

基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器

杨易 徐贲 刘亚铭 李萍 王东宁 赵春柳

Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect

Yang Yi Xu Ben Liu Ya-Ming Li Ping Wang Dong-Ning Zhao Chun-Liu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 094205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.094205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

[Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters](#)

物理学报.2017, 66(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074202>

面向地壳形变观测的超高分辨率光纤应变传感系统

[Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation](#)

物理学报.2017, 66(7): 074208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074208>

光纤超声传感器及应用研究进展

[Fiber-optic ultrasonic sensors and applications](#)

物理学报.2017, 66(7): 074205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074205>

用于气象观测的阵列式温度传感器流体动力学分析与实验研究

[Fluid dynamic analysis and experimental study of a temperature sensor array used in meteorological observation](#)

物理学报.2016, 65(9): 094209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094209>

分布式光纤 Sagnac 干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

[Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer](#)

物理学报.2016, 65(4): 044210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044210>

基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪 温度传感器*

杨易 徐贲[†] 刘亚铭 李萍 王东宁 赵春柳

(中国计量大学光学与电子科技学院, 杭州 310018)

(2016年11月9日收到; 2016年12月21日收到修改稿)

本文介绍了一种高灵敏度光纤温度传感器. 该传感器由一小段毛细管熔接于单模光纤和一段大模场光纤之间而构成串联的两个法布里-珀罗干涉仪. 由于俩干涉仪具有相近的自由光谱区, 因而它们的叠加光谱会产生游标效应. 实验结果显示, 利用游标效应解调, 该传感器的温度灵敏度可从单一空气腔法布里-珀罗干涉仪的 $0.71 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 提高到 $179.30 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. 该传感器结构紧凑 ($<1 \text{ mm}$) 且灵敏度高, 具有良好的应用前景.

关键词: 光纤传感, 法布里-珀罗干涉仪, 游标效应, 温度

PACS: 42.81.Pa, 07.60.Ly, 07.60.Vg, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.66.094205

1 引言

光纤温度传感器具有本质安全、抗电磁干扰、易分布和长距离传感测量等优点而倍受用户青睐. 各种光纤温度传感器得到开发与应用, 它们的工作原理各异, 如基于光纤布拉格光栅 (FBG)、长周期光纤光栅以及各类光纤干涉仪等^[1-4]. 其中光纤法布里-珀罗干涉仪 (FPI) 光纤温度传感器因其结构简单紧凑、稳定性好以及较高的空间分辨率而尤其受到关注^[5]. 制备光纤 FPI 的方法包括纤内镀膜、FBG 对、激光钻孔、化学腐蚀、聚焦离子束, 以及利用两根光纤熔接处折射率的不匹配等^[6]. 目前, 纤内 FPI 正是利用空气与固态纤芯的折射率不匹配而构成, 因其制备简单而被应用于应力、折射率和温度等的测量^[7-9]. 对纤内 FPI, 腔长的变化会导致其谐振波长的漂移, 通过高分辨率的光谱分析仪检测谐振波长的漂移, 即可精确测量谐振腔长度的变化或引起该变化的相关物理参数, 如应力、温度等^[10-16].

游标效应最初应用于提高长度测量的分辨率

(如游标卡尺), 其工作原理在于巧妙利用主尺与游标的微小比例尺差异. 2009年, Dai^[17] 和 Jin 等^[18] 分别提出基于串联光纤环结构的游标效应光学传感器, 利用波长解调法实现折射率的超高灵敏度测量. 2014年, Zhang 等^[19] 提出利用空心光子晶体光纤 (HC-PCF) 的大模场特性将两段 HC-PCF 嵌入单模光纤 (SMF) 中构成级联 FPI 结构的游标效应光纤传感器 (两个 FPI 相距数厘米), 应用于应力和磁场的测量, 较之单一 FPI, 其灵敏度提高了约 29 倍. 2015年, Shao 等^[20] 提出串联 Sagnac 干涉仪的游标效应光纤温度传感器, 较之单一 Sagnac 干涉仪, 其灵敏度提高了约 9 倍, 但整个传感器尺寸较大 (单个 Sagnac 干涉环长度约 2 m), 难以实现高空间分辨的温度测量.

本文介绍一种基于游标效应、结构紧凑且灵敏度高的光纤温度传感器. 该传感器是在 SMF 末端依次熔接数百微米的一小段毛细管 (capillary, TSP050150) 和大模场光纤 (LMAF, LMA-GDF-10/130-M) 而构成级联的两个 FPI. 由于两干涉仪谐振腔的光程近似相等, 从而发生光学游标

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61405184) 和浙江省自然科学基金 (批准号: LY17F050010) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xuben@cjlu.edu.cn

效应. 利用此特性实现了温度的高灵敏度测量(约 $179.30 \text{ pm}/^\circ\text{C}$), 较之单一 FPI, 其灵敏度提高了 2 个数量级.

2 传感器结构和工作原理

图 1 给出了基于游标效应的双 FPI 光纤温度传感器结构示意图. 在 SMF 的末端依次熔接一小段毛细管和大模场光纤, 由于固态纤芯和空气的折射率不匹配, 因此构成三个反射面, 对应图中的 M1, M2 和 M3. 这三个反射面进一步组成了级联的两个 FPI, 对应谐振腔 C1 和 C2, 其腔长分别用 L_1 和 L_2 来表示.

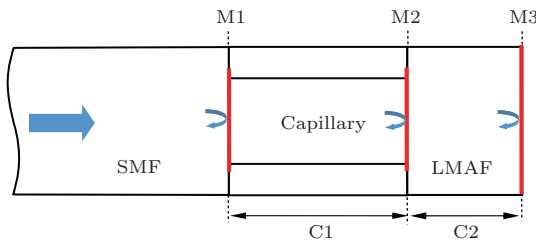


图 1 (网刊彩色) 级联 FPI 结构光纤温度传感器示意图
Fig. 1. (color online) Schematic of the proposed device with cascaded FPIs.

对于由 M1 和 M2 组成的空气腔 FPI, 其反射光谱为典型的双光束干涉. 设 M1 和 M2 的反射率分别为 R_1, R_2 , 则从左侧 SMF 入射的光经两个反射面后再次返回到 SMF 中的光强可表示为

$$I_r = R_1 + A^2 + 2R_1 A \cos(2\phi_1), \quad (1)$$

式中, $A = (1 - k_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}$, 其中 k_1 为谐振腔 C1 的传输损耗; $\phi_1 = 2\pi n_1 L_1/\lambda$, ϕ_1 为光在谐振腔 C1 内传输导致的相移, 其中 n_1 为谐振腔 C1 内介质(即空气)的有效折射率, λ 为输入光在真空中的波长. 考虑到光从光疏媒质射向光密媒质时存在半波损失, 因此相移 ϕ_1 满足 π 的偶数倍时, 则干涉谱中对应出现谐振波谷. 因干涉仪内介质的热膨胀和热光效应, 相移随温度发生变化, 进而引起干涉谱中谐振波谷中心波长 λ_N 发生漂移. 此空气腔 FPI 的温度灵敏度 $S_{T\text{-air}}$ 可表示为^[21]

$$S_{T\text{-air}} = \frac{\partial \lambda_N}{\partial T} = \lambda_N \left(\frac{\partial L_1}{\partial T} \frac{1}{L_1} + \frac{\partial n_1}{\partial T} \frac{1}{n_1} \right), \quad (2)$$

式中, N 表示谐振级次, 为整数; $\frac{\partial L_1}{\partial T} \frac{1}{L_1}$ 表示谐振腔的热膨胀系数, 此处谐振腔壁毛细管材料为

纯石英, 热膨胀系数约为 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$; $\frac{\partial n_1}{\partial T} \frac{1}{n_1}$ 表示腔内介质的热光系数, 此处腔内介质为空气, 其热光系数在室温和标准大气压下约为 $-5.6 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ^[21]. 由(2)式可得单一空气腔 FPI 的温度灵敏度约为 $0.015 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 这正好解释了众多空气腔 FPI 的热不敏感特性 ($< 8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)^[21-23].

同理, 对于由 M2 和 M3 构成的玻璃腔 FPI, 腔内介质为光纤, 相应的单一玻璃腔 FPI 的温度灵敏度 $S_{T\text{-fiber}}$ 可表示为

$$S_{T\text{-fiber}} = \frac{\partial \lambda}{\partial T} = \lambda_N \left(\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2} + \frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2} \right), \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2}$ 和 $\frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2}$ 分别表示玻璃谐振腔的热膨胀系数(约 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$)和腔内介质(即光纤)的热光系数($10^{-5} - 10^{-6}/^\circ\text{C}$). 由(3)式可得, 单一玻璃腔 FPI 的温度灵敏度约为 $2.40 - 16.35 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

由 M1, M2 和 M3 构成三光束干涉器件, 设 M3 的反射率为 R_3 , 则左侧入射光经三个反射面后总的反射光强可表示为^[24]

$$I_{rr} = R_1 + A^2 + B^2 + 2\sqrt{R_1}B \cos[2(\phi_1 + \phi_2)] + 2\sqrt{R_1}A \cos(2\phi_1) + 2AB \cos(2\phi_2), \quad (4)$$

式中, $B = (1 - k_1)(1 - k_2)(1 - R_1)(1 - R_2)\sqrt{R_3}$, 其中 k_2 为谐振腔 C2 的传输损耗; $\phi_2 = 2\pi n_2 L_2/\lambda$, ϕ_2 为光在谐振腔 C2 内传输导致的相移, 其中 n_2 为谐振腔 C2 内介质的有效折射率.

图 2(a) 给出了根据(4)式模拟计算得到的三光束反射光谱, 各参数分别设置为: $n_1 = 1$, $n_2 = 1.44$, $L_1 = 332.29 \text{ }\mu\text{m}$, $L_2 = 219.22 \text{ }\mu\text{m}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 0.18$, $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.6$. 谐振腔 C1 和 C2 的自由光谱区 FSR_1 ($\approx 3.65 \text{ nm}$) 和 FSR_2 ($\approx 3.83 \text{ nm}$) 相近, 但不相等. 图 2(a) 显示了三光束干涉的叠加光谱, 其自由光谱区约为 3.49 nm . 同时满足两个谐振腔反射光最强的波长处对应叠加光谱中最大值, 反之出现最小值, 即对应叠加光谱包络(envelope)的最大值和最小值, 该包络曲线的自由光谱区较单一 FPI 的要大得多, 即所谓的游标效应. 进一步, 叠加光谱中极小值点组成的周期性包络函数可根据 $\partial I_{rr}/\partial \lambda = 0$ 推导得到

$$F_C = D + 2m \cos[4\pi(s_1 - s_2)/\lambda], \quad (5)$$

式中, D 表示包络函数的直流部分, m 表示交流部分的振幅, s_1 和 s_2 分别表示谐振腔 C1 和 C2 的

光程. 由上文对空气腔和玻璃腔单独分析可知, 空气腔 FSR_1 随温度变化非常小, 较之玻璃腔的 FSR_2 随温度变化量可忽略不计(即 s_1 可看作常数, s_2 随温度变化而变化). 由(5)式可根据 $S_{T-envelope} = \partial\lambda/\partial T$ 与 $FSR = \lambda^2/2nL$ 推导得包络曲线波谷中心波长的温度灵敏度 $S_{T-envelope}$ 为

$$S_{T-envelope} = \lambda_N \left(\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2} + \frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2} \right) \times \frac{FSR_1}{|FSR_1 - FSR_2|}, \quad (6)$$

与单一玻璃腔 FPI 干涉仪相比, 其温度灵敏度放大倍数 P 为

$$P = \left| \frac{S_{T-envelope}}{S_{T-fiber}} \right| = \left| \frac{\lambda_N \left(\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2} + \frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2} \right) \frac{FSR_1}{|FSR_1 - FSR_2|}}{\lambda_N \left(\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2} + \frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2} \right)} \right| = \frac{FSR_1}{|FSR_1 - FSR_2|}. \quad (7)$$

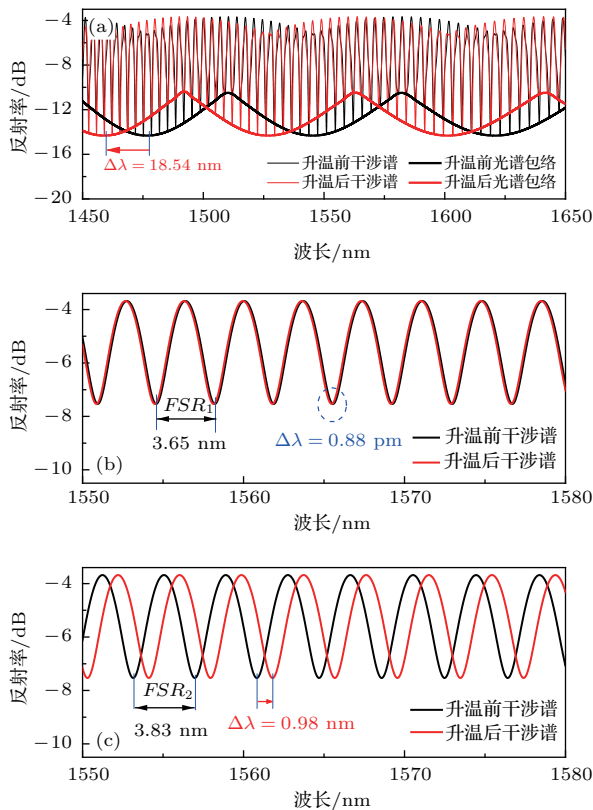


图2 (网刊彩色) 模拟计算得到的 (a) 级联 FPI, (b) 单一空气腔 FPI 和 (c) 单一玻璃腔 FPI 的温度响应特性

Fig. 2. (color online) Simulated temperature responses of FPIs based on (a) cascaded cavities, (b) single air-cavity, and (c) glass-cavity.

图2给出了模拟温度升高 100 °C 三光束干涉游标效应以及单一 FPI 的温度响应特性. 图2(a)显示, 温度变化导致的绝对光谱漂移量很小 (<100 pm), 但各谐振波长的光强变化很明显, 对光谱中极小值组成的包络进行三角函数拟合, 发现包络曲线发生了明显的漂移, 向短波长方向漂移了约 18.54 nm, 温度灵敏度约为 185.4 pm/°C. 图2(b)和图2(c)分别给出了单一空气腔和玻璃腔 FPI 的光谱变化, 温度变化 100 °C 引起的光谱漂移量分别为 0.88 pm 和 0.98 nm, 对应温度灵敏度分别为 0.008 pm/°C 和 9.8 pm/°C. 因此, 模拟计算结果证实了通过合理设置串联 FPI 的 FSR , 应用游标效应解调是提高温度传感测量灵敏度的有效方法.

3 实验装置及结果分析

图3为光纤温度传感实验装置示意图. 来自宽带光源(波长范围 1450—1650 nm)的输入光经过光纤环形器到达传感器. 传感器置于微型精密可调恒温控制系统中, 其温度控制精确度达 ±0.1 °C. 实验中光纤器件的温度从 15 °C 变化至 80 °C, 每次步进 5 °C. 传感器的反射光经光纤环形器输入给光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6370D), 实时记录传感器的干涉光谱. 实验中光谱分析仪的分辨率设置为 0.02 nm. 图3内插图图为光纤传感器件的显微镜照片, SMF 末端的毛细管内径为 50 μm、外径为 150 μm, 长度约为 332.29 μm, 大模场光纤的纤芯直径约为 11 μm, 长度约为 219.22 μm.

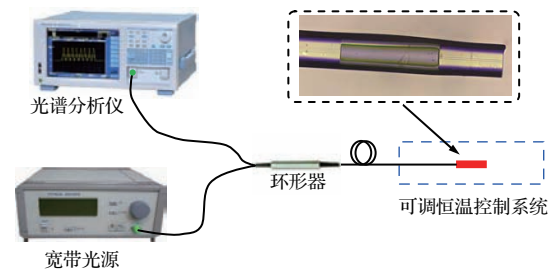


图3 (网刊彩色) 光纤温度传感实验装置示意图

Fig. 3. (color online) Experimental setup for temperature sensing.

图4给出了与毛细管相连的大模场光纤未切割时的反射光谱温度特性, 即由毛细管构成的单一空气腔 FPI 的反射光谱温度特性. 图4(a)显示了该干涉仪从 15 °C 升温至 80 °C 变化过程中的反射光谱(即典型的双光束干涉光谱). 可以看出, 随着

温度的升高,其反射光谱向长波长方向发生了微小的漂移.图4(a)内插图给出了15 °C和80 °C时干涉谱中1550 nm波长附近典型波谷的漂移情况,温度变化65 °C导致的光谱总漂移量约为46 pm.图4(b)给出了升温 and 降温两个过程中该波谷的中心波长漂移情况,利用线性函数拟合升温测量所得数据,相关系数 $R^2 = 0.9920$,意味着波谷中心波长漂移量与温度之间存在较好的线性关系,其斜率表征该波谷的温度灵敏度约为0.71 pm/°C,与上文分析的单一空气腔FPI温度灵敏度较低的结论相符.同时,对比升降温过程中同一温度下波谷的中心波长,可看出该传感头具有良好的重复性.

图5给出了大模场光纤切割后(如图3中插图所示)的反射光谱温度特性,即空气腔FPI与玻璃腔FPI串联形成三光束干涉光谱的温度特性.图5(a)显示串联FPI器件在不同温度下的反射光

谱.很明显,该光谱由高频条纹构成,且光谱随着温度的升高向长波长方向漂移.追踪1550 nm附近的谐振波谷,发现温度升高65 °C,其中心波长共漂移了约163 pm.图5(b)给出了升温 and 降温两个过程中该波谷的中心波长漂移情况.应用最小二乘法线性拟合,相关系数 $R^2 = 0.9680$,表明谐振波谷中心波长与温度之间存在良好的线性关系,其斜率表征温度灵敏度,约为2.51 pm/°C.升降温的测量数据表征该器件的干涉光谱具有良好的重复性.

根据上文的游标效应分析,对图5(a)中测得的不同温度下原始三光束叠加光谱的极小值进行函数拟合,得到一系列包络曲线,如图6(a)所示,其中插图给出了25 °C时的叠加光谱极小值拟合情况.可看出,原始光谱的极小值可用三角函数拟合,相关系数 $R^2 = 0.9510$.随着温度的升高,包络曲线向短波长方向发生明显漂移.温度变化65 °C

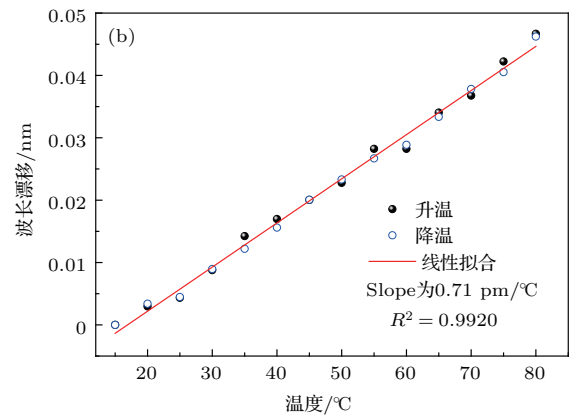
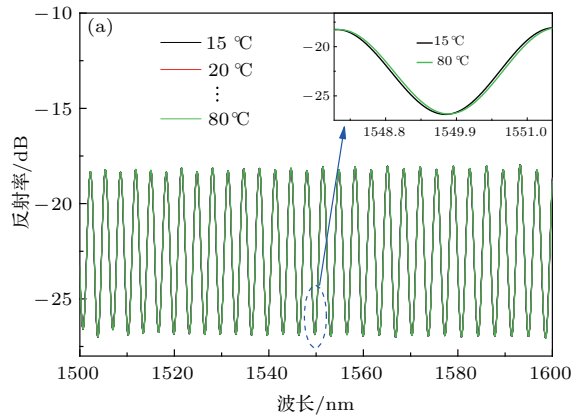


图4 (网刊彩色)单一空气腔FPI的反射光谱温度响应特性 (a)不同温度时的反射光谱;(b)谐振波长与温度的关系
Fig. 4. (color online) Response of single air-cavity FPI to temperature: (a) Reflection spectra at different temperature; (b) relationship between resonate wavelength and temperature.

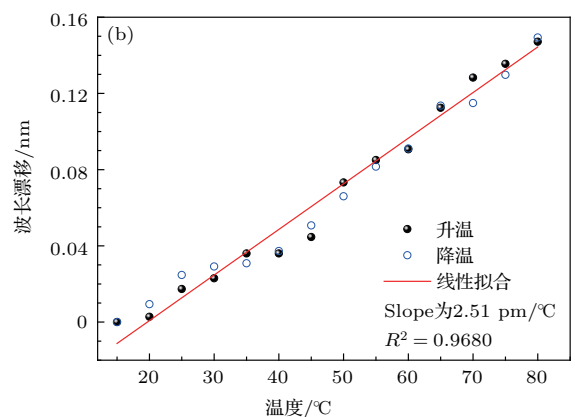
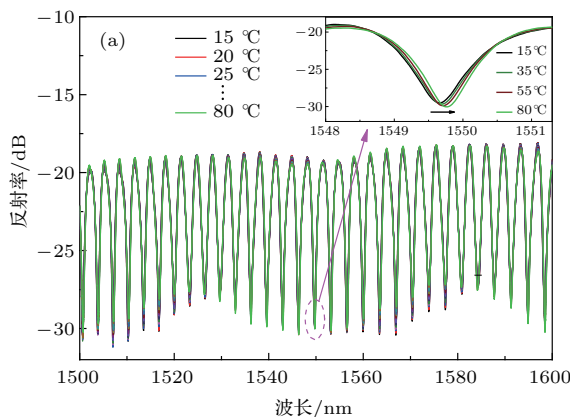


图5 (网刊彩色)串联FPI的反射光谱温度响应特性 (a)不同温度的反射光谱;(b)谐振波长与温度的关系
Fig. 5. (color online) Response of cascaded FPIs to temperature: (a) Reflection spectra at different temperature; (b) relationship between resonate wavelength and temperature.

导致的总漂移量大于 9 nm. 图 6 (b) 给出了追迹 1550 nm 附近的包络曲线波谷在不同温度下的中心波长随温度的漂移情况. 应用最小二乘法线性拟合, 获得相关系数 $R^2 = 0.9970$, 表明该波谷中心波长与温度之间存在良好的线性关系. 线性拟合函数的斜率表征游标效应解调的温度灵敏度, 其值约为 179.30 pm/°C, 与上文理论分析和模拟计算结果符合. 对比升降温测量的数据可看出该器件应用包络解调具有良好的重复性. 该温度灵敏度较之单一空气腔 FPI 所得灵敏度提高了 250 余倍^[25], 较之叠加光谱直接波长解调的灵敏度提高了 70 余倍, 同时该灵敏度也远高于曾报道的某些光纤马赫-曾德尔干涉仪 ($< 15 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)^[26,27]、FBG ($< 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)^[27,28]、长周期光纤光栅 ($< 12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$) 等^[29] 温度传感器.

最后, 我们将传感器置于高温炉测试了其高温响应特性. 该高温炉 (STG-40-17) 最高温可达

1100 °C, 温控不确定度为 $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. 图 7 (a) 给出了三种不同温度 (100 °C, 350 °C 和 550 °C) 下测量得到的典型干涉谱, 以及 100—550 °C 范围内不同温度干涉谱的包络拟合曲线. 很明显, 随着温度的升高, 包络曲线的波谷向短波长方向发生了漂移, 其总漂移量超过 80 nm. 受限于光谱仪的波长扫描范围, 更高温度的响应暂未测量. 图 7 (b) 给出了追踪波谷中心波长漂移量与温度 (含升温 and 降温过程) 的关系. 对比升温 and 降温的测量数据, 可知传感器在此温度范围内具有良好的重复性. 很明显, 波谷中心波长与温度之间不再存在严格的线性关系, 这可能与空气腔内气体在高温下发生热膨胀导致腔长发生明显变化有关. 应用二次多项式拟合, 得相关系数 $R^2 = 0.9978$. 因此, 该传感器经定标后仍适用于 100—550 °C 范围内的温度测量, 具有较好的高温响应特性.

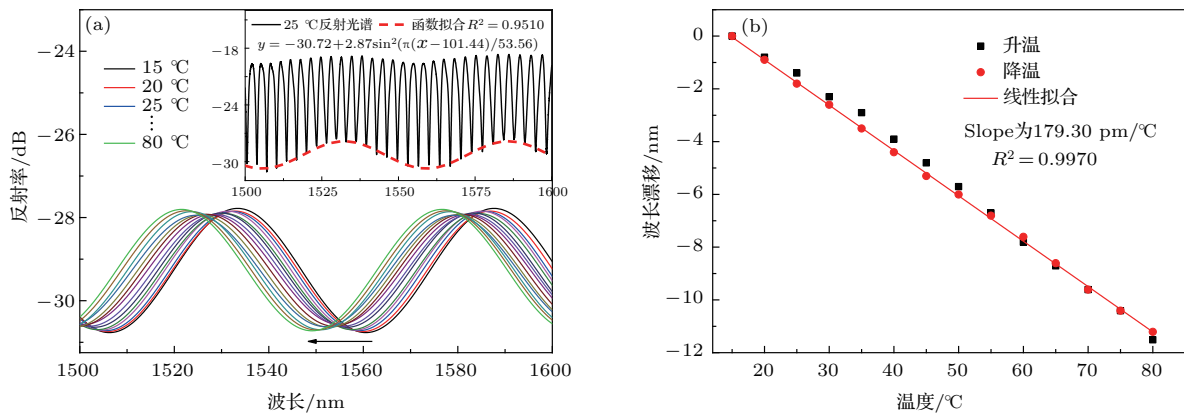


图 6 (网刊彩色) (a) 不同温度下干涉谱的包络拟合; (b) 拟合曲线波谷中心波长与温度的关系

Fig. 6. (color online) (a) Sinusoidal fitting results of the lower envelope curves in the reflection spectra; (b) calculated relative wavelength shift versus temperature.

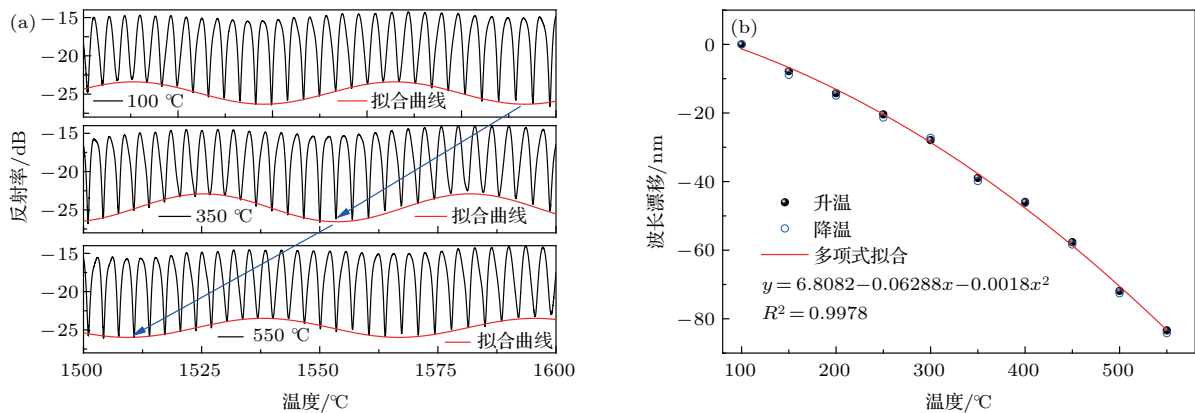


图 7 (网刊彩色) (a) 典型高温下传感器的干涉谱及其包络拟合; (b) 拟合曲线波谷中心波长与温度的关系

Fig. 7. (color online) (a) The typical reflection spectra and sinusoidal fitting results of the lower envelope curves at different temperatures; (b) calculated relative wavelength shift versus temperature.

4 结 论

本文介绍了一种结构紧凑、制备简单的探针反射型光纤温度传感器. 该传感器由一小段毛细管和大模场光纤依次熔接于 SMF 末端而构成串联 FPI 结构. 精确控制毛细管和大模场直径光纤的长度, 使得俩干涉仪具有相近的自由光谱区, 因而叠加光谱产生游标效应. 本文首先理论分析了利用游标效应提高传感器测量灵敏度的工作原理, 然后进行了模拟对比单一空气腔或玻璃腔 FPI 反射光谱直接波长解调与叠加光谱应用游标效应解调的温度灵敏度, 最后实验测试了传感器的温度响应特性. 实验结果显示, 利用游标效应解调是提高传感器灵敏度的一种有效方式, 利用该方法获得的温度灵敏度较之单一空气腔 FPI 提高了 25 倍多, 较之叠加光谱直接波长解调提高了 70 余倍. 该传感器结构紧凑 ($< 1 \text{ mm}$), 灵敏度高, 可应用于工业生产、生物医学等温度检测领域.

参考文献

- [1] Lee B 2003 *Opt. Fiber Technol.* **9** 57
- [2] Fu X H, Xie H Y, Yang C Q, Zhang S Y, Fu G W, Bi W H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 24211 (in Chinese) [付兴虎, 谢海洋, 杨传庆, 张顺杨, 付广伟, 毕卫红 2016 物理学报 **65** 24211]
- [3] Gui X, Hu C C, Xie Y, Li Z Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 050704 (in Chinese) [桂鑫, 胡陈晨, 谢莹, 李政颖 2015 物理学报 **64** 050704]
- [4] Miao Y P, Yao J Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044223 (in Chinese) [苗银萍, 姚建铨 2013 物理学报 **62** 044223]
- [5] Grattan K T V, Sun T 2000 *Optical Fiber Sensor Technology* (New York: Springer) p1
- [6] Islam M R, Ali M M, Lai M H, Lim K S, Ahmad H 2014 *Sensors* **14** 7451
- [7] Lee C L, Lee L H, Hwang H E, Hsu J M 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 149
- [8] Qi F, Hu L, Dong X, Xin Y, Zhao C L, Jin S, Chan J C C 2013 *IEEE Sensors J.* **13** 3468
- [9] Wang Y, Wang D N, Liao C R, Hu T, Guo J, Wei H 2013 *Opt. Lett.* **38** 269
- [10] Wang J J, Dong B, Lally E, Gong J M, Han M, Wang A B 2010 *Opt. Lett.* **35** 619
- [11] Chen L H, Li T, Chan C C, Menon R, Balamurali P, Shaillender M, Neu B, Ang X M, Zu P, Wong W C, Leong K C 2012 *Sens. Actuators B* **169** 167
- [12] Yu C B, Liu L, Chen X X, Liu Q F, Gong Y 2015 *Photon. Sens.* **5** 142
- [13] Ran Z L, Rao Y J, Liu W J, Liao X, Chiang K S 2008 *Opt. Express* **16** 2252
- [14] Tian J J, Lu Y J, Zhang Q, Han M 2013 *Opt. Express* **21** 6633
- [15] Wang R H, Qiao X G 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 245
- [16] Lu Y J, Han M, Tian J J 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 757
- [17] Dai D X 2009 *Opt. Express* **17** 23817
- [18] Jin L, Li M, He J J 2009 *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* Shanghai, China, November 2–6, 2009 pTUM4
- [19] Zhang P, Tang M, Gao F, Zhu B, Fu S, Ouyang J, Shum P P, Liu D 2014 *Opt. Express* **22** 19581
- [20] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z, Zou X, Luo B, Pan W, Yan L 2015 *Opt. Commun.* **336** 73
- [21] Yu Y, Chen X, Huang Q, Du C, Ruan S, Wei H 2015 *Appl. Phys. B* **120** 461
- [22] Lee B H, Kim Y H, Park K S, Eom J B, Kim M J, Rho B S, Choi H Y 2012 *Sensors* **12** 2467
- [23] Liao C R, Hu T Y, Wang D N 2012 *Opt. Express* **20** 22813
- [24] Quan M, Tian J, Yao Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 4891
- [25] Ma J, Ju J, Jin L, Jin W, Wang D 2011 *Opt. Express* **19** 12418
- [26] Jasim A A, Harun S W, Arof H, Ahmad H 2013 *IEEE Sensors J.* **13** 626
- [27] Zhou Y, Zhou W, Chan C C, Wei C W, Shao L Y, Cheng J, Dong X 2011 *Opt. Commun.* **284** 5669
- [28] Li L, Zhang G, Liu Y, Bi L, Jiang L, Li Y, Yao J, Gao C, Zhang Y, Khan A R, Ma Q 2015 *Asia Communications and Photonics Conference* Hong Kong, China, November 19–23, 2015 pASu2A.50
- [29] Zhu Y, Shum P, Bay H W, Yan M, Yu X, Hu J, Hao J, Lu C 2005 *Opt. Lett.* **30** 367

Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect*

Yang Yi Xu Ben[†] Liu Ya-Ming Li Ping Wang Dong-Ning Zhao Chun-Liu

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(Received 9 November 2016; revised manuscript received 21 December 2016)

Abstract

Fiber-optic temperature sensors have gained much attention owing to their intrinsic features of light weight, immunity to electromagnetic interference, and capability for distributed measurement. Especially, temperature sensors based on Fabry-Perot interferometers (FPIs) are attractive owing to their advantages of compact size and convenient reflection measurement. However, due to the low thermal expansion or/and thermo-optic coefficient of fiber, the temperature sensitivities of these sensors are normally low (~ 10 pm/ $^{\circ}$ C or even lower). In order to improve the temperature sensitivity, a device with dual cascaded FPIs is proposed and demonstrated in this paper, which works on vernier effect and exhibits a much higher temperature sensitivity. The device is fabricated by splicing a short segment of large mode area (LMA) fiber to a short segment of capillary tube fused with a section of single-mode fiber to form an extrinsic Fabry-Perot interferometer with a glass cavity cascaded to an intrinsic FPI with a narrow air cavity. By setting the lengths of capillary tube and LMA fiber to allow similar free spectral ranges to be obtained, and superimposing of the reflection spectra of the two FPIs, the vernier effect can be generated. Firstly, the principle of temperature sensing based on vernier effect of this device is analyzed and simulated theoretically, and it is found that the temperature sensitivity can be improved significantly by using vernier effect compared with that of a single FPI with an air-cavity or glass cavity by directly tracing resonant dips/peaks. Then, the temperature responses of the FPI with single air-cavity and dual cascaded cavities are measured, respectively. Experimental results match well with the theoretical analysis carried out. The temperature sensitivity of the proposed sensor is improved greatly from 0.71 pm/ $^{\circ}$ C for a single FPI sensor with an air-cavity to 179.30 pm/ $^{\circ}$ C by employing the vernier effect. Additionally, the sensor exhibits good repeatability in a temperature range of 100–500 $^{\circ}$ C. The proposed sensor has the advantages of compact size (< 1 mm in dimension) and high sensitivity, which makes it promising for temperature sensing in a variety of industries, such as food inspection, pharmacy, oil/gas exploration, environment, and high-voltage power systems.

Keywords: fiber optic sensors, Fabry-Perot interferometer, vernier effect, temperature

PACS: 42.81.Pa, 07.60.Ly, 07.60.Vg, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.66.094205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61405184) and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. LY17F050010).

[†] Corresponding author. E-mail: xuben@cjlu.edu.cn