

本征法布里-珀罗腔光纤压力传感器理论研究

王宁 毛洁莹 朱化凤

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266555)

摘要 建立了光子晶体光纤(PCF)型本征法布里-珀罗(F-P)腔光纤压力传感器压力响应理论模型,讨论了各参数对压力响应灵敏度的影响,给出了 Matlab 程序理论模拟结果。鉴于 PCF 焊接工艺的困难,提出了利用外径不同的单多模光纤熔接构成的改进型单多模光纤复合本征 F-P 腔光纤压力传感器结构,建立了压力响应理论模型,分析了提高压力响应灵敏度的关键参数,并模拟了光纤外径对压力响应灵敏度的影响。通过对两种本征 F-P 腔光纤压力传感器的比较分析看出,改进型结构无论在压力响应灵敏度还是制作难易度方面都颇具优势。

关键词 光纤光学;光纤传感;压力;光子晶体光纤;本征法布里珀罗干涉

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.050601

Theoretical Research of Intrinsic Fabry-Pérot Interferometric Fiber Pressure Sensor

Wang Ning Mao Jieying Zhu Huafeng

(College of Science, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract The theoretical model is established for photonic crystal fiber (PCF) intrinsic Fabry-Pérot (F-P) interferometric fiber pressure sensor, and its pressure responsibility, related to several parameters, is also discussed with the results simulated by Matlab software. The improvement of single/multi-mode intrinsic F-P interferometric fiber pressure sensor is demonstrated by theoretical analysis, which is easier to fabricate. The structure is constructed by fusing single-mode fiber and multi-mode fiber with different diameters. The theoretical model of pressure response is also given. The key parameters concerned with pressure responsibility are analyzed with simulation curves. By the comparison between two kinds of sensors, the single/multi-mode intrinsic F-P interferometric fiber sensor is more attractive because of its high responsibility and simple fabrication.

Key words fiber optics; fiber sensing; pressure; photonic crystal fiber PCF; intrinsic Fabry-Pérot interferometry

OCIS codes 060.2370; 060.5295; 230.5298; 230.7370

1 引言

法布里-珀罗(F-P)腔干涉型光纤传感器在测量温度、应力等物理量方面得到了广泛的应用。这种传感器具有极佳的测量重复率与分辨率,性能稳定且对环境干扰免疫,尺寸小,使用方便。目前 F-P 腔干涉型光纤传感器主要分为非本征^[1~3]和本征型^[4~6]两种方式。传统的本征型 F-P 腔干涉型(IFPI)光纤传感器是利用热熔的方法将两端镀反射膜的光纤与两根单模光纤(SMF)焊接在一起制作而成^[7],产生腔镜的方法有真空镀膜、磁控溅射和电子束蒸发镀膜等。由于制作方法昂贵,因此该类传感器的成本较高,而由腔镜引起的高反射损耗也限制了其多个级联的能力。美国弗吉尼亚州理工大学 Center for Photonics Technology 提出了单模-多模-单模结构的 IFPI(SMS-IFPI)光纤传感器^[8],只需将多模光纤(MMF)焊接在两根单模光纤之间即可,无需镀膜来制成反射腔镜,因而制作成本大大降低。另外,由于焊点处只有微弱的菲涅耳反射,因此损耗很小,可以级联多个传感器。目前这种光纤传感器已经实现了温度和应力的准分布式测量,但原有结构

收稿日期: 2011-12-12; 收到修改稿日期: 2011-12-20; 网络出版日期: 2012-03-02

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2010DQ015)资助课题。

作者简介: 王宁(1977—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感和激光技术等方面的研究。

E-mail: qfwangning@163.com

难以进行分布式压力测量。文献[6,9]中提出的该种传感器的套管型改良方案还不成熟,对套管材料与光纤材料间的气密性熔接工艺要求极高,制作难度大。近年来出现了利用光子晶体光纤(PCF)与单模光纤熔接构成的本征型 F-P 腔结构^[10,11],但该结构对光纤熔接技术要求较高,同时压力响应灵敏度也有待提高。本文通过对 PCF 本征型 F-P 腔光纤压力传感器的压力响应理论研究,给出了压力响应灵敏度的模拟结果;同时提出了利用外径不同的单多模光纤熔接而成的本征型 F-P 腔传感方案。该方案利用单多模光纤外径尺寸的差异来实现压力的响应,同时该种结构制作难度较小,只需完成普通单多模光纤熔接即可,在制作难度以及实用性方面都具备一定的优势。理论研究结果对改进和优化该种传感器、实现分布式光纤压力传感方案具有一定意义。

2 PCF 本征型 F-P 腔光纤压力传感结构

SMS 结构的本征型 F-P 腔光纤传感器由于单模光纤与多模光纤的折射率非常接近,因此产生的反射损耗非常小,从而具备分布式多测量点级联能力。但单多模光纤复合型结构光纤传感器使用的单多模光纤均为实心结构且外径相同,因此对外界压力变化极不敏感。PCF 本征型 F-P 腔光纤压力传感结构与单多模复合型本征 F-P 腔光纤压力传感器结构类似,如图 1 所示,不同之处在于是将一小段 PCF 焊接在两根单模光纤之间,代替了原有的多模光纤。由于两种光纤折射率的不同,在两个边界处构成了两个反射面,从而构成 F-P 腔。

PCF 本征型 F-P 腔光纤压力传感结构由于使用了带有空隙结构的 PCF 作为压力转换机制,外界压力可以转换成光纤的纵向应变,因此能够对外界压力产生响应。由单模光纤与 PCF 构成的 F-P 腔的光学腔长,即两反射光的光程差(OPD)可表示为

$$D_{op} = 2n_{eff}L, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为有效折射率, L 为实际腔长。 n_{eff} 和 L 会随温度和应变改变,因此 OPD 就会随温度和应变而改变。由于光子晶体光纤受横向压力作用时轴向长度变化,两反射光的光程差会发生变化,进而影响双光束的干涉光谱,故而可由探测到的光谱变化反推腔长的变化进而得知外界环境压力大小。

3 压力响应理论模型

对于 PCF,所有孔隙较为均匀地分布于纤芯外边界与包层外边界之间的环带中,如图 2 所示。该区域空气隙所占面积较大,为了讨论问题的方便,将这一区域等效为一个环状空心带,如图 3 所示。

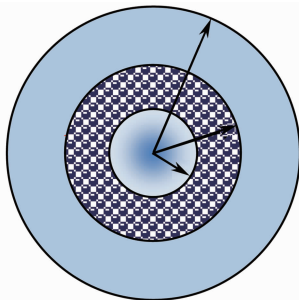


图 2 光子晶体光纤的横截面

Fig. 2 Cross section of PCF

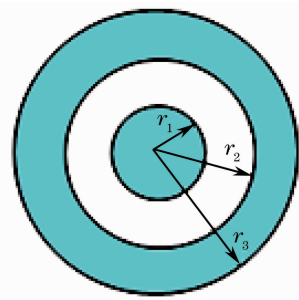


图 3 等效光子晶体光纤截面

Fig. 3 Equivalent cross-section of PCF

这样,由 PCF 与单模光纤构成的 F-P 腔压力传感器的力学模型如图 4 所示。

由水平方向的压力平衡可得

$$\sigma_{z_1} \pi r_1^2 + \sigma_{z_2} (r_3^2 - r_2^2) = P_1 \pi (r_2^2 - r_1^2), \quad (2)$$

根据材料力学圆柱体材料的相关理论,外界压力引起的腔长变化为^[12,13]

$$\Delta L = \frac{L}{E_1} [\sigma_{z_1} - \mu_1 (\sigma_{r_1} + \sigma_{t_1})] = \frac{L}{E_2} [\sigma_{z_2} - \mu_2 (\sigma_{r_2} + \sigma_{t_2})], \quad (3)$$

其中

$$\sigma_{r_1} + \sigma_{t_1} = -2P_1, \quad (4)$$

$$\sigma_{r_2} + \sigma_{t_2} = 2 \frac{P_1 r_2^2 - P_2 r_3^2}{r_3^2 - r_2^2}, \quad (5)$$

μ 为材料泊松比, E 为材料杨氏弹性模量, σ_r 、 σ_t 分别为切向和径向应变。将(2)~(5)式联立, 并令 $S_1 = \pi r_1^2$, $S_2 = \pi(r_2^2 - r_1^2)$, $S_3 = \pi(r_3^2 - r_2^2)$, 得

$$\Delta L = \frac{P_1 [S_2 - 2\mu_2 (S_1 + S_2) + 2\mu_1 S_1] + P_2 [2\mu_2 (S_1 + S_2 + S_3)]}{E_1 S_1 + E_2 S_3} L. \quad (6)$$

设 $P_1 = 0$, $S_{\text{tot}} = S_1 + S_2 + S_3$, 则

$$\Delta L = \frac{2\mu_2 S_{\text{tot}}}{E_1 S_1 + E_2 S_3} P_2 L. \quad (7)$$

从上式可以看出, 在其他参数一定的情况下, 腔长的变化量 ΔL 与外界压力 P_2 成正比, 因此该 F-P 腔结构能够进行外界压力的测量。同时可以看出, 为了使腔长的变化量尽量大, 即对压力的响应灵敏度尽量高, 应该从以下几个方面合理地设计各个参数: 1) 应使 S_1 和 S_3 尽量小而 S_{tot} 尽量大, 这意味着 PCF 的纤芯和包层中的非空隙区域要尽量小, 而光纤的外径要尽量大。如需获得较高的压力响应灵敏度, 需要制作出尽量满足设计要求的 PCF。2) 通过优化泊松比和杨氏弹性模量, 也可以达到提高压力响应灵敏度的效果, 这意味着要选择不同材料特性的单模光纤和 PCF, 以获得符合优化要求的材料泊松比和杨氏弹性模量值。

利用 Matlab 软件可进一步对(7)式进行理论模拟, 把各参数的具体数值设为 $r_1 = 3 \mu\text{m}$, $r_2 = 35 \mu\text{m}$, $r_3 = 62.5 \mu\text{m}$, $\mu_2 = 0.16$, $E_1 = E_2 = 1.1281 \times 10^7 \text{ psi}$ (1 psi = 6.87 kPa), $L = 2 \text{ mm}$, 绘制出的 OPD 与外界压力 P_2 的响应关系曲线如图 5 中曲线 1 所示, 灵敏度为 0.25 nm/psi; 曲线 2 为 $r_3 = 70 \mu\text{m}$, 其他条件不变时的压力响应曲线, 此时灵敏度为 0.23 nm/psi; 曲线 3 为 $r_3 = 75 \mu\text{m}$, 其他条件不变时的压力响应曲线, 此时灵敏度为 0.22 nm/psi。由此也可看出光纤外径越大, 传感器的压力响应灵敏度越小。

该计算过程采用了近似的中空结构, 实际的 PCF 孔隙区域不是完全的中空区域, 根据孔排列方式、间距和大小不同, 由横向压力产生的应力分布情况也有所不同, 但这并不影响以上的理论分析。如果把实际情况与理想中空情况比较的话, 虽然实际 PCF 孔隙区域不是完全中空, 但由材料力学知识可知, 此时横向压力引起材料形变而导致的 F-P 腔腔长的变化要比同等压力条件下完全中空情况下小, 因此实际 PCF 传感头的压力响应灵敏度计算结果要低于本近似理论模拟结果。从这方面来讲, 更加肯定了 SMS-IFPI 光纤压力传感器在压力响应灵敏度方面优于 PCF 型传感器的结论, 计算过程采用的近似处理并不影响分析结果。同时 PCF 型光纤由于实际的孔隙部分所占面积较大, 且孔隙排列一般较为规律, 因此中空结构的近似处理具备一定的合理性。

4 改进型 SMS-IFPI 光纤压力传感器

下面在传统 SMS-IFPI 传感器结构的基础上稍作改进, 采用外径大于单模光纤的多模光纤熔接, 如图 6 所示, 从而实现压力响应。设 R 为多模光纤半径, r 为单模光纤半径, P 为外界压强, σ_z 为 z 轴(光纤轴向)应变, L 为 F-P 腔的初始腔长, μ 为泊松比。

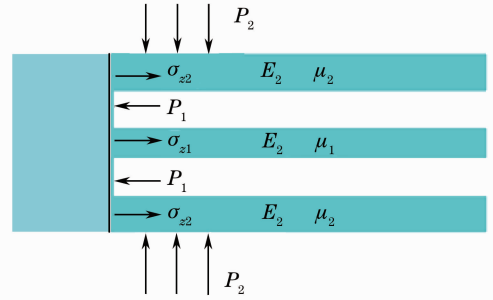


图 4 PCF 本征型 F-P 腔压力传感器的力学模型
Fig. 4 Mechanical model of PCF IFPI pressure fiber sensor

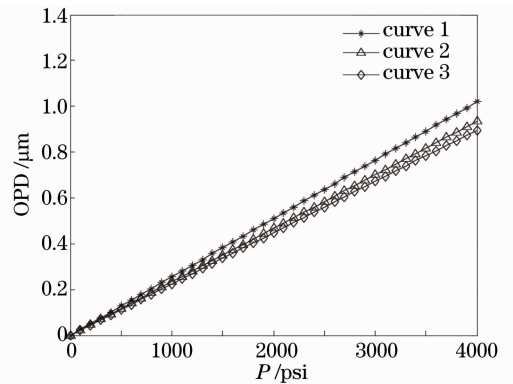


图 5 PCF IFPI 光纤传感器压力响应曲线
Fig. 5 Pressure response curves of PCF IFPI fiber sensor

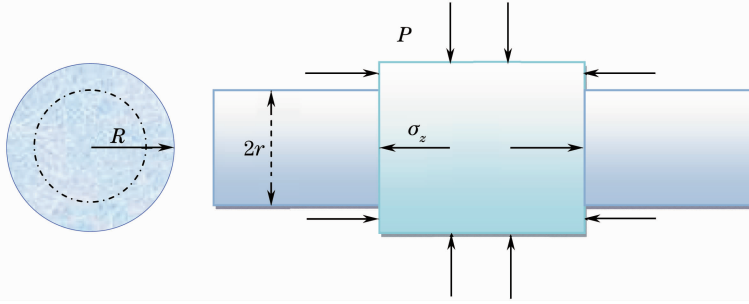


图6 改进型 SMS-IFPI 光纤传感器受力分析图

Fig. 6 Analysis of stressed state of improved SMS-IFPI sensor

通过受力分析,可以得到水平方向的压力平衡方程

$$\sigma_z \pi R^2 = P \pi (R^2 - r^2), \quad (8)$$

由(3)式知

$$\Delta L = \frac{L}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_t + \sigma_r)], \quad (9)$$

式中

$$\sigma_t + \sigma_r = -2 \frac{R^2 P}{R^2} = -2P, \quad (10)$$

可得

$$\Delta L = \frac{L}{E} (1 + 2\mu - \frac{r^2}{R^2}) P. \quad (11)$$

故腔长的变化正比于压力 P 的变化,该结构能够对外界压力进行正常响应。利用 Matlab 软件对(11)式进一步进行理论模拟,把各参数的具体数值设为 $r = 62.5 \mu\text{m}$, $R = 70 \mu\text{m}$, $\mu = 0.16$, $E = 1.1281 \times 10^7 \text{ psi}$, $L = 2 \text{ mm}$, 绘制出 OPD 与外界压力 P 的响应关系,如图 7 所示。计算可得此时传感器的灵敏度为 0.29 nm/psi , 高于如前所述的 PCF IFPI 结构的压力响应灵敏度。同时可以看出,为了进一步提高压力响应灵敏度,只需利用外径稍大的多模光纤即可获得,如图中的曲线 2 和曲线 3,分别是在 $R = 75 \mu\text{m}$ 和 $R = 80 \mu\text{m}$, 其他条件不变的情况下得到的压力响应曲线,其压力响应灵敏度分别为 0.34 nm/psi 和 0.39 nm/psi 。可以看出,随着光纤外径的增加,传感器的压力响应灵敏度越来越高。

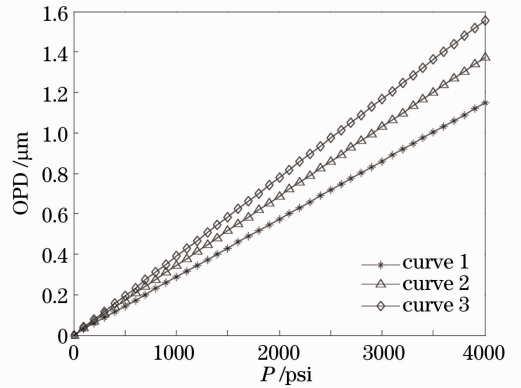


图7 改进型 SMS-IFPI 光纤传感器的压力响应曲线图

Fig. 7 Pressure response curves of improved SMS-IFPI sensor

可以看出,在 F-P 腔腔长一定、光纤外径相同的情况下,例如前述数据中 $r_3 = R = 70 \mu\text{m}$ 时,改进型 SMS-IFPI 光纤传感器的压力响应灵敏度高于 PCF IFPI 光纤压力传感器;随着光纤外径的增大,改进型 SMS-IFPI 传感器的压力响应灵敏度是提高了,而 PCF IFPI 传感器压力响应灵敏度是降低的;相比之下,光纤外径变化对改进型 SMS-IFPI 压力传感器的灵敏度影响较大,当光纤半径增加 $5 \mu\text{m}$ 时,压力响应灵敏度可提高 0.05 nm/psi , 而 PCF IFPI 光纤压力传感器的响应灵敏度降低了 0.01 nm/psi 。这对于改善传感器的压力响应灵敏度是非常有帮助的,通过光纤外径参数的轻微改变就可获得压力响应灵敏度的明显提高,对于高灵敏度传感器制作工艺的实现也十分有利。当然,随着多模光纤与单模光纤外径差的进一步增大,光纤熔接的难度也会增大,因此对于该种传感结构,应该对压力响应灵敏度的各个参数进行综合考虑。另外,改进型结构参与熔接的 multimode fiber 虽外径不同,但比较接近,且为实心区域间的焊接,因此改进型 SMS-IFPI 结构的光纤熔接难度要比 PCF 的熔接难度小,更易于制作。

5 结 论

对 PCF IFPI 压力传感器和改进型 SMS-IFPI 压力传感器的压力响应理论进行了研究,建立了压力响应理论模型,分别分析了传感器参数对两种不同传感结构的压力响应灵敏度的影响,并对两种结构的压力响应问题进行了比较分析。通过分析可以看出,与 PCF 本征型 F-P 腔光纤传感器相比,改进的 SMS-IFPI 光纤压力传感结构在压力响应灵敏度和制作工艺方面具有优势。今后将该设计方案展开进一步的优化设计和实验研究。

参 考 文 献

- 1 Jing Zhenguo, Yu Qingxu, Zhang Guiju *et al.*. A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1347~1351
荆振国,于清旭,张桂菊等.一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J].光学学报,2005,**25**(10):1347~1351
- 2 Lü Tao, Li Zhengjia, Xia Dongqing. Photoelectric conversion card applied in intensity-modulated extrinsic Fabry-Pérot cavity optical fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2011, **48**(8): 080603
吕涛,李正佳,夏丹青.用于强度解调型非本征法布里-珀罗腔光纤传感器的光电转换卡[J].激光与光电子学进展,2011,**48**(8):080603
- 3 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Pérot 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
- 4 Zhengyu Huang. Quasi-Distributed Intrinsic Fabry-Pérot Interferometric Fiber Sensor for Temperature and Strain Sensing [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006. 129~138
- 5 Tingyun Wang, Na Chen, Fufei Pang *et al.*. Fiber-optic intrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors fabricated by femtosecond lasers[C]. *SPIE*, 2011, **8034**: 80340I
- 6 Fabin Shen, W. Peng, K. Cooper *et al.*. UV-induced intrinsic Fabry-Pérot interferometric fiber sensors[C]. *SPIE*, 2004, **5590**: 47~56
- 7 H. F. Taylor, C. E. Lee. Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors[J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(2): 193~194
- 8 Zhengyu Huang, Yizheng Zhu, Xiaopei Chen *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot fiber sensor for temperature and strain measurements[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2403~2405
- 9 Cheng Ma, Ning Wang, Evan M. Lally *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot interferometric (IFPI) fiber pressure sensor[C]. *SPIE*, 2010, **7677**: 76770T
- 10 Chuang Wu, H. Y. Fu, Khurram Karim Qureshi *et al.*. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Pérot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(3): 412~414
- 11 Deng Ming, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive-index sensor based on photonic crystal fiber Fabry-Pérot interferometer with self temperature compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1790~1795
邓明,饶云江,朱涛等.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[J].光学学报,2009,**29**(7):1790~1795
- 12 B. B. Muvdi, J. W. McNabb. Engineering Mechanics of Materials[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1984. 597~602
- 13 Hai Xiao, Jiangdong Deng, Zhiyong Wang *et al.*. Fiber optic pressure sensor with self-compensation capability for harsh environment applications[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(5): 054403