

doi: 10. 3788/gzxb20124101. 0001

微型化光纤法布里-珀罗传感器腔长一致性的控制研究

童杏林, 文昌山, 朱小龙, 王夏, 纪涛, 冷卓燕

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘要:研究了光纤法布里-珀罗腔传感器的腔长一致性的控制技术. 通过三维调整架组成微调装置来控制全光纤法布里-珀罗腔的腔长; 结合法布里-珀罗腔的工作原理, 利用光谱分析仪实时检测加工过程中法布里-珀罗腔的腔长并用装置予以修正; 以热熔接的方法将毛细玻璃管与光纤加工成法布里-珀罗腔; 利用超景深光学显微系统检查加工的法布里-珀罗腔的关键部位的结构, 并对熔接点的牢固性进行了检测. 实验结果和数据分析显示: 法布里-珀罗腔的腔长得到了较好的控制及一致性, 熔接部位的变形和对法布里-珀罗腔的性能的影响也很小. 该工艺可用于制备全光纤法布里-珀罗腔传感器.

关键词: 光纤传感器; 腔长一致性; 条纹计数法; 强度解调

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0001-5

控制进行了研究.

0 引言

光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔传感器, 属于光纤结构的 F-P 腔干涉仪. 其结构可以分为三种: 非本征型、本征型和线性复合腔. 其中, 非本征型技术特性较好, 应用较广. 当 F-P 腔所处的环境的某些参量作用于它时, 腔长 L 改变, 于是其输出的干涉信号也相应改变. 基于这一原理, 从干涉信号的改变计算 F-P 腔长 L 的改变, 推导环境参量的改变, 达到各种参量的传感目的. 由于采用了光纤作为结构材料, 光纤 F-P 腔具备很多优点, 例如不受电磁干扰、占用空间小、与解调设备可以远距离协调工作、灵敏度高. 应用于应力传感器、温度传感器、震动传感器、声发射传感器等.

近年来, F-P 腔的封装及加工工艺不断进步, F-P 都朝着质量小、体积小、热稳定性好等方向发展. Jihaeng Yi^[1] 等使用毛细玻璃管与多模光纤及蓝宝石晶片设计并制作的 F-P 腔传感器, 用于气压及温度传感. 其腔的外径为 $360 \mu\text{m}$, 腔长仅为 $5 \mu\text{m}$. Dae-Hyun Kim^[2] 等人设计了腔长为 $25 \mu\text{m}$ 的反射端面镀金的非本征 F-P 腔干涉仪 (Gold-Deposited EFPI), 用于测量结构的动态应变. 张伟、饶云江^[3] 等提出了用高频 CO_2 激光脉冲加热使光纤与石英管永久融的封装方法, 产生的干涉仪功率损耗可以降低至 0.1 dB .

本文从工程开发的角度出发, 提出了非本征微型化全光纤的 F-P 腔传感器, 对其腔长 L 一致性的

1 实验原理

光纤 F-P 腔由普通的单模光纤与大芯径光纤以及毛细玻璃管组成, 其尺寸都是微米级别的. 而 F-P 腔的腔长 L 更是在几十微米的范围之内. 故要对 F-P 腔的腔长实现精细的、一致性的控制, 需要有一定的腔长控制以及腔长检测的装置与方法.

1.1 腔长检测原理

本文对 F-P 腔的腔长 L 的求取采用的方法是条纹计数法^[4]. 相干光束入射到 F-P 腔后反射, 反射信号相遇后产生干涉. 对干涉条纹进行分析, 可以计算出腔长. 理想的干涉条纹如图 1.

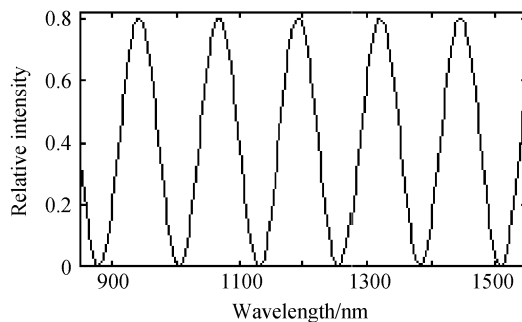


图 1 F-P 腔的反射信号的理想干涉图样
Fig. 1 The ideal interference pattern of reflected signal from F-P cavity

将波长为 λ 的单色光源发出的光束入射到 F-P 腔, 在用光电探测器接收反射光束, 所得到的光强信号^[5]是

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50830203) 资助

第一作者: 童杏林 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: tongxinglin@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-07-12; 修回日期: 2011-09-04

$$I_R = \frac{2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) L \right]}{1 + R^2 - 2R \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) L} I_0 \quad (1)$$

式中, R 与 λ 是常量, I_R 是 F-P 腔反射信号的光强. 由式(1)可得, 对于第 m 级干涉条纹

$$L = \lambda_m \left(\frac{m}{2} + \frac{1}{4} \right) \quad (2)$$

对于第 $m+q$ 级干涉条纹

$$L = \lambda_{m+q} \left(\frac{m+q}{2} + \frac{1}{4} \right) \quad (3)$$

再由式(2)与式(3)可以得到

$$L = \frac{q}{2} \left(\frac{\lambda_{m+q} \lambda_m}{\lambda_{m+q} - \lambda_m} \right) \quad (4)$$

在式(4)中, q 是第 m 级干涉条纹与 $m+q$ 级干涉条纹之间的干涉级数之差; λ_m 是第 m 个干涉峰的峰值对应的波长值; λ_m 、 λ_{m+q} 通过光谱仪 AQ6370B 测得. 在式(4)中, 没有光源的光强 I_0 , 那么求得的 F-P 腔长值不受光源的影响.

1.2 腔长检测方法

用到的光谱分析仪是日本 YOKOGAWA 公司的 AQ6370B 型光谱仪. 该仪器所测得的光谱曲线如图 2.

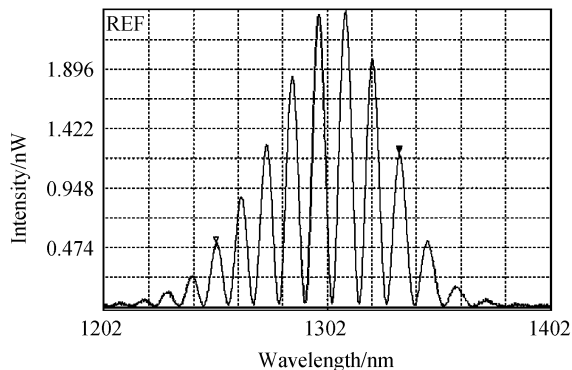


图 2 F-P 腔的反射信号的干涉图样

Fig. 2 The interference pattern of reflected signal from F-P cavity

选取其中几个较为规则、曲线较为平滑的干涉峰, 按照波长的递增为它们编号, 分别是 $\lambda_m, \lambda_{m+1}, \lambda_{m+2}, \dots, \lambda_{m+q}$. 在图 2 中, 左边的空心倒三角符号所指向的波峰为 λ_m , 右边的实心倒三角符号所指向的波峰为 λ_{m+q} . 这样, 用式(4)便可以将腔长值 L 求出.

2 实验装置与实验结果

2.1 F-P 腔传感器的结构设计

所制备的 F-P 腔传感器的结构^[6]如图 3. 该 F-P 腔传感头主要由单模光纤、毛细玻璃管以及细石英棒组成, 单模光纤是入射光纤. 先除去它的涂覆层, 露出的纤芯直径是 $125 \mu\text{m}$. 将平整的光纤端头插入

到毛细玻璃管中作为 F-P 腔的第一个反射端面. 毛细玻璃管的内径是 $126 \mu\text{m}$. 将另一个平整的光纤端面也作为反射端面.

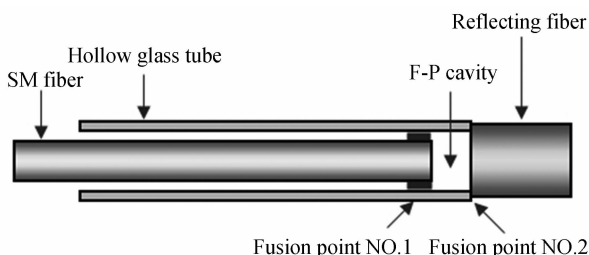


图 3 制备的 F-P 腔结构

Fig. 3 The structure of prepared F-P cavity

2.2 F-P 腔制备和检测装置

运用前面提到的条纹计数法及相关的设备来控制以及检测制备的法-珀腔的腔长值 L .

根据系统应用的需要, F-P 腔的腔长值在几十微米的范围之内. 对腔长进行精细的控制, 需要借助一定仪器与工具. 制备 F-P 腔传感器所需的实验装置如图 4.

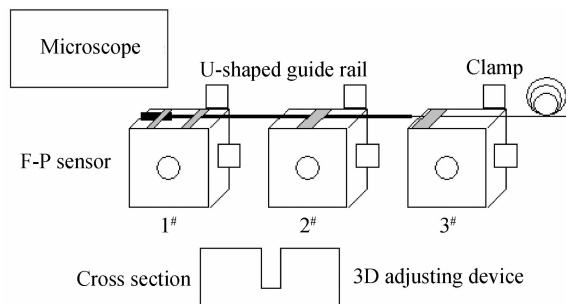


图 4 F-P 腔加工的实验装置

Fig. 4 The experimental devices of processing the F-P cavity

用到了 3 个三维微调平台. 它们可以在水平面内以及竖直方向上进行细微的移动, 控制准确度是 $1 \mu\text{m}$. 将它们安放在光学平台上并且排成一列. 再将一条 U 型导轨放在 1# 与 2# 微调平台上, 将穿入了单模光纤的毛细玻璃管放在 1# 平台上, 单模光纤放在 U 型导槽的槽内. 调整这两个平台, 使 U 型导槽的槽沟与 F-P 腔的毛细玻璃管等高、同轴心. 再用夹具将 F-P 腔的毛细玻璃管固定在 1# 平台上, 把 U 型导槽固定在 1# 与 2# 平台上.

显微装置用来观察 F-P 腔内两个反射端面.

调节 3# 微调平台, 使单模光纤轴向的前进或者后退以改变腔长.

用三维调整平台控制 F-P 腔长, 存在一定的系统误差. 而误差的大小对 F-P 腔的性能的影响非常重要, 所以需要知道加工成型后的 F-P 腔长的确切数值.

单模光纤的另外一端接在 3 dB 耦合器上, 如图 5 所示.

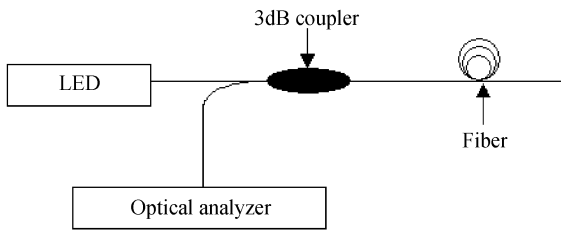


图 5 F-P 腔长的检测装置

Fig. 5 The devices of detecting the length of F-P cavity

图 5 中的 SLED 光源的中心波长是 1 310 nm, 3 dB 带宽是 40 nm. 光源发出的光通过耦合器进入 F-P 腔, 反射光通过耦合器后一半进入光谱仪. 光谱仪输出的图像如图 2 所示.

根据前面的条纹计数法, 在干涉最强峰的左边选则一个干涉条纹, 记录其中心波长 λ_m . 在干涉最强峰的右边选择一个干涉条纹, 记录其中心波长 λ_{m+q} . 那么根据式(4)可得到腔长 L 的值.

反复调节 3[#] 微调平台, 直到得到所需要的腔长值.

其中, 一组 F-P 腔传感器(设为 A 组)的目标腔长值设置为 66 μm . 通过调整装置的调整实际所得到的腔长值如表 2.

2.3 光纤与玻璃管结合的牢固性的检测

单模光纤的反射端面附近部分在玻璃管中通过焊接与玻璃管内壁相结合^[7-8]. 考虑到工程应用的实际要求, 单模光纤端面附近的光纤段与玻璃管的结合^[9-10]需要有一定的牢固性. 通过一定的装置来测试. 实验装置如图 6.

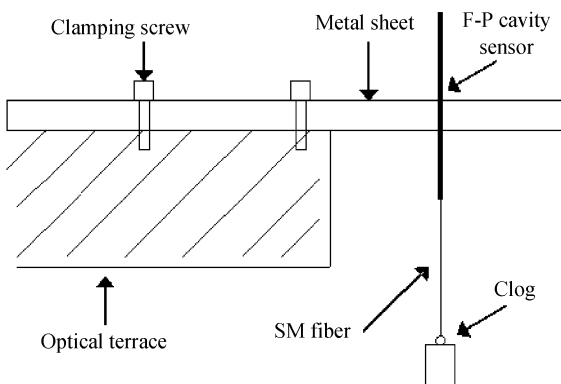


图 6 单模光纤与玻璃管结合的牢固性的检测装置

Fig. 6 The experimental devices of testing fusion point robustness between the single-mode fiber and capillary tube

金属板的一端固定在光学平台上, 使金属板保持水平. 金属板上布置了通孔, 孔的轴向成竖直方向. F-P 传感器穿过金属孔, 玻璃管中部与金属孔中部重合. 再用胶水将玻璃管粘牢在金属板上.

待胶水固化后, 开始拉力测试. 在 F-P 腔的输出尾纤一端加挂质量已知的物体, 加挂物体时按照质量从小到大的顺序进行. 每次加载物体时, 减小物体的晃动以免破坏 F-P 传感头, 并且保持单模光纤在重物的拉力下绷直后在竖直方向内静止至少 30 s, 然后记录拉力数值.

当物体的质量(m)增加到恰好使单模光纤与毛细玻璃管脱离时, 拉力 $F=m \times g$ 则为使单模光纤与玻璃管脱离的临界值. 其中, m 是物体的质量, g 是重力加速度.

针对这项所做的重复性实验显示, 所有的单模光纤与毛细玻璃管脱离时均是两者之间的焊点被破坏, 而单模光纤并没有断裂, 毛细玻璃管也没有破裂. 而焊点破坏的拉力的临界值则在一定的范围内波动.

2.4 F-P 腔长的微观检验

前面通过 F-P 的光学特性来检测其腔长. 再用光学显微设备来观察 F-P 腔的实际结构以及测量腔长. 所用的光学显微设备是超景深光学显微系统 VHX. 该设备能够较好地呈现细微物体的三维外貌. 设置其放大倍数为 500 倍, 调好焦距后, 所看到的图像如图 7 所示. 对 A 组的 F-P 传感器进行检验.

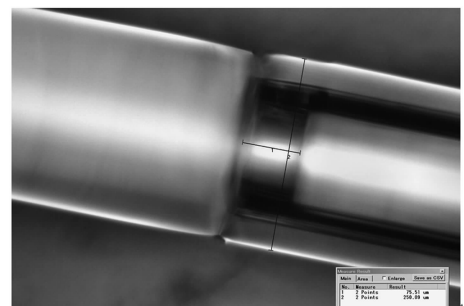


图 7 制备的 F-P 腔的结构图

Fig. 7 The structure figure of the prepared F-P cavity

2.5 实验结果

用前面的实验装置测得的数据如表 1~表 3.

表 1 一组 F-P 传感头的拉力的临界值 F Table 1 Critical values F of F-P sensor of one group

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	—
F/g	32.98	142.43	142.51	188.34	77.17	59.37	78.34	79.56	91.82	185.32	107.60	124.74	90.56	77.17	91.82	—

表 2 条纹计数法所测得的 A 组 F-P 传感头的腔长值

Table 2 Cavity length values of F-P sensors of group A measured with the method of fringe counting

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	—
F/g	72.96	57.58	79.55	75.31	59.41	71.30	68.11	160.52	95.56	70.96	68.33	66.61	81.51	71.07	72.35	—

表3 显微镜所测得的A组F-P传感头的腔长值

Table 3 Cavity length values of F-P sensors of group A measured by the microscope

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	——
F/g	66.33	63.74	67.73	65.92	57.59	67.73	53.60	71.71	80.11	59.76	63.02	65.19	68.45	66.64	73.52	——

表1是一组F-P传感头的拉力测试数据. 将这些数据以其序号为横坐标、以其值为纵坐标作为点进行拟合, 得到图8中所示的菱形的点, 再用折线段把这些点连接起来. 图8中的横线段表示拉力的平均值(104.6487g).

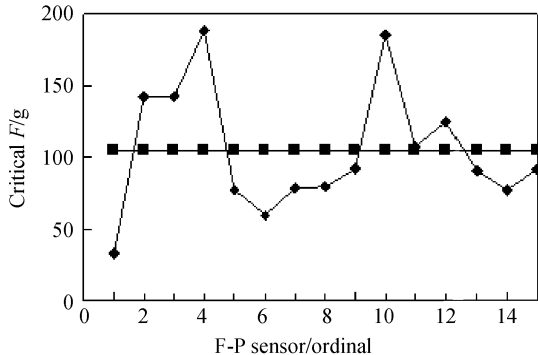


图8 F-P腔的拉力临界值分布图

Fig. 8 The distribution of the F-P cavity tension threshold

表2是A组的F-P传感器的腔长值(根据条纹计数法测得).

将这些腔长值的序号作为横坐标、数值作为纵坐标进行拟合, 得到图9中的菱形的点. 这些点用折线段连接. 而该图中的横线表示66 μm的目标腔长值.

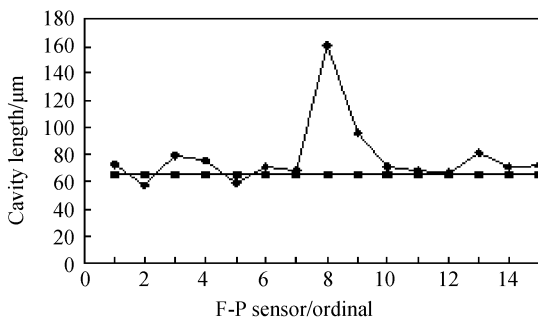


图9 条纹计数法所测得的A组F-P传感器的腔长值分布图
Fig. 9 The distribution of the length of F-P cavity from the group A measured with the method of fringe counting

在图9中可见, 大部分点都分布在目标腔长值的横线附近. 只有第8个点严重的偏离, 可以认为是偶然的因素造成的.

表3是A组传感头的腔长值(由超景深三维光学显微系统VHX直接拍摄F-P腔并且测量腔长). 将这些数据进行拟合, 得到图10.

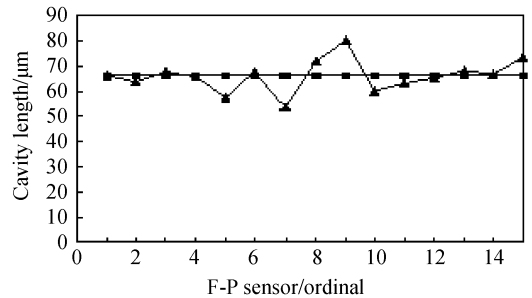


图10 显微镜所测得的A组F-P传感器的腔长值分布
Fig. 10 The distribution of the length of F-P cavity from the group A measured by the microscope

3 结论

本文研究了光纤EFPI传感器腔长一致性的控制方法, 制作了实验系统. 从工程应用的需要出发, 设置合适的腔长, 设定了关键的参量. 进行加工封装, 以及实验检测. 实验结果表明, 本文所提出的光纤EFPI传感器具有较好的光学特性和腔长一致性.

参考文献

- [1] READ I, FOOTE P, MURRAY S. Optical fiber acoustic emission sensor for damage detection in carbon fiber composite structures [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(1): 9-11.
- [2] KIM D H, PARK J W, KANG H K, *et al.* Measuring dynamic strain of structures using a gold-deposited extrinsic Fabry-Perot interferometer [J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, **12**(1): 1-5.
- [3] ZHANG Wei, RAO Yun-jiang, XIE Yuan-ping, *et al.* Study on encapsulating method of fiber fabry-perot interferometric sensor[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(1): 49-54.
张伟, 饶云江, 谢元平, 等. 光纤F-P干涉仪传感器封装方法的研究[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(1): 49-54.
- [4] 饶云江, 刘德森. 光纤技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社.
- [6] ZHAO Jiang-hai, SHI Yi-kai, SHAN Ning, *et al.* Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(6): 874-880.
- [7] 江毅, 唐才杰. 光纤Fabry-Perot干涉仪原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [8] WANG A, XIAO H, WANG J, *et al.* Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(10): 1495-1501.

- [9] KIM D H, KOO B Y, KIM C G, *et al.* Damage detection. of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, **13**(3): 593-598.
- [10] LIANG Yi-jun, DENG Hu, XU Yan-de. Detection of acoustic mission based on a fiber optic Fizeau interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 681-685.

Control of the Cavity Length Consistency of Miniaturization Optical Fiber F-P Sensor

TONG Xing-lin, WEN Chang-shan, ZHU Xiao-long, WANG Xia, JI Tao, LENG Zhuo-yan
(National Engineering Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology,
Wuhan 430070, China)

Abstract: A kind of optical fiber F-P sensor was studied for the control of the cavity length consistency. The cavity length was controlled by three-dimension frames. On the basis of the F-P cavity principle, the F-P cavity was under real-time detection by spectrum analyzer and then was adjusted. The F-P cavity was composed of hollow glass tube and optical fiber with the method of thermal fusion. The key parts of the processed F-P cavity were examined using optical microscope, and the fusion points were examined on their robustness. The results show that the F-P cavity length is better controlled and the consistency is good. The fusion areas are little out of shape and it has few influences on the F-P cavity's performance.

Key words: Optical fiber sensor; Cavity length consistency; Method of counting by fringes; Intensity demodulation