Hua, LI Haiyang, CAO Zhanqi. An optical fiber Farby-Perot temperature sensor for rapid ocean temperature measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 256-260.
孟华,李海洋,曹占启.一种用于海洋温度快速测量的光纤法布里-珀罗温度传感器[J].*中国激光*,2018,45(12):256-260.
- [10] ZHAO Qiong, WANG Wei, KOU Wanying, et al. Liquid-filled sensitivity-enhanced Fabry-Perot microcavity fiber-optic temperature sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(7): 856-861.
赵琼,王伟,寇琬莹,等.液体填充增敏型法布里-珀罗微腔光纤温度传感器[J].*激光与红外*,2020,50(7):856-861.
- [11] YANG Yuqiang, WANG Yonggaugn, JIANG Jiuxing, et al. High-sensitive all-fiber Fabry-Perot interferometer gas refractive index sensor based on lateral offset splicing and Vernier effect[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 196: 163181.
- [12] YANG Yuqiang, WANG Yongguang, ZHAO Yuxin, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor by hybrid cascaded configuration of a Sagnac loop and a F-P cavity[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33290.
- [13] ZOU Hui, MA Lei, XIONG Hui, et al. Fiber ring laser sensor based on Fabry-Perot cavity interferometer for temperature sensing[J]. *Laser Physics: An International Journal Devoted to Theoretical and Experimental Laser Research and Application*, 2018, 28(1): 015102.
- [14] RONG Qiangzhou, SUN Hao, QIAO Xueguagn, et al. A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(4): 059501.
- [15] ZHANG Xuanyu, YU Yongsen, ZHU Congcong, et al. Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 26(1): 7-10.
- [16] LI Min, LIU Yi, GAO Renxi, et al. Ultracompact fiber sensor tip based on liquid polymer-filled Fabry-Perot cavity with high temperature sensitivity[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, 233: 496-501.
- [17] LI Jin, LI Zhoubing, YANG Juntong, et al. Microfiber Fabry-Perot interferometer used as a temperature sensor and an optical modulator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106296.
- [18] ZHOU Fengfeng, SU Huaizhi, JOE H E, et al. Temperature insensitive fiber optical refractive index probe with large dynamic range at 1,550 nm[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2020, 312: 112102.
- [19] MOUTZOURIS K, PAPAMICHAEL M, BETSIS S C, et al. Refractive, dispersive and thermo-optic properties of twelve organic solvents in the visible and near-infrared[J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(3): 617-622.
- [20] DAIMON M, MASUMURA A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3811-3820.