

文章编号: 0253-2239(2008)01-0017-04

基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤 法布里-珀罗干涉应变传感器

段德稳 朱 涛¹ 饶云江^{1,2} 杨晓辰¹

¹重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

²电子科技大学通信与信息工程学院宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 报道了一种用空芯光子晶体光纤制作的法布里-珀罗腔体, 利用光纤熔接方法将该法布里-珀罗腔体和两根普通通信单模光纤熔接起来构成的微型光纤法布里-珀罗干涉应变传感器。这种干涉传感器制作过程仅应用了切割和熔接手段, 光纤材料单一, 因此受温度变化的影响小。另外, 该类型传感器的干涉腔长度对干涉信号强度影响不大, 其干涉腔长度可至数厘米。因此, 这类传感器将在大容量、准分布式传感系统中具有极大的潜在应用价值。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 光子晶体光纤; 法布里-珀罗腔; 熔接; 应变

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

A Miniature Extrinsic Fabry-Pérot Interferometer Strain Sensor Based on Hollow-Core Photonic Crystal Fiber

Duan Dewen¹ Zhu Tao¹ Rao Yunjiang^{1,2} Yang Xiaochen¹

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Education Ministry of China,
Chongqing University, Chongqing 400044, China

² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies, Education
Ministry of China, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer (EFPI) sensor based on photonic crystal fiber with very low temperature sensitivity is fused by using a simple welding method, which can effectively reduce the cross sensitivity between strain and temperature. And the transmission loss of the HCPCF is very low that allows the cavity length to be as long as several centimeters with good visibility. That makes the sensors may find its application in quasi-distributed sensing.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; photonic crystal fiber; Fabry-Pérot cavity; welding; strain

1 引 言

相对于普通传感器, 光纤传感器具有许多独特的优点, 比如结构简单、分辨力高、精度高、体积小、测量范围广、不怕电磁干扰等, 已被大量应用于复合材料、军民大型建筑结构、宇航飞行器、飞机等的结构状态监测, 以实现所谓的智能结构^[1~3]。非本征型光纤法布里-珀罗 (EFPI) 干涉传感器是光纤传感器的重要一类, 它具有光纤传感器的所有优

点^[4~6], 但在实际应用过程中, 存在的一些问题影响了它的进一步广泛应用: (1) 传统非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪的测量会受温度变化的影响, 这将导致传感器被测参量之间的交叉影响, 从而影响测量精度; (2) 传统非本征型光纤法布里-珀罗仪腔长不能太长, 太长会严重影响干涉条纹的对比度, 不利于传感信号的提取, 这就会极大地影响非本征型光纤法布里-珀罗仪的大规模复用^[6,7]。

收稿日期: 2007-02-09; 收到修改稿日期: 2007-06-22

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(60537040)资助课题。

作者简介: 段德稳(1981-), 男, 湖北恩施州人, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤器件方面的研究。

E-mail: ddw99@126.com

导师简介: 饶云江(1962-), 男, 云南宝山人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信及传感方面的研究。

E-mail: yjr@scu.edu.cn

为了克服传统非本征型光纤法布里-珀罗仪存在的这两个弱点,本文提出了一种新颖的微小型非本征型光纤法布里-珀罗传感器结构,即采用一段空芯光子晶体光纤(PCF)作法布里-珀罗腔体,利用最简单的光纤熔接方法将该法布里-珀罗腔体和两根普通通信单模光纤熔接起来,与空芯光子晶体光纤熔接处的通信单模光纤的两个端面分别形成法布里-珀罗腔的两个反射面。为进一步提高这种非本征型光纤法布里-珀罗仪的信号强度,文中提出在相应单模光纤端面镀 Ti_2O_3 膜的方法。这种非本征型光纤法布里-珀罗传感器整个制作过程只有光纤切割和光纤熔接过程,空芯光子晶体光纤由单一材料构成,温度变化时不会引起材料热膨胀系数之间的失配,因此这种传感器受温度变化的影响小。另外,这种传感器的干涉腔体就是空芯光子晶体的纤芯,干涉过程的损耗只有光纤光子晶体光纤与标准单模光纤熔接点的传输损耗,它的干涉腔体可长至数厘米。因此,这类传感器将在大容量、准分布式传感系统中具有极大的应用潜力。

2 新型非本征型光纤法布里-珀罗传感器结构及原理

新型非本征型光纤法布里-珀罗传感器的结构如图 1 所示。它的制作过程为:(1) 首先用光纤切割刀切割两根普通单模光纤(SMF),保护好切割端面;(2) 切割好一段空芯光子晶体光纤的一个端面(空芯光子晶体的端面如图 2 所示,纤芯直径为 $10.9 \mu\text{m}$),并用普通光纤熔接机将一根普通单模光纤和空芯光子晶体光纤已切割好端面的一端进行熔接,熔接方法为降低放电能量,延长放电时间,这样可以保证熔接损耗降至 1 dB 以下;(3) 利用光纤切割刀切去多余的光子晶体光纤,保留设计腔体长度

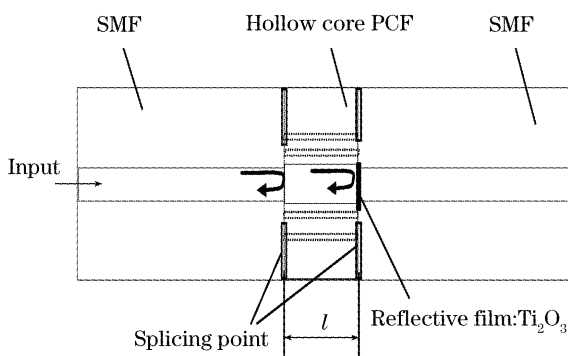


图 1 熔接型非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪结构
Fig. 1 Configuration of a fused extrinsic Fabry-Pérot interferometer

的光子晶体光纤长度即可,保留腔体长度在 1 mm 以上时可以直接切割,在 1 mm 以下时可以在显微镜下进行切割,切割保留的最小尺寸可达 $100 \mu\text{m}$ 。(4) 将光子晶体光纤未熔接一端与准备好的另一根普通单模光纤熔接,熔接方法同上,这样就形成了一个完整的非本征型光纤法布里-珀罗器件。

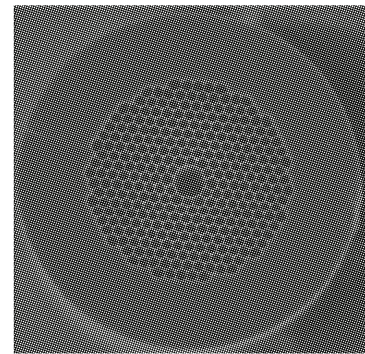


图 2 空芯光子晶体光纤端面图

Fig. 2 Cross-section image of the hollow-core photonic crystal fibers

图 3 是干涉腔长度为 2.1 mm,两根普通单模光纤端面没有作任何处理时,制作出的非本征型光纤法布里-珀罗的反射谱,可见其干涉条纹的对比度比较低,只有 3 dB 左右。干涉条纹的对比度由下式给出^[8]:

$$V = \frac{2 \sqrt{R_1 R_2} q (1 + R_1 R_2 q^2 - R_1 - R_2 q^2)}{R_1 + R_2 q^2 + R_1^2 R_2 q^2 + R_1 R_2^2 q^4 - 4 R_1 R_2 q^2}, \quad (1)$$

式中 R_1, R_2 分别为图 1 左端和右端焊点的反射率, q 为光经过焊点插入损耗引起的损耗系数,插入损耗为 1 dB 左右。由(1)式知,为了增强条纹的对比度,由于右端反射的光来回经过两次熔接点损耗为 2 dB。为了提高对比度,实验中将图 1 右边普通单模通信光纤的端面镀上 Ti_2O_3 膜,来弥补耦合损耗带

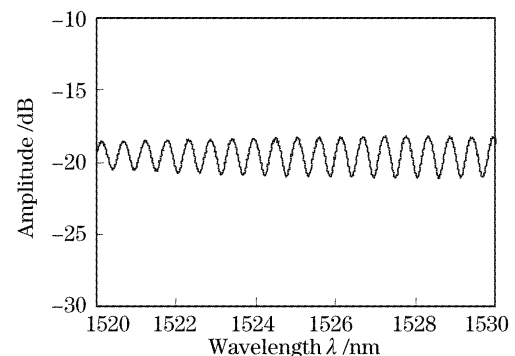


图 3 未镀 Ti_2O_3 反射膜时熔接型非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪的反射谱

Fig. 3 Reflective signal from the fused extrinsic Fabry-Pérot interferometer without Ti_2O_3 reflecting film

来的影响,提高干涉条纹的对比度,为了保证镀膜后熔接点的机械强度,可以只在单模光纤纤芯附近 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 的范围内镀 Ti_2O_3 膜。图 4 为镀 Ti_2O_3 膜后,相同腔长非本征型光纤法布里-珀罗的反射谱图,可见其干涉条纹对比度提高了约 5 倍。

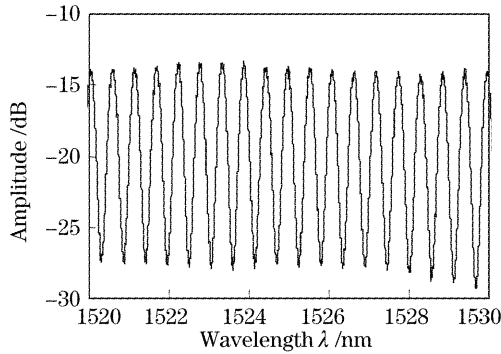


图 4 镀有 Ti_2O_3 反射膜时熔接型非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪的反射谱

Fig. 4 Reflective signal from the fused extrinsic Fabry-Pérot interferometer with Ti_2O_3 reflecting film

由于镀膜之后形成的两个反射面其光纤端面反射率不等,为与两端面反射率相等的普通法布里-珀罗腔相区别,将之归为非佐(Fizeau)腔^[9]。由于所构成的非佐腔一端为未镀膜的普通光纤,其反射率较低(小于 4%),另一面反射率较高(约 90%),因此光束的干涉可以近似等效为双光束干涉,其光谱近似为余弦分布。假设两反射镜的光强透过率为 T_i ,光强反射率为 R_i , $i=1,2$,在忽略损耗的情况下有 $T_i + R_i = 1$,对应的干涉光光强为^[10]

$$I_R = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(2\pi n l / \lambda)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n l / \lambda)} I_i, \quad (2)$$

式中 λ 为光波在真空中的波长, l 为非佐腔的腔长,也就是空芯光子晶体光纤的长度。在测试应变时将法布里-珀罗腔附在待测物上,若发生应变则可改变法布城-珀罗腔腔长;由(2)式可知,法珀腔腔长 l 变化将会改变输出相位,根据输出 I_R 的变化解调出腔长变化就可以得到相应的应变变量。利用基于 Pisarenko 正弦波恢复法的光纤非本征型光纤法布里-珀罗频分复用网络光谱解调方法^[10],可以将单个这种结构的非本征型光纤法布里-珀罗传感器或这种传感器复用之后的复用信号进行解调,从而提取出被测物理量的实际大小。

3 实验结果及讨论

实验所使用的光纤分别是康宁公司生产的 SMF-28 普通单模光纤和 Blaze Photonics 公司生产

的 HC-1500-02 空芯光子晶体光纤。制作出的非本征型光纤法布里-珀罗传感器腔长为 $2.1\ \text{mm}$ 。该传感器封装后埋入或表面粘附于被测物,受到应变作用时,光子晶体光纤构成的非佐腔的长度将发生变化。用光谱仪接收到非本征型光纤法布里-珀罗的干涉谱后,通过 Pisarenko 正弦波恢复的解调方法^[10],可解调出非本征型光纤法布里-珀罗传感器所受的应变大小。为了将非本征型光纤法布里-珀罗的实际应变与测量应变进行比较,实验中,采用电应变计(Strain gauge)作为参考对象。进行应变测试的实验装置如图 5 所示。非本征型光纤法布里-珀罗传感器和电应变计分别用胶水将其固定在刚性良好的钢板上,计算机控制精细螺杆(Screw)旋转,钢板就可以上下倾斜而发生形变,从而就可以使得电子应变计和非本征型光纤法布里-珀罗仪同时产生应变变化。实验中,控制螺杆使其每一步旋转约产生 100 个微应变,固定在钢板上的电应变计产生的应变由应变测试仪(Strain detector)读出,而非本征型光纤法布里-珀罗上产生的应变则先通过光谱仪(Si720 OSA)采集其反射谱,再通过解调算出非本征型光纤法布里-珀罗腔长变化,进一步算出非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪应变变量。从 0 测到 $1200\ \mu\epsilon$,两个传感器测量的应变对比如图 6 所示。可见两者的线性度比较好,可达 99.35%。实验结果表明,这种非本征型光纤法布里-珀罗传感器在 $0\sim 1200\ \mu\epsilon$ 范围内的应变分辨力可达 $\pm 5\ \mu\epsilon$ 。

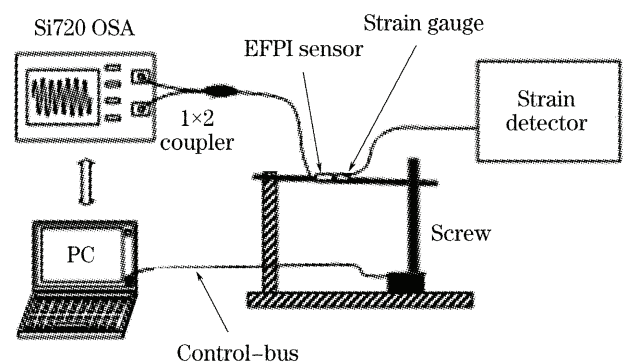


图 5 应变测试实验系统结构图

Fig. 5 Schematic diagram of the strain experiment

图 7 为新型非本征型光纤法布里-珀罗传感器在 $-20\sim 100\ ^\circ\text{C}$ 温度变化范围内的腔长变化曲线,可见在 $120\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内,其腔长变化只有约 $0.2\ \mu\text{m}$,而普通非本征型光纤法布里-珀罗传感器在 $100\ ^\circ\text{C}$ 的范围内其腔长变化就可达数十微米。其原因在于这种新型非本征型光纤法布里-珀罗传感器的整个制作过程只有光纤切割和光纤熔接,光子

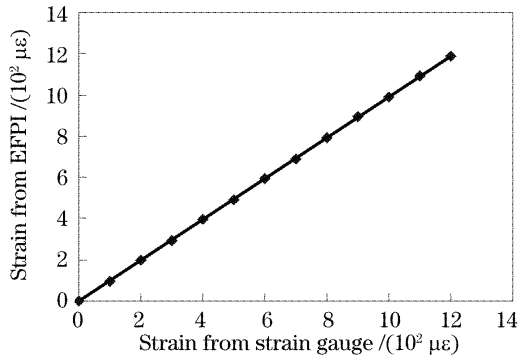


图6 熔接型非本征型光纤法布里-珀罗传感器与应变计测出的应变对比

Fig. 6 Strain response between the fused extrinsic Fabry-Pérot interferometer and strain gauge

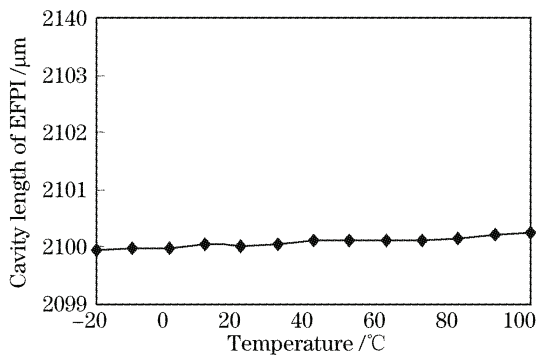


图7 熔接型非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪的温度响应特性

Fig. 7 Temperature response of the fused extrinsic Fabry-Pérot interferometer

晶体光纤材料又单一,温度变化时不会引起材料热膨胀系数之间的失配,因此温度变化对这种传感器影响小,这与实验研究吻合较好。

对于用空芯光子晶体光纤作干涉腔体的非本征型光纤法布里-珀罗传感器,由于干涉腔的损耗只取决于光子晶体光纤的传输损耗,在进一步降低普通通信单模光纤与空芯光子晶体光纤熔接损耗的前提下,其干涉腔长度可以长至数厘米。在前面的实验中,将镀反射膜和没有镀反射膜的两种非本征型光纤法布里-珀罗传感器分别延长光子晶体光纤的长度至 1 cm 和 2 cm,其干涉谱的对比度相比 2.1 mm 变化不大。因此这种类型的传感器其反射信号的条纹对比度和干涉强度主要取决于两个熔接点的熔接损耗和两个反射面的反射率大小,在干涉腔体不是很长的情况下,其干涉腔长对它的影响反而比较小,这跟普通非本征型光纤法布里-珀罗传感器存在极大的区别。对于这种空芯光子晶体光纤本征光纤法布里-珀罗腔,光是被限制在纤芯中传输,因此损耗很小,复用潜力很大,可应用于大容量、准分布式传

感系统中。

4 结 论

报道了一种温度影响小的非本征型光纤法布里-珀罗应变干涉传感器。该传感器利用空芯光子晶体光纤作法布里-珀罗腔的干涉腔体,利用光纤熔接方法将该法布里-珀罗腔体和两根普通通信单模光纤熔接起来构成的微小型光纤法布里-珀罗应变干涉传感器。实验结果表明,利用这种新型非本征型光纤法布里-珀罗传感器进行测量不但可以避免温度对被测量的交叉影响,同时还可以得到较高的应变分辨力。因此,这类传感器将在准分布式、大容量传感系统中具有极大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge. Optical fiber sensor technology[C]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Quant. Electron.*, 1982, **MTT-30**(4): 472~510
- 2 E. Udd. Fiber optic smart structures[C]. *IEEE*, 1996, **84**(6): 884~894
- 3 Wang Muguang, Wei Huai, Jian Suishen. Experimental and theoretical study on the compound dual-period fibre grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3): 609~614
王目光,魏 淮,简水生. 复合型双周期光纤光栅的理论与实验研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(3): 609~614
- 4 T. K. Gangopadhyay, P. J. Henderson. Vibration; history and measurement with an extrinsic Fabry-Pérot sensor with solid-state laser interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2471~2477
- 5 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Chin. 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-珀罗传感器波分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 631~635
- 6 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Zhou Changxue *et al.*. Frequency-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2221~2225
江 建,饶云江,周昌学等. 基于光放大光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2221~2225
- 7 Y. J. Rao, S. F. Yuan, X. K. Zeng *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system[J]. *Opt. Lasers in Engng.*, 2002, **38**(6): 557~566
- 8 Zhu Yong, Zhang Jie, Chen Weimin *et al.*. Study on the method of improving EFPI's signal quality[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 544~548
朱 永,张 洁,陈伟民等. 提高光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 544~548
- 9 Y. J. Rao, D. A. Jackson, R. Jones *et al.*. Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading[J]. *Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1685~1695
- 10 Y. J. Rao, X. J. Wang, T. Zhu *et al.*. Demodulation algorithm for frequency-division-multiplexed fiber optic Fizeau strain sensor networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 997~1000
饶云江,王希晶,朱 涛等. 光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 997~1000