

doi:10.3788/gzxb20164512.1228003

基于蓝宝石晶片的光纤法布里-珀罗高温传感器

梁伟龙^{1,2}, 周次明^{1,2}, 范典^{1,2}, 欧艺文^{1,2}, 田涛¹, 桂新旺¹, 李岩¹

(1 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

(2 武汉理工大学 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 武汉 430070)

摘 要:提出并研制了一种基于蓝宝石晶片的光纤法布里-珀罗(法珀)高温传感器. 该传感器采用斜端面蓝宝石光纤作传输波导, 蓝宝石晶片作法珀干涉仪, “陶瓷插芯-陶瓷套管”结构做为传感器的固定结构. 通过傅里叶变换-最小均方差联合算法解调传感器的反射光谱, 实现了 20℃~1 000℃范围内的温度测量, 测试准确度为±2.5℃. 该传感器具有体积小、成本低、制作简单以及重复性高的优点, 可用于高温环境下稳定、精确的温度测量.

关键词:光纤法珀传感器; 蓝宝石晶片; 高温测量; 蓝宝石光纤; 算法

中图分类号: S951.4+1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)12-1228003-5

Fiber-optic Fabry-Perot High-temperature Sensor Based on Sapphire Wafer

LIANG Wei-long^{1,2}, ZHOU Ci-ming^{1,2}, FAN Dian^{1,2}, OU Yi-wen^{1,2},
TIAN Tao¹, GUI Xin-wang¹, LI Yan¹

(1 National Engineering Laboratory of Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology,
Wuhan 430070, China)

(2 Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing (Wuhan University
of Technology), the Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

Abstract: A fiber-optic Fabry-Perot (F-P) high-temperature sensor based on sapphire wafer was proposed and fabricated. The sensor uses the sapphire fiber with angled end face as a transmission waveguide, the sapphire wafer as a Fabry-Perot (F-P) interferometer and the structure of “Zirconia ferrule-Zirconia tube” as the fixing structure of the sensor. The reflection spectrum of the interferometer was demodulated by performing a combined algorithm of fast Fourier transform algorithm and minimum mean square error estimation. Temperature ranged from 20℃ to 1000℃ is measured, and the obtained precision is ±2.5℃. The sensor has the advantages of small size, low cost, simple fabrication and high repeatability. It can be applied for stable and accurate temperature measurement in high temperature environments.

Key words: Fiber-optic Fabry-Perot sensor; Sapphire wafer; High temperature measurement; Sapphire fiber; Algorithm

OCIS Codes: 060.2370; 070.4790; 260.3160; 280.6780

0 引言

现代工业生产对于恶劣环境下高温测量的需求越来越多,对测温的量和准确度也提出了更高要求. 蓝宝石光纤具有熔点高(2 040℃)、体积小、硬度高、抗腐蚀以及抗电磁干扰等优点,特别适合恶劣环境中高温传感的要求^[1]. 30年来,基于蓝宝石光纤的高温传感技

术得到了快速发展,对应的传感器类型分为黑体腔高温传感器、蓝宝石光纤光栅和非本征法珀干涉仪三种. 蓝宝石光纤黑体腔高温传感器是将蓝宝石光纤的端面镀制特殊材料形成黑体腔探头,根据普朗克辐射定律辐射热信号而实现测温的目的. 蓝宝石光纤黑体腔高温传感器的测温范围广,短期准确度高,但黑体腔和光纤表面的稳定性差,经过一段时间后在同一温度下检

基金项目:国家自然科学基金(No. 61505152)和湖北省科技厅支撑计划(No. 2015BAA214)资助

第一作者:梁伟龙(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email: ftyxlwl@163.com

导师(通讯作者):周次明(1973—),男,博导,博士,主要研究方向为光纤传感. Email: zcm@whut.edu.cn

收稿日期:2016-08-03; **录用日期:**2016-09-27

<http://www.photon.ac.cn>

测光谱与校正光谱之间偏差增大,导致传感器解调的精确性下滑,无法满足现在对测温准确度的要求^[2-3].蓝宝石光纤光栅是利用飞秒激光照射蓝宝石光纤使其折射率发生周期性变化而形成的传感器,可实现温度和应力的多点测量,但是蓝宝石光纤光栅存在制造困难、测量准确度不高的缺点^[4-6].蓝宝石光纤非本征型法珀干涉仪则是利用蓝宝石光纤端面外的法布里-珀罗(法珀)干涉来实现测温的一种传感器,测温范围广,测量准确度高,是目前高温测量领域较理想的选择.蓝宝石光纤法珀高温传感器按照法珀腔的类型,可以分为空气腔型、薄膜型和蓝宝石晶片型三种. WANG Jia-jun等制作了一种空气腔型蓝宝石光纤法珀高温传感器^[7],实现了多点温度的测量,测温准确度小于 0.3°C ,灵敏度大于 $20\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$.但是这种传感器测温范围较小、重复率不高.为了提高传感器的重复性和稳定性, WANG Jia-jun^[8]、LEE Dong-wen^[9-10]等相继采用物理气相沉积技术,通过在抛光的蓝宝石光纤端面镀制氧化物薄膜制作成了薄膜型高温传感器,实现了 $400^{\circ}\text{C}\sim 1\ 000^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度测量.但是这种薄膜型传感器受薄膜材料的限制,测温范围不大,一般低于 $1\ 200^{\circ}\text{C}$,否则薄膜会出现变形、破损. ZHU Yi-zheng提出并制作了基于蓝宝石晶片的高温传感器,量程为 $230^{\circ}\text{C}\sim 1\ 600^{\circ}\text{C}$,准确度为量程的 $\pm 0.2\%$,但是探头制作难度大,成功率不高^[11-12]. TIAN Zhi-peng结合黑体辐射原理和蓝宝石非本征型法珀干涉原理制作了一种高准确度的无源超高温传感器,测温范围为 $554^{\circ}\text{C}\sim 1\ 593^{\circ}\text{C}$,准确度为 1°C ,但是在低温区辐射信号太弱而造成测温范围受限^[13].

本文制作了一种基于蓝宝石晶片的蓝宝石光纤法珀高温传感器.利用蓝宝石晶体物理化学性质稳定、高熔点以及耐腐蚀的特性,采用两面抛光的蓝宝石晶片作为法珀干涉仪,用蓝宝石光纤来接收、传输干涉信号,实现了 $20^{\circ}\text{C}\sim 1\ 000^{\circ}\text{C}$ 的温度测量.通过采用傅里叶变换-最小均方差联合算法解调传感器的腔长,使传感器的测量准确度达到了 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$.相比于 ZHU Yi-zheng等制作的传感器,该传感器使用斜 5° 端面的蓝宝石光纤,杜绝了光纤端面与晶片之间干涉现象的产生,得到了高质量的干涉光谱;同时采用“陶瓷插芯-陶瓷套管”结构结合高温胶涂敷技术,优化了探头的加固结构,有效地解决了高温胶渗入到蓝宝石光纤端面而污染光纤和蓝宝石晶片的问题,降低了探头的制作难度,提高了传感器的成品率和测量重复性.

1 系统结构和传感原理

基于蓝宝石晶片的光纤法珀高温传感实验系统由LED光源、 2×2 耦合器、传感器、高温炉、光谱仪和计算机六部分组成,其结构如图1.

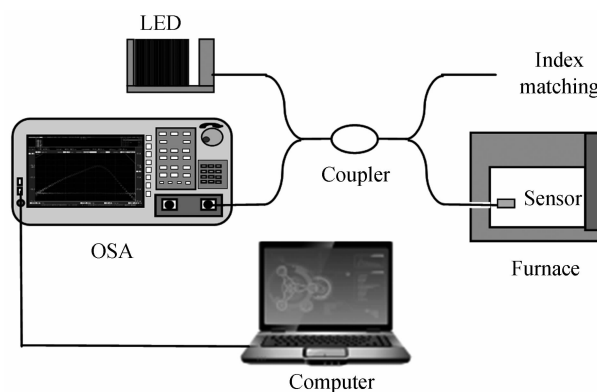


图1 基于蓝宝石晶片的光纤法珀高温传感实验系统
Fig. 1 The fiber-optic Fabry-Perot high-temperature sensing experimental system based on sapphire wafer

由 850 nm LED光源发出的光入射到光纤耦合器后,入射到高温炉(KSL-1100X)中的法珀传感器.由法珀传感器反射回的干涉谱信号再次经过耦合器后,被光谱仪(AQ6370C)接收,最后由计算机对光谱数据进行解调.其中法珀高温传感器的传感原理如图2.由蓝宝石光纤传输的光在光纤端面处发生折射,通过空气介质后到达蓝宝石晶片(法珀腔).当光纤端面和蓝宝石晶片前平面呈平行关系时,即使用端面为 0° 角的蓝宝石光纤时,此端面与蓝宝石晶片前表面之间会形成一个空气法珀腔,与蓝宝石晶片后表面之间还会形成一个复合法珀腔,干扰蓝宝石晶片本身产生的法珀腔传感信号,因此,本文将蓝宝石光纤端面制作成斜 5° 角,去除蓝宝石光纤端面产生法珀腔的影响,得到高质量的蓝宝石晶片干涉光谱.

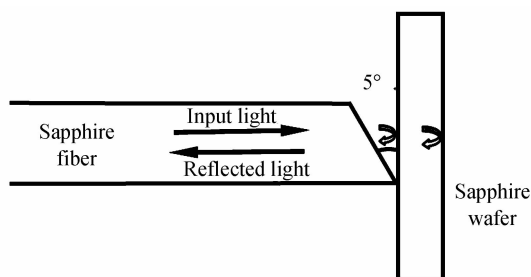


图2 基于蓝宝石晶片的高温传感器原理图
Fig. 2 Schematic of the high-temperature sensor based on sapphire wafer

光束经过蓝宝石晶片前后两个面的反射后,可以得到强度分别为 I_1 、 I_2 的反射光,这两束光发生干涉,干涉光信号的强度表示为^[13]

$$I(k) = [I_1(k) + I_2(k)][1 + F_v \cos(kOPD + \varphi)] \quad (1)$$

式中: k 为波数,有 $k = 2\pi/\lambda$; $I_1(k) + I_2(k)$ 为信号的直流背景,而 $[I_1(k) + I_2(k)]F_v \cos(kOPD + \varphi)$ 代表晶片干涉交流信号; F_v 是条纹对比度,一般用来表示干涉条纹的可见度, φ 是初相位;OPD代表两束干涉光的光程差,即 $OPD = 2nL$,其中晶片厚度 L 和折射率 n 都随温度近似线性变化,因此OPD与温度 T 的关系一般用

二次多项式函数来表示^[13].

实际上,光谱仪测得的光谱信号除了以上提到的直流背景和晶片干涉信号外,还包括随温度变化的黑体辐射强度 $I_B(k)$ 、探测器中随机变化的暗电流 $I_D(k)$ 、熔接点和光纤端头处反射的光源信号强度 $I_{LED}(r_{couple} + r_{end})$ 等,由于 I_1 、 I_2 、 $I_B(k)$ 、 $I_D(k)$ 、 $I_{LED}(r_{couple} + r_{end})$ 都是缓慢变化的,所以对光谱信号进行快速傅里叶变换可以将晶片干涉信号提取出来. 本文采用准确度高、速度快的傅里叶变换-最小均方差联合解调算法^[14-15] 进行处理:先用快速傅里叶变换把信号变换到频域,将晶片干涉信号 $[I_1(k) + I_2(k)]F_c \cos(kOPD + \varphi)$ 提取出来. 再利用其对应的频域值得到粗略的 OPD 值,在粗略 OPD 值 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 范围内、以 1 nm 为步进取得一系列 OPD 估计值,然后利用最小均方差算法,在一系列估计值中寻找模拟光谱信号与真实光谱信号的均方差最小时对应的数值,即为精准的 OPD 值,将其值与高温炉的温度值校正,得到关系式. 最后再根据此关系式,用采集的光谱信息解调出温度值.

2 传感实验研究

根据前述分析,将蓝宝石光纤端面研磨制备成 5° 角平面,能优化蓝宝石晶片干涉光谱质量,提高解调准确度;同时采用“陶瓷插芯-陶瓷套管”结构固定蓝宝石光纤和晶片,能满足高温传感的要求,又可以提高传感器的制作成功率.

2.1 结构传感器制备

传感器的结构如图 3,多模光纤与蓝宝石光纤熔接在一起,蓝宝石光纤与蓝宝石晶片相接触.

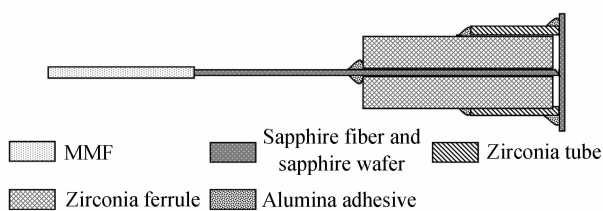


图 3 传感器探头结构

Fig. 3 Structural diagram of the sensor head

不同角度的蓝宝石光纤端面得到的干涉光谱如图 4. 使用 0° 角蓝宝石光纤得到的反射光谱是空气腔和晶体法珀腔等干涉光谱的叠加,如图 4 中虚线光谱图所示;而使用斜 5° 角蓝宝石光纤得到的反射光谱只保留蓝宝石晶片法珀腔产生的干涉光谱,为典型的晶体法珀腔干涉光谱,如图 4 中实线光谱图所示,信号质量明显提高,有利于解调.

将分离的蓝宝石晶片固定在斜 5° 蓝宝石光纤上时,使用高温胶进行粘接. 为了避免高温胶因毛细现象堵住插芯和污染晶片,本文使用图 3 所示“陶瓷插芯-陶瓷套管”结构来固定蓝宝石光纤和晶片,将陶瓷插芯

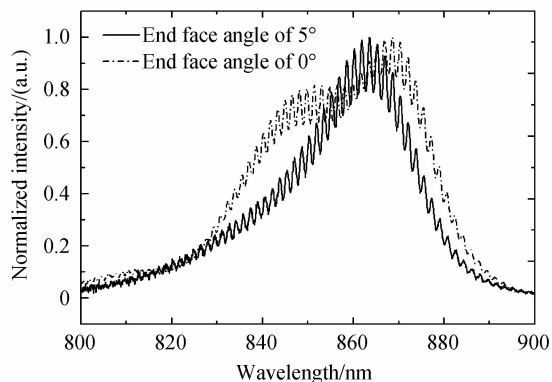
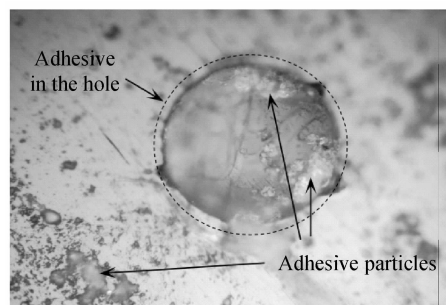


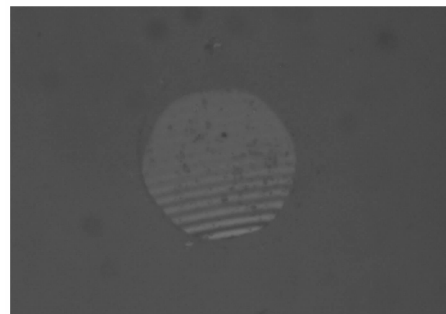
图 4 不同端面角光纤的干涉光谱

Fig. 4 The interference spectra of fibers with different end face angles

和蓝宝石晶片分离,既保证了晶片的光洁,又防止了高温胶因毛细现象渗入到插芯影响蓝宝石光纤的接入. 图 5(a)是将插芯、光纤和晶片直接粘接获得的显微镜图,可以看到涂敷的高温胶浸润到整个晶片表面并渗入到陶瓷插芯的空芯部,空芯已被高温胶堵住,同时晶片上附着有高温胶颗粒. 图 5(b)为使用“陶瓷插芯-陶瓷套管”结构固定的显微镜图,显微镜探测光通过蓝宝石晶片到达蓝宝石光纤 5° 端面上并反射,光纤端面与蓝宝石晶片形成规则的明暗相间等厚干涉直条纹,说明光纤端面与晶片表面未受高温胶污染,同时面型平整性很好,有利于形成高质量的法珀干涉信号.



(a) Sensor fixed by Zirconia ferrule



(b) Sensor fixed by the structure of "Zirconia ferrule-Zirconia tube"

图 5 传感器前端面的显微镜图

Fig. 5 Microphotograph of the sensor front face 根据结构图 3 制作的蓝宝石晶片型高温传感器实物如图 6.

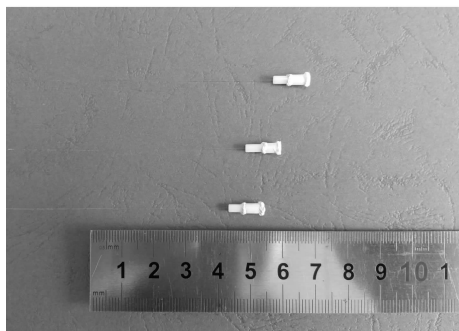


图 6 传感器实物

Fig. 6 Physical map of the sensor

2.2 测试结果和分析

按照高温传感实验系统图(如图 1)搭建实验平台,设置高温炉内的温度从 20℃ 上升至 1000℃,步进为 100℃. 每设定一个温度,先稳定 30 min 让炉内的温度分布均匀、稳定,再采集传感器的干涉谱. 如此重复 3 次实验. 当温度为 100℃、200℃ 时,测得的反射光谱如图 7,反射谱包络呈高斯曲线形状,这是受 850 nm 宽带光源的高斯形光谱调制所致. 从图 7 可以看出,随着温度的上升,干涉光谱向长波方向漂移,同时干涉周期变小.

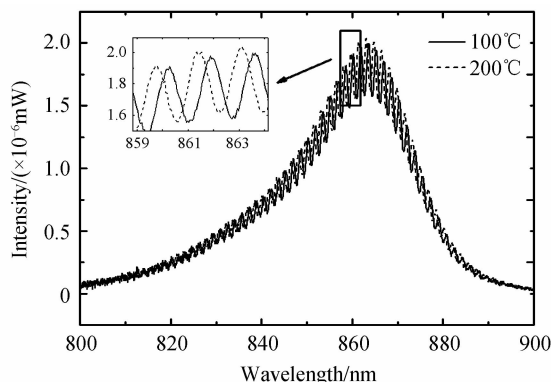


图 7 温度为 100℃ 和 200℃ 时的反射光谱

Fig. 7 The reflected spectrum at 100℃ and 200℃

当温度为 100℃、1000℃ 时,变换到频域的反射光谱信号如图 8,从图 8 中可以看出采用快速傅里叶变换

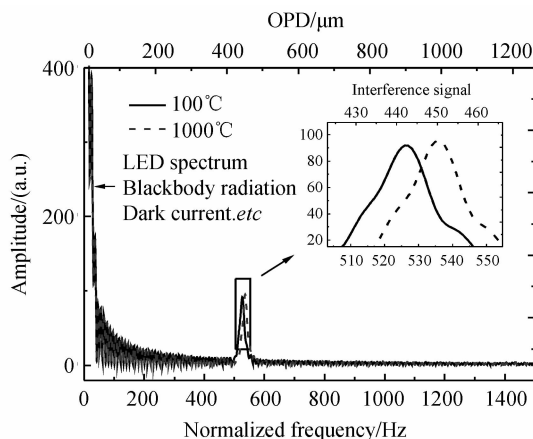


图 8 反射光谱的傅里叶变换

Fig. 8 FFT of the reflected spectrum

能将晶片干涉信号从直流背景中提取出来;同时温度越高,晶片干涉光谱的频域值越大,其对应的粗略 OPD 值也就越大. 快速傅立叶变换后再用最小均方差可以得到精确的 OPD 值.

对各温度下测得的 OPD 值取平均,再采用二次多项式对数据点进行拟合,得到的公式(OPD 和温度 T 的关系式)为

$$OPD = 2.09311 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 0.00586 \cdot T + 440.29241 \quad (2)$$

拟合曲线如图 9,拟合度高达 0.999 83,说明实验结果和理论吻合良好.

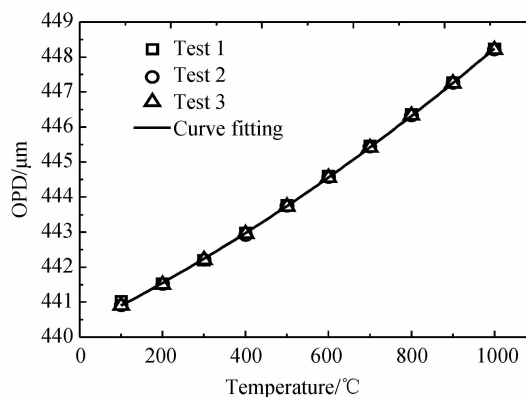


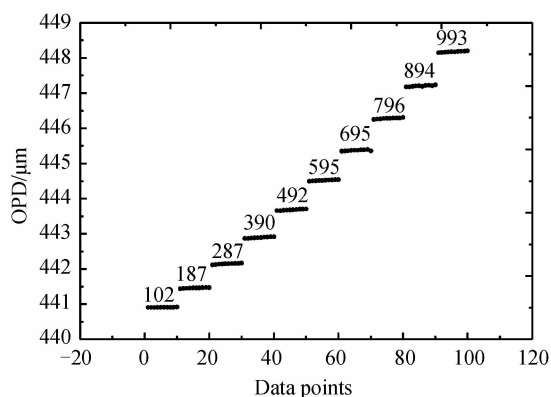
图 9 升温时重复三次获得的光程差

Fig. 9 Repeated measurement of OPD with three temperature increases

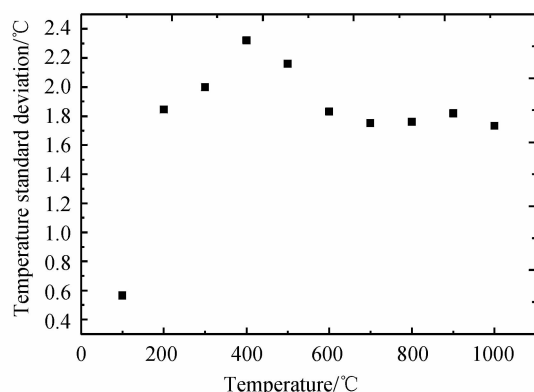
为了进一步测试系统的稳定性和可靠性,将炉内温度从 100℃ 上升到 1 000℃,步进设置为 100℃,在每个温度点重复测量 10 次. 采用联合算法解调得出的 OPD 值如图 10(a),其中数据点上方的数值是用式(2)计算出的各温度下的温度平均值. 从图中可以看出与实验过程很吻合,而且稳定性较好.

利用这些数据可以得出各温度下 OPD 的标准差 σ_{OPD} ,而由图 9 中所示的 OPD—温度 T 拟合曲线,可以得到 OPD 随温度 T 的变化率 $dOPD/dT$,因此,传感器的温度分辨率即温度标准差 σ_T 表示为

$$\sigma_T = \frac{1}{dOPD/dT} \sigma_{OPD} \quad (3)$$



(a) Obtained OPD at different temperatures



(b) The standard deviations of different temperatures

图 10 温度传感系统的稳定性测试结果

Fig. 10 The stability measurement result of temperature sensing system

根据式(3)计算出各温度下的温度标准差如图10(b).可以看出,在整个升温过程中,温度分辨率都保持在 2.5°C 以下.而高温炉本身的准确度仅为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,所以高温传感器的实际测温准确度可能会更高.根据实验中所用高温炉技术指标,其最低温为室温(当时实验室温度在 20°C 左右),最高使用温度是 $1\ 100^{\circ}\text{C}$,长期使用最高温度是 $1\ 000^{\circ}\text{C}$,所以实验中只对 $20^{\circ}\text{C}\sim 1\ 000^{\circ}\text{C}$ 的温度进行了测量.

3 结论

本文提出了一种基于蓝宝石光纤和蓝宝石晶片的法珀型高温传感器.为了扩大测温范围,采用蓝宝石晶片和蓝宝石光纤作为传感元件;为了提高测量准确度,采用傅里叶变换-最小均方差联合解调算法解调;为了避免光纤与晶片之间的干涉现象,将蓝宝石光纤端面研磨成 5° 角;为了杜绝高温胶污染光纤和晶片、提高制作成功率,采用了“陶瓷插芯-陶瓷套管”的加固结构.实验证明,该传感器干涉信号强、便于制作,测温范围 $20\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 内,测量准确度为 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$,同时,该传感器最高测量温度可望超过 1800°C ,准确度优于 1°C ,在工业中有潜在的应用价值和前景.

参考文献

- [1] MERBERG G N, HARRINGTON J A. Optical and mechanical properties of single-crystal sapphire optical fibers [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(18): 3201-3209.
- [2] SHEN Yong-hang, TONG Li-min, WANG Yan-qi, *et al.* Sapphire-fiber thermometer ranging from 20 to 1800°C [J].

Applied Optics, 1999, **38**(7): 1139-1143.

- [3] GOTTLIEB M, BRANDT G B. Fiber-optic temperature sensor based on internally generated thermal radiation [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(19): 3408-3414.
- [4] GROBNIC D, MIHAILOV S J, SMELSER C W, *et al.* Sapphire fiber bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(11): 2505-2507.
- [5] ELSMANN T, HABISREUTHER T, GRAF A, *et al.* Inscription of first-order sapphire Bragg gratings using 400 nm femtosecond laser radiation [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 4591-4597.
- [6] WNUK V P, MENDEZ A, FERGUSON S, *et al.* Process for mounting and packaging of fiber Bragg grating strain sensors for use in harsh environment applications [C]. SPIE, 2005, **5758**: 46-53.
- [7] WANG Jia-jun, DONG Bo, LALLY E, *et al.* Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(5): 619-621.
- [8] WANG Jia-jun, LALLY E, DONG Bo, *et al.* Fabrication of a miniaturized thin-film temperature sensor on a sapphire fiber tip [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(12): 3406-3408.
- [9] LEE Dong-wen, TIAN Zhi-peng, DAI Ji-xiang, *et al.* Sapphire fiber high-temperature tip sensor with multilayer coating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(7): 741-743.
- [10] HUANG Chu-jia, LEE Dong-wen, DAI Ji-xiang, *et al.* Fabrication of high-temperature sensor based on dielectric multilayer film on Sapphire fiber tip [J]. *Sensors and Actuators A* 232, 2015: 99-102.
- [11] ZHU Yi-zheng, HUANG Zheng-yu, SHEN Fa-bin, *et al.* Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(7): 711-713.
- [12] ZHU Yi-zheng, WANG An-bo. Surface-mount sapphire interferometric temperature sensor [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(24): 6071-6076.
- [13] TIAN Zhi-peng, YU Zhi-hao, LIU Bo, *et al.* Sourceless optical fiber high temperature sensor [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(2): 195-198.
- [14] ZHOU Xin-lei, YU Qing-xu. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(7): 1602-1606.
- [15] YIN Jia-di, ZHOU Ci-ming, OU Yi-wen, *et al.* Combined algorithm of fibonacci-MMSE for optical fiber Fabry-Perot sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0906002.
- 尹嘉笛,周次明,欧艺文,等. 光纤 Fabry-Perot 传感器的 Fibonacci-MMSE 联合解调算法 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(9): 0906002.