

文章编号: 0253-2239(2009)07-1790-06

# 基于光子晶体光纤法布里-珀罗干涉仪的温度自补偿折射率计

邓 明<sup>1</sup> 饶云江<sup>1,2</sup> 朱 涛<sup>1,2</sup> 段德稳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044  
<sup>2</sup>成都电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 采用手动熔接实芯光子晶体光纤和普通单模光纤制作本征法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉传感器的方法, 提出了一种可实现温度自补偿的高灵敏度折射率计。理论与实验表明, 新型 F-P 干涉传感器的对比度不受环境温度影响只随着外界折射率的变化而变化, 当外界折射率在 1.32~1.44 范围内变化时, 其折射率灵敏度约为 4.59/RIU, 分辨率约为  $2 \times 10^{-5}$ 。此外, 该传感器的腔长具有较高的温度灵敏度, 在 20~100℃ 范围内, 其温度灵敏度为 18.72 nm/℃。因此, 可以通过同时监测该传感器对比度和腔长的变化就可以实现折射率和温度的同时测量, 在实际工业应用中具有广泛的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 折射率测量; 温度补偿; 法布里-珀罗干涉仪; 光子晶体光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1790

## Refractive-Index Sensor Based on Photonic Crystal Fiber Fabry-Pérot Interferometer with Self Temperature Compensation

Deng Ming<sup>1</sup> Rao Yunjiang<sup>1,2</sup> Zhu Tao<sup>1,2</sup> Duan Dewen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China

<sup>2</sup>Key Laboratory Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies of Education Ministry of China, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** A novel fiber-optic Fabry-Pérot refractive-index sensor is proposed, which is formed by a section of endlessly single-mode photonic crystal fiber (EPCF) and conventional single-mode fiber. The theoretical and experimental results show that the refractive-index measurement based on the fringe visibility is independent of temperature change, and the refractive-index resolution and sensitivity are about  $2 \times 10^{-5}$  and 4.59/RIU, respectively, when the refractive index of the environment is in the range of 1.32~1.44. In addition, such a sensor can be used as an excellent temperature sensor with a cavity-length-temperature sensitivity of 18.72 nm/℃ with temperature ranging from 20℃ to 100℃. Therefore, simultaneous measurement of refractive index and temperature can be realized by determination of the fringe visibility and the cavity length change of such an EPCF-based IFPI, respectively. It provides a practical way to measure refractive index with self temperature compensation.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensors; refractive-index measurement; temperature compensation; Fabry-Pérot interferometer; photonic crystal fiber

收稿日期: 2008-09-04; 收到修改稿日期: 2008-11-21

**基金项目**: 国家自然科学基金重点基金及青年基金(60537040, 60807019), 重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)和重庆大学创新能力培育基金资助课题。

**作者简介**: 邓 明(1979-), 女, 博士研究生, 主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。

E-mail: dengmingming888@163.com

**导师简介**: 饶云江(1962-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu.edu.cn (通信联系人)

## 1 引言

光纤法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 干涉传感器凭借其抗电磁干扰能力强、精度高、稳定性好、可靠性好、分辨率高等优势, 现已被广泛用于测量应变、压力、振动、加速度、温度、超声波等物理量<sup>[1-8]</sup>。特别是, 由于它体积小、灵敏度高、测量范围广、响应速度快、多参数测量等独特优势, 近年来在折射率测量领域越来越受到人们的关注。光纤 F-P 干涉传感器分为非本征型和本征型两种<sup>[9]</sup>。非本征型光纤 F-P 干涉传感器干涉腔是空气腔, 不同折射率的气体或者液体进入空气腔的时候, 光传播相位就会发生变化, 在光谱仪上表现为波长的漂移。因此, 可以利用 F-P 波长干涉法测量气体/液体的折射率<sup>[10-13]</sup>。然而, 非本征 F-P 干涉传感器的波长也会随着周围环境温度的变化而变化, 这样导致了温度交叉敏感效应, 不能进行折射率的绝对测量, 降低了测量的准确性和可靠性。此外, 这些折射率计的测量系统复杂、误差大、分辨率低、在实际应用中受到限制。

本文提出了一种基于本征 F-P 干涉仪的新型高灵敏度折射率计。该折射率计不仅能解决折射率测量中的温度串扰问题, 而且具有制作简单、成本低、强度好、精度高、重复性好等优点。

## 2 理论分析

新型本征 F-P 干涉传感器 (IFPI) 的结构示意图如图 1 所示, 折射率为  $n_{\text{EPCF}}$  的光子晶体光纤的一端熔接在折射率为  $n_{\text{SMF1}}$  的单模光纤上, 另一端熔接在折

射率为  $n_{\text{SMF2}}$  的单模光纤上以阻止折射率为  $n_{\text{Liq}}$  的待测液体进入光子晶体光纤的空气孔中, 光子晶体光纤的长度为  $L_1$ , 末端单模光纤的长度为  $L_2$ 。

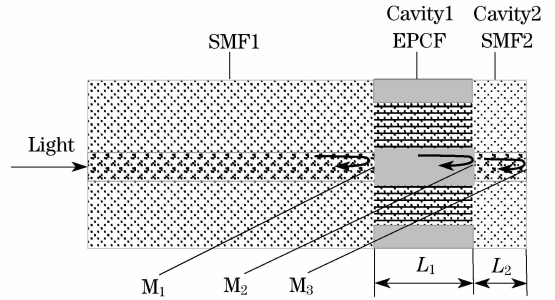


图 1 基于光子晶体光纤的本征 F-P 传感器的结构示意图  
Fig. 1 Configuration of the EPCF-based IFPI sensor

从图 1 可以看出, 该传感器具有三个反射面, 分别为  $M_1, M_2, M_3$ 。  $M_1$  和  $M_2$  构成了一个基于光子晶体光纤的 F-P 腔 (Cavity1), 腔长为  $L_1$ ;  $M_2$  和  $M_3$  构成了一个基于单模光纤的 F-P 腔 (Cavity2), 腔长为  $L_2$ ;  $M_1$  和  $M_3$  构成了一个包含光子晶体光纤和单模光纤的最大 F-P 腔, 腔长为  $L_1 + L_2$ 。三个面的能量反射率分别为  $R_1, R_2$  和  $R_3$ , 其值分别为

$$\begin{aligned} R_1 &= \left( \frac{n_{\text{SMF1}} - n_{\text{EPCF}}}{n_{\text{SMF1}} + n_{\text{EPCF}}} \right)^2, \\ R_2 &= \left( \frac{n_{\text{SMF2}} - n_{\text{EPCF}}}{n_{\text{SMF2}} + n_{\text{EPCF}}} \right)^2, \\ R_3 &= \left( \frac{n_{\text{SMF2}} - n_{\text{Liq}}}{n_{\text{SMF2}} + n_{\text{Liq}}} \right)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

由于这三个面的反射率都比较小, 根据双光束干涉理论可得输出光强为

$$I_{\text{Rtotal}}(\lambda) = E_r^2 = I_0 \left[ \begin{aligned} &R_1 + (1 - \alpha_1)^2 (1 - R_1)^2 R_2 + (1 - \alpha_1)^2 (1 - \alpha_2)^2 (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 R_3 + \\ &2 \sqrt{R_1 R_3} (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) (1 - R_1) (1 - R_2) \cos[2(\Phi_1 + \Phi_2)] + \\ &2 \sqrt{R_2 R_3} (1 - \alpha_1)^2 (1 - \alpha_2) (1 - R_1)^2 (1 - R_2) \cos(2\Phi_2) + \\ &2 \sqrt{R_1 R_2} (1 - \alpha_1) (1 - R_1) \cos(2\Phi_1) \end{aligned} \right], \quad (2)$$

其中  $I_0$  为输入光强,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为面 1 和面 2 的传输损耗, 主要是由于模式不匹配和熔接面不平所引起的。  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  为传播相位差, 其值分别为

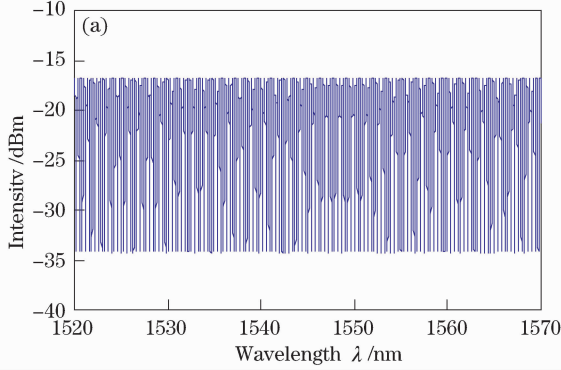
$$\Phi_1 = \frac{2\pi n_{\text{EPCF}} L_1}{\lambda}, \quad \Phi_2 = \frac{2\pi n_{\text{SMF2}} L_2}{\lambda}. \quad (3)$$

(2) 式表明: 该传感器包含了三个不同腔长的 F-P 腔, 其输出的干涉信号是这三个腔的干涉信号的线性叠加。如果将该传感器用于测量外界物理量的时候, 无疑大大增加了后续信号处理

的难度且严重降低了测量的准确性和可靠性。由于光子晶体光纤具有传输损耗低, 无限单模传输等优点, 所以希望基于光子晶体光纤的 F-P 腔占主导地位, 即  $L_1 \gg L_2$ 。此外, 还可以看出, 在腔长和外界折射率一定的情况下, 输出的干涉信号主要是由  $M_1$  和  $M_2$  的反射率决定。当光子晶体光纤的折射率  $n_{\text{EPCF}}$  与末端单模光纤的折射率  $n_{\text{SMF2}}$  相近的时候,  $M_2$  的反射率非常小, 即  $M_1$  的反射率  $R_1$  远大于  $M_2$  的反射率  $R_2$ , 此时  $M_2$  反射

的光信号非常弱以至于不能和其它两个面的反射光信号进行干涉,也就是说在理论计算输出光强的过程中  $M_2$  可以被忽略,因此归一化的输出光强可以简化为

$$I_R(\lambda) = \{R_1 + (1 - \alpha_1)^2(1 - \alpha_2)^2(1 - R_1)^2 R_3 + 2\sqrt{R_1 R_3}(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - R_1) \times \cos[2(\Phi_1 + \Phi_2)]\} I_0. \quad (4)$$



根据(4)式计算了该传感器在空气中的归一化输出光强,其中  $I_0 = 1 \text{ mW}$ ,  $L_1 = 2.34 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 20 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n_{\text{SMF2}} = 1.444$ ,  $n_{\text{Liq}} = 1.0$ ,  $\alpha_1 = 0.5$ ,  $\alpha_2 = 0.1$  (主要由两种光纤模式不匹配所引起的损耗),  $R_1 = 0.004$ , 结果如图 2 所示。可以看出,该传感器的输出干涉谱非常平整、光滑,使得后续的信号处理更加容易,测量的准确性、可靠性更高。

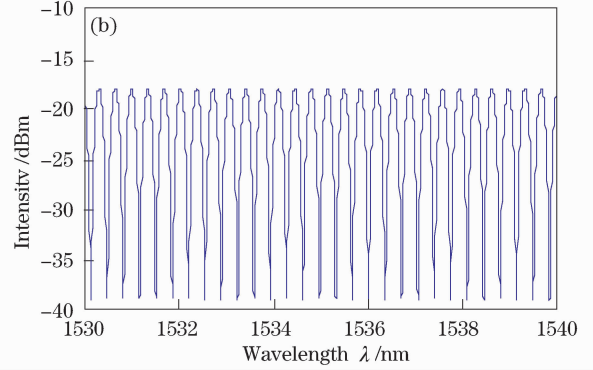


图 2 (a) 理论计算的基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器的干涉谱; (b) 10 nm 波段内的干涉谱

fig. 2 (a) Interference spectrum calculated for an EPCF-based IFPI sensor; (b) close-up of the interference spectrum

从(4)式可以看出,任何能够引起该本征 F-P 腔的折射率和腔长变化的外界因素都会引起光传播相位的变化从而导致输出光强的变化。由于光子晶体光纤具有较高的热光系数和热膨胀系数,因此该传感器可以被用来测量外界环境温度的变化。根据反射谱线的快速傅里叶变换,该传感器的腔长为

$$L_{\text{F-P}} = \frac{k}{2nN\delta\nu} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N-1), \quad (5)$$

其中  $N$  为快速傅里叶变换的采样点数,  $k$  为快速傅里叶变换极大值下标,而  $\delta\nu = \delta\lambda/\lambda^2$ 。

此外,(4)式还表明,该传感器的归一化输出光强在  $\Phi_1 + \Phi_2$  分别等于  $2m\pi$  和  $(2m+1)\pi$  ( $m$  为整数)的时候达到最大值与最小值,即

$$I_{R_{\text{max}}}(\lambda) = [R_1 + (1 - \alpha_1)^2(1 - \alpha_2)^2(1 - R_1)^2 R_3 + 2\sqrt{R_1 R_3}(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - R_1)] I_0, \\ I_{R_{\text{min}}}(\lambda) = [R_1 + (1 - \alpha_1)^2(1 - \alpha_2)^2(1 - R_1)^2 R_3 - 2\sqrt{R_1 R_3}(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - R_1)] I_0. \quad (6)$$

根据(6)式,可以得到干涉条纹的对比度为

$$V = \frac{I_{R_{\text{max}}} - I_{R_{\text{min}}}}{I_{R_{\text{max}}} + I_{R_{\text{min}}}} = \frac{2\sqrt{R_1}(1 - R_1)(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \left( \frac{n_{\text{Liq}} - n_{\text{SMF2}}}{n_{\text{Liq}} + n_{\text{SMF2}}} \right)}{R_1 + (1 - \alpha_1)^2(1 - \alpha_2)^2(1 - R_1)^2 \left( \frac{n_{\text{Liq}} - n_{\text{SMF2}}}{n_{\text{Liq}} + n_{\text{SMF2}}} \right)^2}, \quad (7)$$

由于(7)式中的  $\alpha_1, \alpha_2, R_1$  和  $n_{\text{SMF2}}$  都是常数,因此从理论上可以通过监测第  $m$  阶干涉级次的条纹对比度测量外界液体的折射率。此外,还可以看出,干涉条纹的对比度不受外界环境温度的影响,因此就可以通过分别测量该传感器腔长变化和对比度变化实现温度和折射率的同时测量。

### 3 传感器的制作

实验选取的光子晶体光纤为 Crystal Fiber 公司生产的折射率导光型光子晶体光纤 (ESM-12-01)。图 3 为折射率导光型光子晶体光纤的横截面,截面可以分为包层区和纤芯区,在包层区,均匀的圆空气柱在石英衬底上按蜂窝列形成周期性结构,芯层为一个石英圆柱,其外包层直径为  $125 \text{ }\mu\text{m}$ ,纤芯直径为  $12 \text{ }\mu\text{m}$ ,相对孔径  $d/\Lambda = 0.46$ 。由于光子晶体光纤的熔融温度取决于硅层的绝对厚度和空气孔的尺寸,所以当空气孔所占面积比较大的时候就需要一个比较低的熔接能量<sup>[14~15]</sup>。因此,如果采用传统的熔接单模光纤与单模光纤的方法去熔接单模光纤与光子晶体光纤,就会使得光子晶体光纤的空气孔塌陷,破坏了光在光子晶体光纤内的传输路径从而增加耦合损耗。为了把光子晶体光纤空气孔塌陷的数量降到最低,采取了两种措施,一是减小放电能量和延长放电时间,二是引入一个偏移量,即将光子晶体光纤远离电弧放电的中心轴线,确保较少的热

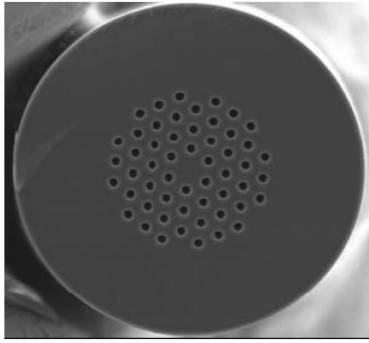


图 3 折射率导光型光子晶体光纤横截面

Fig. 3 Cross section of TIR-PCF

量加载到光子晶体光纤上。实验选用的熔接机是 Furukawa S176, 选取的熔接电流为 45 mA, 预放电时间为 170 ms, 放电时间为 800 ms。制作过程为: (1) 将一端切平的光子晶体光纤置于熔接机中, 且使光子晶体光纤远离电弧放电中心轴线 25 μm; (2) 将光子晶体光纤熔接到折射率为 1.46 的单模光纤 (Corning: SMF-28) 上; (3) 利用光纤切割刀切去多余的光子晶体光纤, 保留设计腔体的长度; (4) 将光子晶体光纤切好的另一端与折射率为 1.444 的单模光纤 (Corning: SMF-28e) 熔接在一起; (5) 利

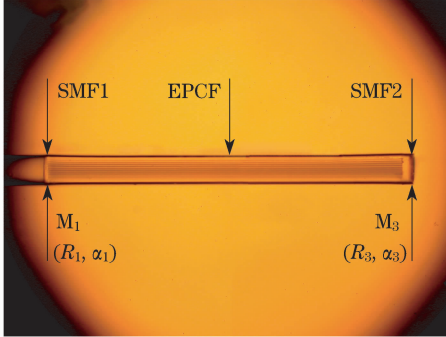


图 4 基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器

Fig. 4 Photograph of the EPCF-based IFPI sensor

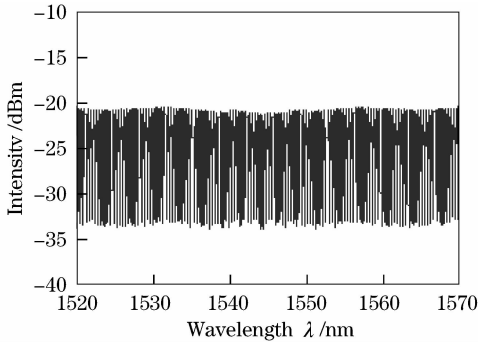


图 5 基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器在空气中的干涉谱

Fig. 5 Interference spectrum of the EPCF-based IFPI sensor in air

用飞秒激光将该单模光纤切至几十微米, 使其形成一个非常薄的保护层, 阻止待测液体进入光子晶体光纤的空气孔中。图 4 是基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器的光学显微照片, 其腔长为 2.34 mm, 保护层的厚度为 20 μm。图 5 是该传感器的干涉谱。从图中可以看出, 该干涉谱在整个波段范围内非常平整、光滑, 这主要是由于保护层单模光纤的长度远远小于光子晶体光纤的长度且两种光纤的折射率差非常小, 所以它对该传感器信号的影响可以被忽略, 这与前面理论分析结果完全一致。此外, 由于光子晶体光纤的低传输损耗, 例如, 在 1550 nm 波长处, 损耗为 0.8 dB/km, 即使这种 F-P 腔的长度达到几厘米, 都会具有较好的条纹对比度和较高的信噪比, 这样就使得制作本征 F-P 干涉传感器更加容易了。

### 4 实验结果及分析

首先研究了基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器的折射率特性, 实验装置如图 6 所示。从宽带光源发出的光经 2×1 耦合器后进入本征 F-P 干涉传感器, 从传感器反射回来的信号再通过耦合器进入光谱分析仪, 然后通过计算机进行数据采集和处理。根据溶液浓度与折射率的关系配制了不同折射率的甘油水溶液, 其折射率变化范围为 1.33~1.474。将带有 20 μm 保护层的光纤本征 F-P 干涉传感器分别垂直浸入不同折射率的甘油水溶液中, 每次测量前必须用清水洗净传感头且将其烘干, 观察光谱分析仪上的干涉谱, 当其恢复到初始状态的时候才可以进行新的测量。实验选取了 1545~1550 nm 波段范围内的十三个干涉条纹的平均对比度测量待测液体的折射率。在此波段内光纤本征 FP 传感器的干涉谱如图 7 所示。可以看出, 该波段内干涉条纹很平整、规则, 在空气中对比度达到了 0.869。通过计算可知, 这十三个干涉条纹的对比度与平均对比度的最大偏差仅为 0.015, 这样小的误差对测量结果造成的影响可以被忽略。

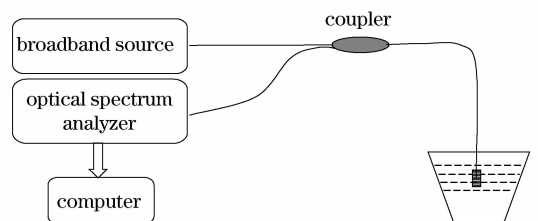


图 6 折射率测量实验装置图

Fig. 6 Experimental setup for RI measurement

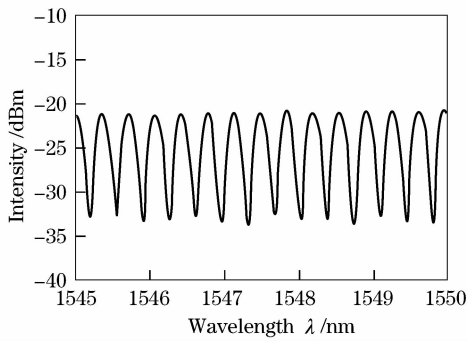


图 7 用于测量液体折射率的干涉谱

Fig. 7 Close-up displays of the fringes for measuring

RI of liquid

根据(7)式,选取  $R_1 = 0.004$ ,  $\alpha_1 = 0.5$ ,  $\alpha_2 = 0.1$ ,  $n_{\text{SMF2}} = 1.444$ , 理论计算了基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器在不同折射率甘油溶液中的对比度,并将理论结果与实验结果相比较,如图 8 所示。从图中可以看出,(1) 实验结果和理论结果吻合得很好,两者之间的微小差异主要源于对单模光纤和光子晶体光纤的熔接损耗估算;(2) 实验所选取光谱仪的对比度分辨率为  $0.001\text{dB}$ ,因此该传感器的折射率测量分辨率约为  $2 \times 10^{-5}$ ;(3) 在  $1.33 \sim 1.444$  的折射率范围内,干涉条纹的对比度随着待测液体折射率的增加而线性减小,对比度的减小量为  $0.535$ ,因此其折射率灵敏度约为  $4.59/\text{RIU}$ ,此外,在此范围内,每次测量结果与三次测量结果平均值的最大误差为  $\pm 0.0027$ ,因此该传感器折射率测量的重复率为  $\pm 0.5\% \text{FS}$ ;(4) 在  $1.444 \sim 1.45$  的折射率范围内,干涉条纹的对比度随着待测液体折射率的增加而增加,在  $n_{\text{liq}} \approx 1.444$  出现拐点主要是用于相位突变所引起的。

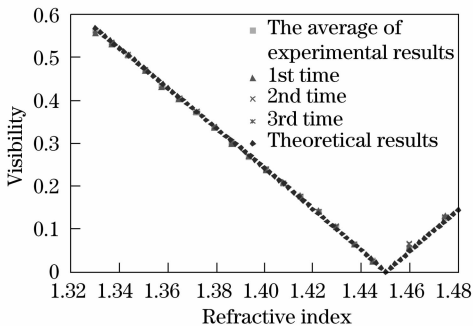


图 8 基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器对比度与折射率关系图

Fig. 8 Relationship between refractive index and visibility of the EPCF-based IFPI sensor

再对新型基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器的温度特性作研究,实验用的本征 F-P 干涉

传感器为折射率实验用过的传感器,传感器表面不作任何处理,直接将传感器一端固定好使其垂直悬空在温度箱(SDJ402)中。控制温度箱,使温度从  $20^\circ\text{C}$  上升到  $100^\circ\text{C}$  然后再下降到  $20^\circ\text{C}$ ,每升  $10^\circ\text{C}$  采集一次数据,这样重复两个循环。用光谱分析仪观察干涉条纹的变化情况,并采集数据,最后进行分析得出基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器的腔长随温度变化的关系,如图 9 所示。由图 9 可见,在  $20 \sim 100^\circ\text{C}$  的温度范围内,腔长的变化量随着温度的升高而线性增加,增加了  $1490\text{ nm}$ ,其灵敏度为  $18.72\text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,没有迟滞现象,每次测量结果与四次测量结果平均值的最大误差为  $\pm 2.03\text{ nm}$ ,因此该传感器温度测量的重复率为  $\pm 0.13\% \text{FS}$ ,表现出良好的温度特性。最重要的是,在整个升温降温过程中,该传感器条纹的对比度基本保持不变,如图 10 所示,这和理论分析完全一致。因此,可以通过分别测量该传感器腔长变化和对比度实现温度和折射率的双参数同时测量。

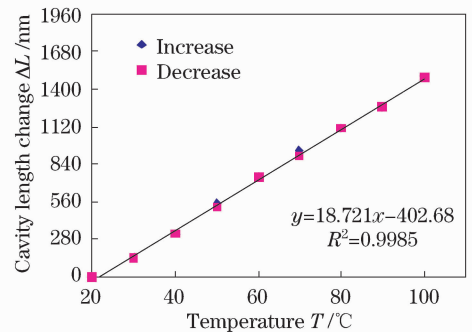


图 9 基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器腔长变化量与温度的关系图

Fig. 9 Relationship between temperature and cavity length change of the EPCF-based IFPI sensor

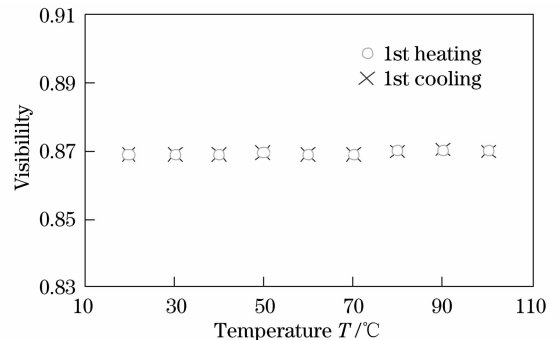


图 10 基于光子晶体光纤的本征 F-P 干涉传感器对比度与温度的关系图

Fig. 10 Relationship between temperature and visibility of the EPCF-based IFPI sensor

## 5 结 论

通过手动熔接实芯光子晶体光纤与普通单模光纤,首次制作出了一种可同时测量温度和折射率的高灵敏度本征 F-P 折射率传感器。理论分析了该传感器的工作原理并实验研究了其折射率特性和温度特性。实验结果表明,在 20~100℃ 范围内,该传感器具有良好的温度响应特性,其腔长变化量对温度的灵敏度为 18.72 nm/℃,重复率为 ±0.13%FS。然而,在整个折射率范围内,该传感器的条纹对比度随着液体折射率的增加而非线性的变化,但其不受外界环境温度的影响。在 1.33~1.444 的折射率范围内,干涉条纹的对比度随着待测液体折射率的增加而线性减小,测量灵敏度约为 4.59/RIU,分辨率为  $2 \times 10^{-5}$ ,重复率为 ±0.5%FS。因此,该传感器具有制作简单、成本低、测量范围广、精度高、温度补偿、重复性好、可靠性高等优点,在工业应用中具有较大的潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 YunJiang Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**: 227~237
- 2 Xiaopei Chen, Fabin Shen, Zhuang Wang *et al.*. Micro-air-gap based intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(30): 7760~7765
- 3 Zhengyu Huang, Yizheng Zhu, Xiaopei Chen *et al.*. Intrinsic Fabry-Perot fiber sensor for temperature and strain measurements[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2403~2405
- 4 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensing system based on optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):183~186  
江 建,饶云江,冉曾令等. 光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统[J]. *光学学报*, 2004,**24**(2):183~186
- 5 Juncheng Xu, Xingwei Wang, Kristie L. Cooper *et al.*. Miniature temperature-insensitive Fabry-Perot fiber-optic pressure sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(10): 1134~1136
- 6 Y. J. Rao, M. Deng, D. W. Duan *et al.*. Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 14123~14128
- 7 John F. Dorigi, Sridhar Krishnaswamy, Jan D. Achenbach. Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1995, **42**(5), 820~824
- 8 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):17~20  
段德稳,朱 涛,饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):17~20
- 9 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/CWDM of Large Number of Fiber-Optic F-P Sensors Based on Chirped Fiber Bragg Gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631~635  
饶云江,周昌学,冉曾令等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器的波分频分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 631~635
- 10 Rao Yunjiang, Mo Qiuju, Zhu Tao. A novel-high sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):264~268  
饶云江,莫秋菊,朱 涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):264~268
- 11 Yang Xiufang, Wang Xiaoming, Gao Zonghai *et al.*. Research on liquid concentration real-time detecting system based on Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1343~1346  
杨秀芳,王小明,高宗海等. 基于法布里-珀罗干涉仪的液体浓度实时检测系统的研究[J]. *光学学报*, 2005,**25**(10):1343~1346
- 12 Wei Renxuan, Jiang Desheng. Refractive index measurement with Fabry-Perot interference wavelength[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):551~554  
魏仁选,姜德生. 基于 F-P 干涉波长的折射率测量[J]. *中国激光*, 2003,**30**(6):551~554
- 13 G. Z. Xiao, A. Adnet, Z. Y. Zhang *et al.*. Monitoring changes in the refractive index gases by means of a fiber optic Fabry-Perot interferometer sensor [J]. *Sensors & Actuators A*, 2005, **118**: 177~182
- 14 Joo Hin Chong, M. K. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2003,**11**(12): 1365~1370
- 15 L. M. Xiao, M. S. Demokan, W. Jin *et al.*. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2007, **25**(11):3563~3574