

激光与光电子学进展

高温环境下光纤法布里-珀罗微腔传感技术研究进展

刘铁根^{1,2,3}, 于迅^{1,2,3}, 王双^{1,2,3*}, 江俊峰^{1,2,3**}, 刘琨^{1,2,3}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

³天津大学光纤传感研究所, 天津 300072

摘要 光纤法布里-珀罗(F-P)微腔传感器具有抗电磁干扰、耐恶劣环境、体积小、精度高等诸多优点,基于光纤F-P传感技术的高温环境物理参量测量得到了研究人员的广泛关注。从光纤F-P干涉原理出发,介绍了F-P多光束干涉原理和光束耦合模型,以及用于干涉光谱信号解调的两种解调技术;讨论了基于光纤F-P传感技术在高温环境下物理参量测量的研究进展。在此基础上,分析了高温环境下光纤F-P传感在新工艺制造技术催生下,向着微型化、批量化制备和多用途化方向的发展趋势。

关键词 光纤光学; 法布里-珀罗; 高温; 多参量传感

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306002

Fiber-Optic Fabry-Perot Sensing Technology in High-Temperature Environments: An Review

Liu Tiegeng^{1,2,3}, Yu Xun^{1,2,3}, Wang Shuang^{1,2,3*}, Jiang Junfeng^{1,2,3**}, Liu Kun^{1,2,3}

¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

³Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Fiber-optic Fabry-Perot microcavity sensors have many advantages, such as antielectromagnetic interference, resistance to harsh environments, small size, and high accuracy. The measurement of physical parameters in high-temperature environments based on fiber-optic Fabry-Perot sensing technology has attracted wide attention from researchers. Based on the principle of fiber-optic Fabry-Perot interference, the principles of Fabry-Perot multibeam interference and beam coupling model, as well as two demodulation techniques for demodulation of interference spectrum signals were presented. In addition, the use of fiber-optic Fabry-Perot sensing technology in high-temperature environments was discussed. The research progress of physical parameter measurement based on the development trend of fiber-optic Fabry-Perot sensing in high-temperature environments toward miniaturization, batch preparation, and multipurpose due to the birth of new process manufacturing technology were analyzed as well.

Key words fiber optics; Fabry-Perot; high temperature; multi-parameter sensing

OCIS codes 060.2370; 120.6780; 130.6010

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-18; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61735011, 61675152, 62035006)、科技部重大科学仪器开发专项(2013YQ030915)、天津市高层次创新创业团队人才发展特支计划、天津131创新人才第一层次培养计划

通信作者: *shuangwang@tju.edu.cn; **jiangjfxu@tju.edu.cn

1 引言

高温环境下物理参量传感技术在航空、安防、军事、工业及环境监测等领域有着极其广泛的应用^[1],无论是对于航空发动机等高端精密机械的运行状态检测,还是对于生化反应、核能源反应等的状态监控,都具有重要意义。前沿技术的发展,对高温环境下的物理参量检测提出了更加严格的需求,在高温恶劣环境下实现对温度、压力、应力、折射率等物理参量的稳定、实时及准确地传感意义重大。传统高温环境下使用的电学传感器,如铂、铑等贵金属制造的热电偶传感器等,属于接触式测量,具有使用简单、技术相对成熟、易实现自动化测量和控制的优点,但其价格昂贵且在高温状态下抗氧化能力差,热电特性一致性较差,易受电磁干扰,无法应对高电磁辐射、狭窄管道、高温上限等监测环境的要求^[2-3]。基于红外热辐射的非接触式测量方法是利用高温物体的热辐射等相关原理进行高温环境下温度参量测量,该测量方法具有寿命长、响应快、不破坏温度场等优点^[4],但受到物体的发射率、烟尘和水蒸气、被测物到仪表之间的距离等因素影响,测量误差较大^[5]。

近年来,由于微电子技术、光学技术、信号分析及处理技术的飞速发展,光纤传感技术发展迅猛,作为新兴传感技术的代表,正向着高温环境下物理参量测量领域进军。相比于电学传感器,光纤传感技术具有以下优点:灵敏度高、抗电磁干扰能力强,不受外界电磁场干扰,绝缘性好,耐腐蚀性高,质量小,体积小,灵活方便等。光纤传感技术凭借其诸多优势,适用于高温环境物理参量监测,在航空航天发动机、石油化工等恶劣环境中有着广泛的应用。其中,基于蓝宝石材质的光纤传感器充分利用蓝宝石材料高熔点(2040 °C)、高硬度、耐化学腐蚀、光谱透射范围宽的特性,将光纤传感推向极高温环境下物理参量测量领域。基于蓝宝石光纤的传感器非常适合于在航空发动机、石油化工冶炼炉、核反应装置等装备设施内布置,可以实现对极高温环境下的实时监测,因此受到了国内外的广泛关注。近年来,随着光纤传感技术的不断发展,国内外已经开展了适用于高温环境下光纤温度传感器的研究,其主要技术分为光纤热辐射型、光纤光栅型、光纤法布里-珀罗(F-P)型三大类。

光纤热辐射器的主要基本原理为黑体辐射定

律,可探测温度达 2000 °C,精度达±1 °C。黑体辐射式高温传感技术以其极高的温度探测范围,得到了科研工作者广泛的研究。1983年,美国国家标准局 Dils 等^[6]首次在蓝宝石光纤端部溅射黑体辐射腔,制成世界上第一支基于蓝宝石光纤黑体热辐射腔的高温传感温度计,实现了 600~2000 °C 范围的温度测量。1989年,我国清华大学的周炳琨院士^[7]也成功研制出基于蓝宝石光纤感温微型黑体腔的热辐射式高温传感系统,该高温传感系统的测温范围为 400~1300 °C。2017年,Guo 等^[8]通过在蓝宝石光纤端部溅射金属钼薄膜构造黑体辐射腔,将测温范围扩展至 1880 °C。热辐射性质决定了黑体辐射强度随温度升高呈指数型增长的特性,其在极高温段(1000 °C 以上)具有较高的测温灵敏度,而在 600 °C 以下温度段,辐射强度保持在较小的量级且变化缓慢,导致测温灵敏度降低,因此该类型传感器主要应用于 600 °C 以上高温段的温度测量。针对黑体辐射式传感器在较低温度区间的不敏感性,1999年,Shen 等^[9]通过在蓝宝石光纤端部嫁接一段红宝石光纤,利用其荧光特性弥补低温区间的测温敏感性不足的问题,实现了室温至 1800 °C 的温度传感,温度分辨率为 1 °C。但是蓝宝石光纤嫁接工艺复杂,需要对蓝宝石光纤端部进行 Cr³⁺掺杂,传感器制作难度大,且信号采集处理系统需要同时实现热辐射和荧光监测,系统复杂,成本较高。此外,完美的黑体腔在现实中是不存在的,辐射功率会受到蓝宝石光纤本身自发辐射量的影响^[10],通常需要对传感器进行全温标定,以提高重复测量稳定性,故对标定技术的准确度和传感器热辐射的稳定性要求较高。

光纤光栅型传感器^[11]多应用于温度和应力两物理参量监测,传感原理是:光源发出的光入射到布拉格光栅后,满足布拉格条件的光波被反射,反射回窄带光谱信号;当光纤布拉格光栅受到所处环境物理参量变化调制时,反射波长发生相应的改变,通过监测反射波长的该变量可以得到待测温度、应力等参量值。2002年,Fokine 等^[12]使用氟掺杂光纤制作化学合成耐高温光纤光栅,这种光纤光栅折射率调制归因于氟扩散产生的周期性折射率变化,实验表明其可以承受超过 1000 °C 的高温;2015年,Pan 等^[13]在蓝宝石光纤上刻蚀光栅,测温最高可达 1900 °C,分辨率为±2 °C。2018年,Chen 等^[14]采用飞秒激光刻蚀技术在大芯径蓝宝石光纤上刻蚀了一种高阶光栅,该光栅可以实现高温环境(温度最高

1690 °C)下温度和应力双参量传感。2019年,Guo等^[15]采用飞秒激光逐行扫描的方法,在直径为60 μm的单晶蓝宝石光纤中制备了三阶光纤 Bragg 光栅,实现了更高的反射率,反射率可达15%左右,提高了测温灵敏度,实现了室温到1600 °C,灵敏度为34.96 pm/°C的温度传感。同年,Xu等^[16]通过飞秒激光在蓝宝石光纤上刻蚀多层 Bragg 光栅,进一步增加 Bragg 反射率,将反射峰的半峰全宽降低到1.32 nm,实现了1612 °C高温下灵敏度为45.2 pm/°C的温度传感。但光在蓝宝石光纤中均以多个模式进行传输,模式的稳定性使得测量精度提高较为困难。且制作蓝宝石光纤光栅需要大功率飞秒激光器,制作系统复杂,维护困难,成本较高,批量化制备难度大,限制了其发展应用。

高温环境下的光纤 F-P 型传感技术可采用多种材料、多种制作方法,如将两段抛光的蓝宝石光纤对接即可构建 F-P 微腔。经过多年的发展,应用于高温环境下的光纤 F-P 传感器技术逐渐完备,测温区间包括室温至1900 °C,测量领域被扩展至温度、压力、应力、折射率等多参量监测范畴,且具有测温精度高、灵敏度高、可批量化制备的优点。近年来

随着先进工艺和技术的发展,光纤 F-P 传感器逐渐向着微型化、多用途化发展,非常适用于航空发动机等工业领域。因此,本文将重点介绍用于高温环境下物理参量测量的光纤 F-P 传感技术的研究进展,光纤 F-P 传感技术的宽测温范围、高精度和多用途化,使其有望在航空航天发动机、石油化工、地质勘探、核能源控制等诸多领域得到广泛应用。

2 光纤 F-P 传感基本原理

光纤 F-P 传感器^[17-18]的本质是 F-P 多光束干涉仪,外界物理参量的变化改变了 F-P 干涉仪的干涉光谱强度、相位、光程差等信息,对上述光谱信息进行解调,即可获得待测物理参量值。

2.1 光纤 F-P 干涉基本原理

法布里-珀罗微腔多光束干涉模型如图1所示,光源发出的光在 F-P 干涉仪两个平行反射面之间经过多次反射和折射,形成多束平行透射光和反射光。设入射光的振幅为 A_0 , r 和 t 分别是光束进入平行反射面时的振幅反射系数和透射系数, r' 和 t' 分别是光束离开平行反射面时的振幅反射系数和透射系数,由矢量的叠加原理可知, M 点的振幅 A_r 可以表示为

$$A_r = \sum_{n=1}^{\infty} A_m = rA_0 + \lim_{n \rightarrow +\infty} tt'r'A_0 \exp(i\delta) \cdot \frac{1 - [r'^2 \cdot \exp(i\delta)]^n}{1 - r'^2 \cdot \exp(i\delta)}, \quad (1)$$

式中 δ 表示相位差。那么,反射光强 I_r 可表示为

$$I_r = A_r \cdot A_r^* = \frac{2\rho(1 - \cos \delta)}{1 + \rho^2 - 2\rho \cos \delta} \cdot I_0, \quad (2)$$

式中反射率 $\rho = r^2$, I_0 为初始光强。由上述(1)式和(2)式可知,当光纤 F-P 传感器反射率 ρ 较小时,二次及其以上的干涉光束对干涉条纹的贡献可以忽略, F-P 腔内发生近似双光束干涉,反射光干涉光强可近似表示为

$$I_r = 2\rho I_0 (1 - \cos \delta). \quad (3)$$

相邻两束反射光之间具有确定的相位差和光程差。在不考虑半波损失的情况下,其光程差 Δ 和相位差 δ 分别为

$$\Delta = 2nh \cos \theta_2, \delta = \frac{4\pi nh \cos \theta_2}{\lambda}, \quad (4)$$

式中 n 为反射面间物质的折射率, θ_2 为光线在反射面内的倾角, h 为平行反射面间的距离, λ 是入射光波长。外界物理参量作用于 F-P 腔时,会改变反射光束的强度、相位、波长、偏振态等信息。通过对以上信息进行解调,即可获得外界物理参量的变化量。光

纤复合 F-P 干涉仪是在双反射面的 F-P 干涉仪基础上再增加一个反射面,由级联的两个 F-P 干涉仪构成,常用于双参量监测领域。当一束光入射到具有三个反射面的复合 F-P 微腔传感器中,经过三个反射

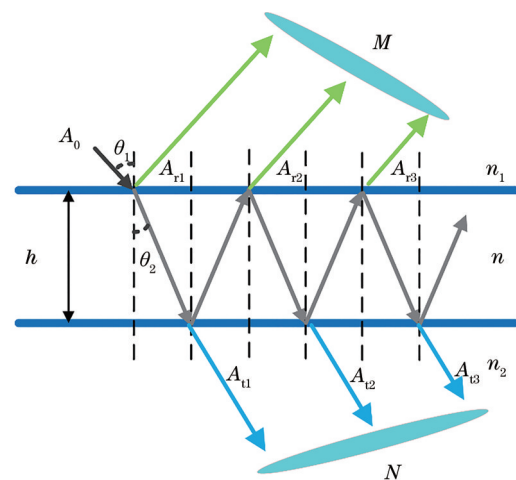


图1 法布里-珀罗微腔多光束干涉模型

Fig. 1 Multi-beam interference model of Fabry-Perot microcavity

面时产生的三束反射光的总反射振幅可以近似看作是由三个反射面的一次反射光叠加而成,高次反射光的总贡献很小,故同样可近似为双光束干涉。

2.2 光纤 F-P 光束耦合模型

根据光纤本身是否作为传感元件,可以将光纤 F-P 传感器分成两类:本征型光纤 F-P 传感器和非本征型光纤 F-P 传感器。其中,对于本征型光纤 F-P 传感器而言,光纤本身既作为光信号的传导光纤又作为对外界参量的敏感单元。在传感过程中光始终被约束在光纤内部,其具有几乎全部的耦合效率。而对于非本征型 F-P 传感器来说,光纤的作用主要是发送光束进入传感微腔,然后再将携带干涉信息的光束接收回来,其光束耦合模型如图 2 所示。光从光纤射出后,不再受纤芯束缚,向外发散传播后,经过微腔两个反射面反射回的光只能有一部分耦合回纤芯中,即两束反射光存在光纤耦合效率 η_1 和 η_2 。常用于分析非本征 F-P 干涉的光束传输耦合特性的理论模型可分为三种:1)由几何光学近似建立光波传播耦合模型,在光波耦合效率计算过程中假设功率均匀分布,即均匀平面波假设^[19];2)由高斯光束近似建立光波传播耦合模型,在光波耦合效率计算过程中假设功率以高斯型功率分布,即高斯功率分布假设^[20];3)由高斯光束近似建立光波传播耦合模型,在光波耦合效率计算过程中利用模式耦合理论分析,即高斯模式耦合假设^[21-22]。设两反射面的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,而光纤耦合效率相当于削弱了反射面的有效反射率,两反射面等效反射率为 $\eta_1 R_1$ 和 $\eta_2 R_2$,则出射光强度为 I_i 时,两反射面耦合回的有效光强 I_1, I_2 分别为

$$I_1 = \eta_1 R_1 I_i, I_2 = \eta_2 (1 - R_1)^2 R_2 I_i, \quad (5)$$

双束光干涉的反射光谱光强 I_R 则表示为

$$I_R = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (6)$$

对于反射面更多的复合 F-P 干涉仪而言,其耦合效

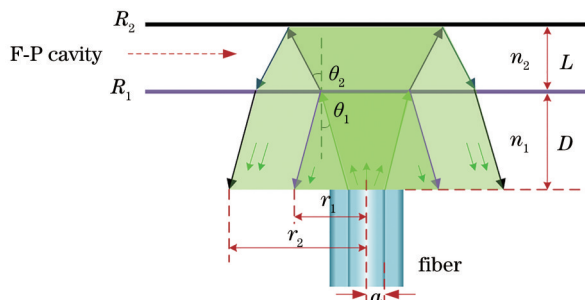


图 2 法布里-珀罗腔反射光束与光纤耦合模型

Fig. 2 Reflected beam and fiber coupling model of Fabry-Perot cavity

率依然可以通过类似方法进一步求得。

2.3 光纤 F-P 干涉解调方法

光纤 F-P 传感器的解调,就是根据其反射光携带的信息求解出腔长、光程差、相位等信息,进而反推出外界被测物理量的值。F-P 传感信号的解调方法是获得高精度光纤 F-P 传感系统的重要支撑,目前应用较广泛、解调精度较高的两种解调方法是基于光谱的解调方法^[23]和基于互相关的干涉解调方法^[24]。基于光谱的解调方法是通过对干涉光谱的周期和频率特征与传感器干涉光程差的关系,利用光谱仪获得 F-P 传感器的反射光谱,然后通过分析光谱所携带的相位差信息,从而进行解调的方法^[25],具体可分为波长域的峰值追踪解调法^[26]、基于傅里叶变换的频域解调法^[27]和基于互相关干涉的解调方法。基于互相关干涉的解调方法是利用另一个光程差已知的参考干涉仪与传感器的干涉光程差作对比,从而求解出传感器待测干涉光程差的方法。

2.3.1 峰值追踪解调法

峰值追踪法是通过 F-P 传感器反射光谱的峰值与干涉相位的关系进行解调的方法,又分为单峰追逐法、双峰追逐法和多峰追逐法^[28-30]。单峰解调法的测量精度主要取决于光谱仪探测的最小分辨率、寻峰算法和系统的信噪比,优点是分辨率高、简单易行。但弊端是无法获得干涉级次的信息,这将导致测量范围局限在一个自由光谱范围之内,且只能实现干涉光程差的相对测量。双峰解调法可以求得 F-P 传感器的绝对光程差,能够解决干涉级次模糊问题,但是其误差与干涉级次、两个波峰的寻峰结果都有关系,因此误差相较于单峰法大一些。多峰解调法能够充分利用所有波长信息,干涉级次的计算更加准确,测量精度比双峰法有所提高,但这种方法只能在干涉光谱包含 4 个波峰以上的时候运用,应用受限。

2.3.2 傅里叶频域解调法

傅里叶频域解调法是基于反射光谱频域与干涉相位之间的关系进行解调的方法^[31]。该方法在频域选择信号波段,可解调的光程差动态范围非常大,理论上可解调的最小光程差应大于光源相干长度的 2 倍。该方法充分利用了光谱信息,消除了光源的不稳定波动和高频噪声的影响,相比于峰值追踪法,解调精度更高,应用广泛。

2.3.3 互相关干涉解调法

基于互相关干涉理论的光纤传感解调方法是

通过光程差匹配进行解调的方法。1984年, Bosselmann等^[32]利用光纤互相关干涉技术实现了位移的精密测量,同时说明任何可以转化为位移(或光程差变化)的其他物理量都可以采用互相关干涉技术来进行测量,例如压力^[33]、温度^[34]、应变^[35]。互相关干涉解调技术具有测量精度高、可绝对测量的优点,被广泛应用于F-P干涉解调。其解调核心是实现光程差间的扫描匹配,因此需要搭建与待解调光程差区间配套的空间或时间扫描系统,该系统结构相对复杂,适用于高精度传感场景。

3 高温环境下的光纤单F-P微腔传感研究现状

光纤F-P传感技术起源于1988年^[36],用于高温环境下物理参量的传感始于1992年^[37],其主要集中于高温环境下温度参量传感,后逐步向压力、应力等物理参量监测领域发展。当外界物理参量作用于F-P干涉仪的敏感腔体时,改变F-P腔的长度等信息可使干涉信号发生变化,进而实现传感。

3.1 基于蓝宝石光纤拼接式F-P微腔高温传感器

1992年,美国弗吉尼亚理工的Wang等^[37]使用

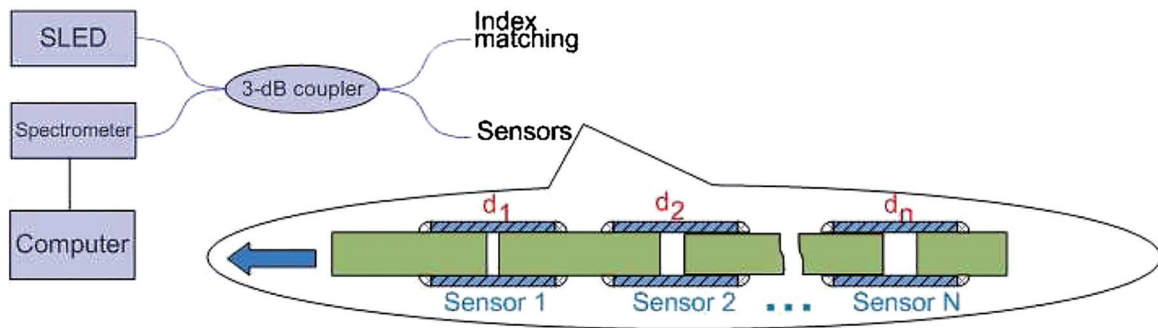


图3 三段拼接式空气间隙F-P传感器示意图^[38]

Fig. 3 Configuration of three spliced air gap-based Fabry-Perot sensor^[38]

2020年, Yang等^[40]通过飞秒激光加工辅助激光焊接技术在蓝宝石光纤端面上构造了一个纯蓝宝石结构的F-P传感器。其首先对蓝宝石光纤端面进行微结构加工,构造一个凹槽,凹槽底面显微图像和扫描电镜图像如图4(a)和图4(b)所示。然后通过激光加热进行平滑处理,平滑后凹槽底面显微图像和扫描电镜图像如图4(c)和图4(d)所示。接着将一片双面平行抛光的蓝宝石晶体片焊接在蓝宝石光纤端面的凹槽上沿,焊接而成的传感器头图像

蓝宝石光纤制成F-P腔,将两段蓝宝石光纤面打磨平整,利用耐高温刚玉毛细管作为对准器件,将两个抛光的蓝宝石光纤端面对齐固定,形成拼接式光纤F-P高温传感器,实现了最高1500℃的温度测量。这种构型对蓝宝石光纤端面的研磨抛光程度要求较高,F-P干涉仪的平行度很大程度上依赖于刚玉毛细管中空孔径的准直作用。2010年, Wang等^[38]利用多段蓝宝石光纤依次拼接的方式,构成三段串联的空气间隙F-P腔,制成三段复合式蓝宝石光纤F-P传感器,传感系统原理如图3所示。通过调整三段F-P空气间隙的光程差,形成梯度差异,在反射光谱的频域将不同F-P间隙调制的干涉信号依次提取并分别进行处理,实现了200~1000℃范围的分点式测温。2003年, Xiao等^[39]将两段蓝宝石光纤固定在耐高温陶瓷应力片上,构成应力敏感F-P腔,实现了在1004℃高温环境下的应力参量测量。光纤拼接式F-P传感器的使用领域逐渐向多点测量方向发展。但是基于外加准直器件的F-P干涉仪反射面之间的平行度受到耐高温中空毛细管工艺限制;且刚玉毛细管与蓝宝石光纤之间热膨胀系数存在差异,在反复的高温测试中受衔接处切向拉力的作用,F-P空气间隙稳定性较差。

如图4(e)所示(插图显示为焊接平面上视图)。最后通过飞秒激光将光纤以外部分切除,完成传感器制作。该方法制作的蓝宝石光纤尖端传感器,实现了1900℃的高温传感。该种构型理论上可以将温度测量区间扩展至蓝宝石光纤材料本身温度上限,且尺寸小、适用性好,但加工工艺复杂,需要特别注意光纤加工精细度及熔接参数的设置。

3.2 基于耐高温氧化物薄膜F-P微腔的高温传感器

2011年, Wang等^[41]在一段蓝宝石光纤抛光端

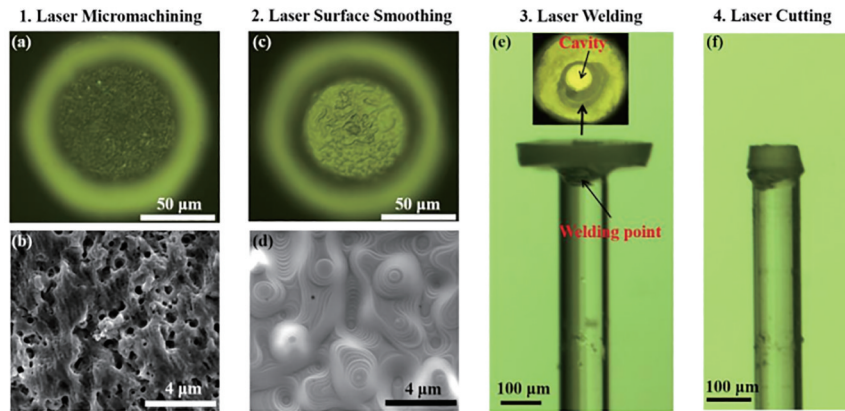


图 4 飞秒激光微加工和 CO₂ 激光焊接法构造纯蓝宝石结构 F-P 传感器时的实验结果图^[40]。(a)(b) CO₂ 激光进行表面加热平滑前凹槽底面的显微图像和扫描电子显微图像; (c)(d) 激光平滑后的凹槽底面对应的显微图像和扫描电子显微图像; (e) 激光焊接的传感器头的图像(插图显示为焊接平面上视图); (f) 制成的传感器头的图像

Fig. 4 Experiment results of all-sapphire single-crystal fiber Fabry-Perot sensor fabricated by femtosecond laser micro-machining and CO₂ laser welding^[40]. (a)(b) Microscopic and scanning electron microscopic image of the bottom surface of the pit before the CO₂ laser surface smoothing; (c)(d) corresponding microscopic and scanning electron microscopic image after the CO₂ laser surface smoothing; (e) image of the laser-welded sensor head (the inset shows the image of at the welding plane); (f) image of the fabricated sensor head

面上以电子束蒸发镀膜的方式涂覆一层 Ta₂O₅ 薄膜,构造出一个微型薄膜 F-P 腔,实现了 1000 °C 的温度测量,薄膜式光纤 F-P 传感器及系统示意如图 5 所示。2015 年, Lee 等^[42] 进一步在蓝宝石端面涂覆多层耐高温 ZrO₂/Al₂O₃/ZrO₂ 薄膜,利用薄膜的干涉光谱特征测量薄膜厚度,精确构造特定腔长的 F-P 微腔,实现了 400~1000 °C 范围的温度测量。这种方法解决了依靠准直器件带来的复杂工艺问题,进一步压缩了传感器体积。但是测温上限受到了耐高温氧化物材料的限制,故这种方法难以向更高温区间发展。

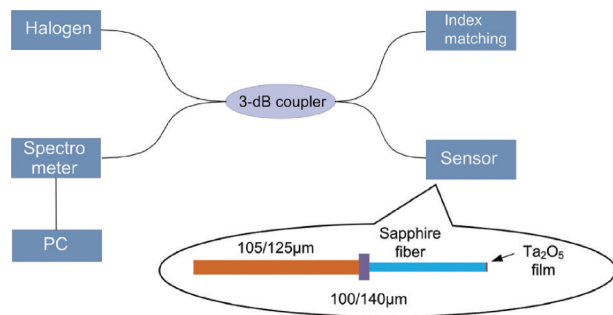


图 5 薄膜式光纤 F-P 微腔传感器及系统示意图^[41]

Fig. 5 Schematic diagrams of thin-film fiber-optic Fabry-Perot microcavity sensor and sensing system^[41]

3.3 基于硅材料的 F-P 高温传感器

2017 年, Liu 等^[43] 通过紫外(UV)胶定型、电弧放电加热的方式将一个微型的硅晶体柱焊接在单模光

纤端面上,形成一个微型 F-P 腔,这种焊接方法一定程度上降低了制作难度,其原理是利用单晶硅材料在近红外波段的透光性来实现传感。硅晶体材料具有很好的热光性能和热传导性能,这种硅基尖端传感器具有高精度、高响应速度和可批量化生产的优势,可实现 1000 °C 以下的高温传感。但是由于石英光纤本身材料熔点的限制,不适用于 1000 °C 以上测温。

3.4 膜片式光纤 F-P 传感器

膜片式光纤 F-P 传感的传感元件不再局限于光纤本身^[44], 光纤只作为传输、接收光信号的波导,其外接敏感器件承担感知功能和光信号调制作用,因此膜片式光纤 F-P 传感器具有极佳的功能拓展性,其测量参量也从温度扩展到了温度、压力等。尤其是在针对于蓝宝石光纤的微加工技术还不成熟的阶段,通过外置高温敏感元件,解决了极高温段(1000 °C 以上)的传感需求。

2005 年, Zhu 等^[45] 利用一片双面平行抛光的蓝宝石实心晶片构建传感 F-P 腔,将蓝宝石光纤与多模石英光纤熔接作为复合传输波导,构建反射式传感回路,实现了 230~1600 °C 范围的温度传感,测温精度达 ±3 °C。随后 2006 年, Zhu 等^[46] 进一步研制了一种新型膜片式结构,通过将蓝宝石光纤端面研磨成 45° 角,再与蓝宝石晶片平行布置,构成如图 6 所示倾斜膜片式传感结构,该结构不再依赖准直器件对光纤位置的固定,一定程度上简化了传感结构,但因光路传

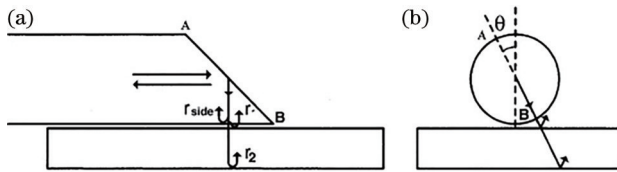


图 6 45°倾斜光纤膜片式传感头示意图^[46]。(a) 45°倾斜光纤膜片式传感光路图；(b) 45°倾斜光纤膜片式传感器光纤轴向图

Fig. 6 Schematic diagram of 45° inclined fiber diaphragm sensor head^[46]. (a) Sensing optical path diagram of 45° inclined optical fiber diaphragm sensor; (b) axial diagram of 45° inclined fiber diaphragm sensor

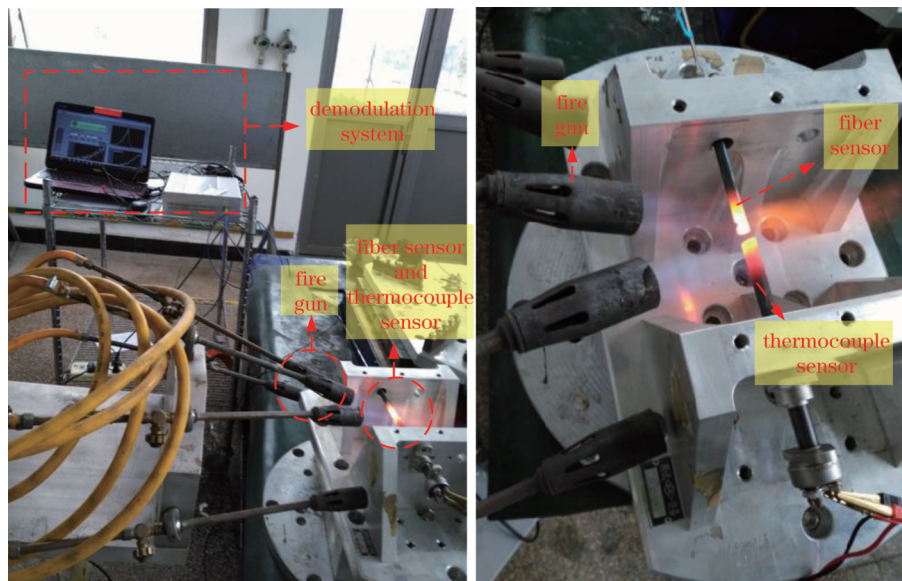


图 7 膜片式蓝宝石光纤 F-P 传感器火焰实验实物图

Fig. 7 Actual picture of the flame experiment of the patch type sapphire fiber Fabry-Perot sensor

膜片式 F-P 传感器将敏感的 F-P 微腔外置, 相比于光纤本身作为敏感元件的光纤 F-P 传感器, 可以较好地控制 F-P 反射面间的平行度, 但这也使得光路超出光纤本身之外传输, 衔接传导光纤与敏感 F-P 器件之间存在的机械误差一定程度上降低了传感器干涉信号的质量, 且对传感器制作工艺要求较高, 干涉信号条纹可见度均低于 20%。这给解调技术带来了较高的难度, 导致测量误差增大。同时, 造成干涉信号条纹可见度降低的另一个重要因素是蓝宝石光纤与石英光纤异质光纤结合点处的背景反射光。制作精细度和异质光纤熔接点处的反射共同制约着传感器信号质量的提升。

2015 年, Tian 等^[49]提出了一种基于自发辐射光作为光源的膜片式 F-P 传感器, 不同于常规自发辐射的强度调制原理, 该传感器利用黑体辐射源照射

输方向通过光纤研磨角度来控制, 故增大了蓝宝石光纤研磨加工难度。2011 年, Yi 等^[47]采用热压键合的方式将一片薄的蓝宝石窗口片与一个带腐蚀凹槽的蓝宝石基底直接键合, 构造出一个接近真空的 F-P 中空腔, 实现了压力参量传感。在耐高温基础上对其压力传感性能进行测试, 实现了 0.04~1.38 MPa 范围的的压力测试。此研究将 F-P 传感技术向着高温下压力传感方向延伸。2017 年, 天津大学江俊峰等^[48]针对膜片式蓝宝石光纤 F-P 传感器的灵敏度、信噪比、干涉级次跳变等进行了理论分析与实验验证, 并对传感器进行了如图 7 所示火焰环境实验测试, 验证了其在高温火焰喷射环境下的传感稳定性。

一片内置的蓝宝石实心晶片, 晶片两表面反射光形成 F-P 干涉, 再由一个蓝宝石光纤将干涉信号引导至探测设备, 这一设计解决了异质光纤熔接点处反射背景光问题, 实现了无源条件下 1593 °C 的高温传感, 温度分辨率达到 1 °C。但该类传感器受激辐射源输出严重依赖外界热源, 在温度低于 600 °C 时, 信号强度无法被探测, 使传感器的温度适用范围受限。此外, 由于热源的不稳定性, 该种构型的传感器存在与常规黑体辐射传感器相同的信号波动问题, 基准光信号紊乱, 综合来看, 对传感器干涉条纹质量提升有限。2019 年, Yu 等^[50]通过如图 8(a) 所示并行双波导的光路传输结构, 采用一路输入波导将稳定的基准光源信号照射到蓝宝石实心晶片上, 另一路光纤波导对干涉信号进行接收, 实现了输入、输出光分路传输, 传感光路如图 8(b) 所示, 该新

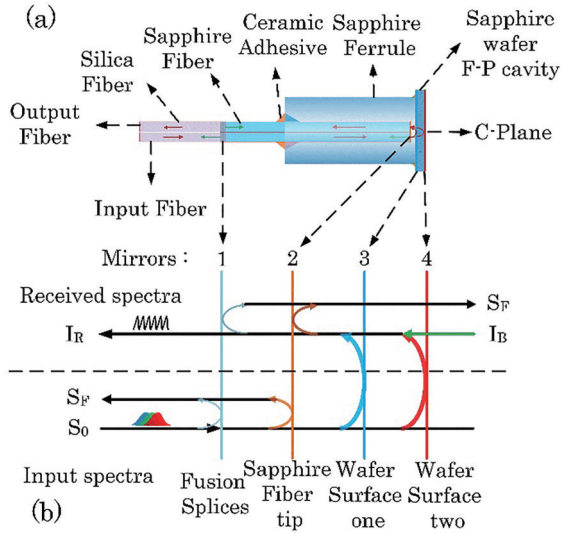


图 8 并行双波导 F-P 高温传感^[50]。(a) 传感器结构示意图；
(b) 传感光路示意图
Fig. 8 Parallel dual-waveguide Fabry-Perot high temperature sensor^[50]. (a) Structure diagram of the sensor;
(b) schematic diagram of the sensing optical path

型传感机制在光路设计上绕开了异质光纤耦合点处的背景反射,极大程度地提升了干涉光谱信号质量,将干涉条纹可见度提升至 43.96% 以上,实现了分辨率为 0.22 °C 的 1080 °C 高温测量。

4 高温环境下的光纤复合 F-P 微腔双参量传感

复合 F-P 双腔传感技术是在一个传感器上级联了两个及两个以上的复合 F-P 微腔,并利用多个不同 F-P 腔的传感特性实现对外界两个参量的分别传感。复合 F-P 微腔的制作方法主要包括激光刻蚀、光纤腐蚀、光纤熔接等微加工技术以及蓝宝石键合等技术。复合传感器的信号光谱是由多个 F-P 微腔干涉信号叠加组成,通过优化传感器设计及运用适当的解调技术可以最大程度地降低信号杂糅带来的干涉级次模糊问题。在进行温度-压力、温度-折射率等双参量监测时,光纤复合 F-P 传感技术通常会受到双参量交叉敏感的影响。在实际应用中如何降低交叉敏感,是复合双参量传感技术走向实用化的关键。目前常利用传感器自身测得的温度参量对与温度敏感的另一参量进行补偿,来降低由温度交叉敏感带来的测量误差。

4.1 基于普通单模光纤的复合 F-P 双参量传感器

2013 年, Ran 等^[51]利用 157 nm 激光器直接在单模光纤纤芯上加工出了一个矩形截面槽,将该槽与尾端光纤结合制成光纤尖端复合 F-P 腔,其可应用于

高温、折射率、应力等多参量的测量,制作工艺减少了光纤拼接的步骤,制作难度降低,其传感结构如图 9 所示。但是激光微加工技术对设备要求极高,尤其是飞秒激光加工,故难以实现传感器批量制作。

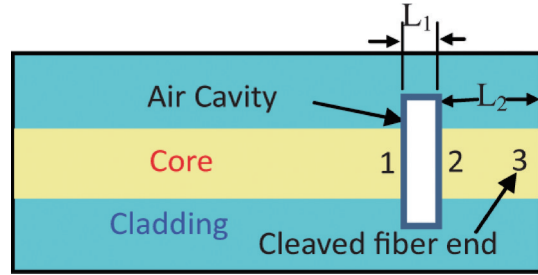


图 9 激光微加工式复合 F-P 传感器示意图^[51]
Fig. 9 Schematic diagram of laser micromachined composite Fabry-Perot sensor^[51]

4.2 基于蓝宝石衍生光纤的光纤复合 F-P 双参量传感器

2019 年, Zhang 等^[52]基于光纤腐蚀技术,在蓝宝石衍生光纤尖端处刻蚀出一个微槽,然后将这段蓝宝石衍生光纤两端分别与单模石英光纤和毛细微管进行拼接,构成复合 F-P 传感结构,如图 10 所示,该传感器实现了 20~1000 °C 温度范围内高温和应力双参量的传感。2018 年, Zhang 等^[53]通过将单模光纤、蓝宝石衍生光纤和晶体化蓝宝石光纤三者依次拼接,研制出可用于高温和折射率双参量传感的复合 F-P 双腔传感器,拼接式复合 F-P 传感器结构示意图和显微图如图 11(a) 和图 11(b) 所示,经实验验证该复合传感器测温范围达到 1000 °C,折射率测量范围为 1.333~1.363。

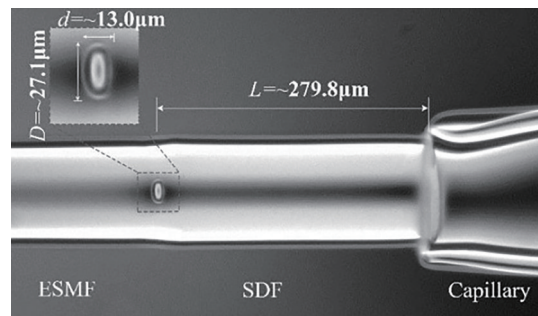


图 10 腐蚀法结合光纤拼接技术制作的光纤复合 F-P 传感器显微图^[52]
Fig. 10 Micrograph of the composite fiber-optic Fabry-Perot sensor made by the etching method combined with the optical fiber splicing technology^[52]

4.3 基于单晶硅的复合 F-P 双参量传感器

2017 年, Jia 等^[54]将一个空心单晶硅光纤与单模

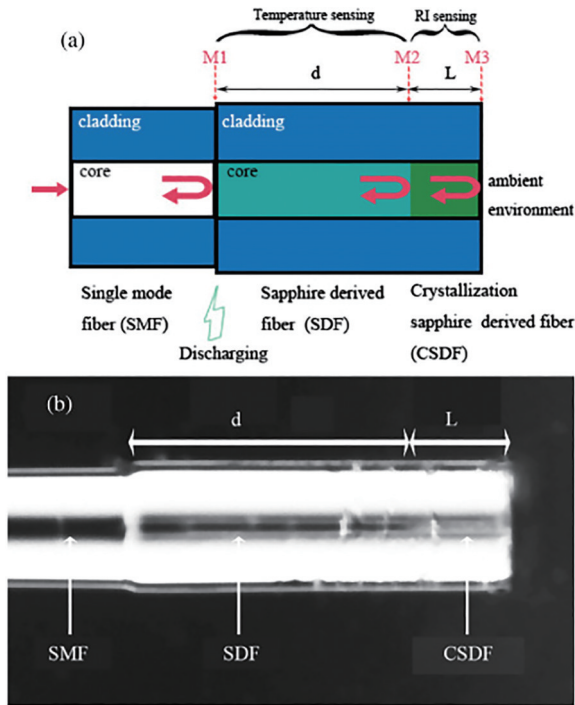


图 11 特种光纤拼接式复合 F-P 传感器^[53]。(a)结构示意图；(b)显微图

Fig. 11 Special fiber splicing composite Fabry-Perot sensor^[53]. (a) Schematic diagram; (b) micrograph

光纤通过单晶硅毛细管拼接固定,外界空气介质通过空心单晶硅光纤的中孔与内部的空腔连通,在 800 °C 高温环境下实现了温度和气体折射率双参量传感。2021 年, Wang 等^[55]利用微机电系统 (MEMS) 工艺制作了一种纯硅基复合 F-P 芯片用

于中高温环境下大气压力传感,全硅传感器结构、光路传输模型如图 12(a)和图 12(b)所示。单晶硅在近红外波段具有较高的反射率,对其干涉光谱信号进行仿真,仿真结果如图 12(c)所示,可知全硅复合 F-P 传感器具有较高的干涉光谱质量,且键合工艺精密、成熟,利于批量生产。键合的复合 F-P 硅芯片一体成型,无须进行外部固定,且利用纯硅材质构建敏感 F-P 腔,避免了材料性质不同引入的衔接处的热应力影响。温度压力交叉敏感特性可以通过温度参量进行补偿,精度高,能够实现 700 °C 以下, 3~283 kPa 大气压力下的双参量监测,温度压力交叉灵敏度仅为 5.96 Pa/°C。

4.4 基于蓝宝石键合膜片的复合 F-P 双参量传感器

蓝宝石键合膜片式复合 F-P 双参量传感器大多利用蓝宝石键合工艺和激光切割形成的蓝宝石敏感元件堆叠结构,实现敏感 F-P 微腔的串联集成,从而用于高温环境下双参量传感。2019 年, Li 等^[56]利用蓝宝石晶体键合而成的复合 F-P 双腔芯片构造光纤传感器,传感器结构示意图及干涉光路示意图如图 13(a)和图 13(b)所示。研究了蓝宝石复合 F-P 传感器的温度特性和压力特性,实现了室温至 800 °C 下 20~700 kPa 的压力传感。2019 年, Chen 等^[57]采用 MEMS 键合工艺,利用蓝宝石晶体 (作为芯片基底)、环形腔体和压力膜片构建了与上述类似的纯蓝宝石复合 F-P 传感器,采用双波段低相干菲佐干涉仪进行信号解调,分析了温度与压力

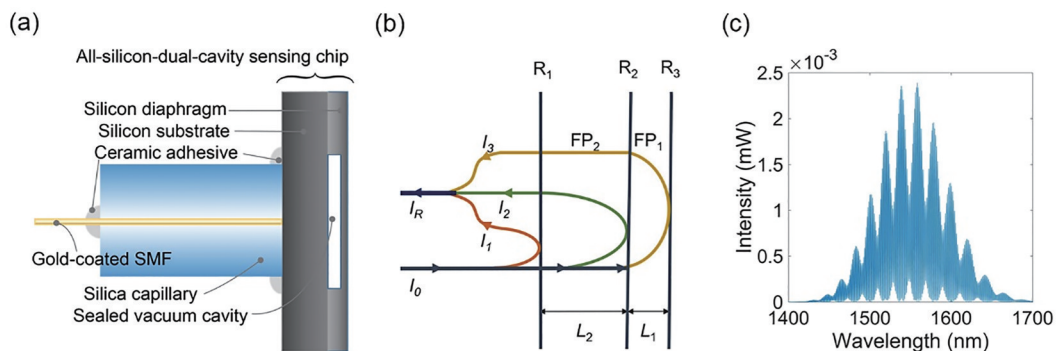


图 12 全硅双腔光纤压力传感器结构及传感特征图^[55]。(a)传感器结构示意图(所有组件均为耐高温材料);(b)具有三个反射面的双腔结构的干涉模型;(c)反射光谱 $I_R(\lambda)$ 的模拟(模拟参数: $n_1=1, n_2=3.47, L_1=60 \mu\text{m}, L_2=300 \mu\text{m}, I_0$ 是中心波长为 1550 nm 的宽带光源的光强)

Fig. 12 Structure and sensing characteristics of all-silicon dual-cavity optical fiber pressure sensor^[55]. (a) Schematic diagram of the all-silicon-based dual-cavity fiber-optic pressure sensor structure (all the components are high-temperature resistant materials); (b) interference model of the dual-cavity structure with three reflective mirrors; (c) simulation of reflected spectra $I_R(\lambda)$ (simulation parameters: $n_1=1, n_2=3.47, L_1=60 \mu\text{m}, L_2=300 \mu\text{m}, I_0$ is the light intensity of a broadband light source with a central wavelength of 1550 nm)

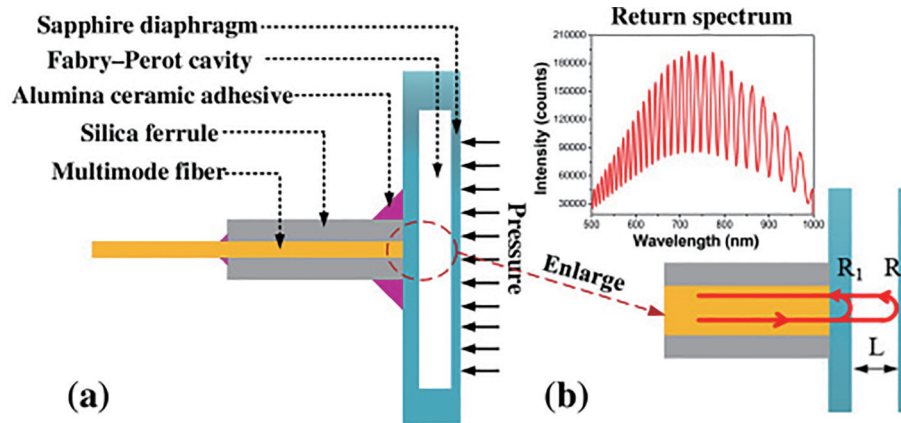


图 13 纯蓝宝石晶体键合式 F-P 传感器结构及传感原理示意图^[56]。(a) 传感器结构示意图；(b) 传感器传感原理及光谱曲线图
Fig. 13 Schematic diagram of structure and sensing principle of pure sapphire crystal bonded F-P sensor^[56]. (a) Schematic of the sensor structure; (b) sensor sensing principle and spectrum curve diagram

的交叉敏感问题,实现了 350 °C 温度和 0.1~3.0 MPa 大气压力下的双参量同时传感。为了进一步拓宽蓝宝石光纤复合 F-P 传感器的应用领域,2020 年, Yu 等^[58]通过三层蓝宝石异形片堆叠的方式,构造了一种开放腔式复合 F-P 传感器,实现了室温至 1080 °C 温度下温度和折射率的同步测量,并对折射率测量的温度补偿系数进行了分析补充,由于开放腔对高压具有特殊耐受性,这种传感结构有望在高温高压测量领域得到进一步发展。

5 结 论

高温环境下物理参量的传感技术在精密工业发展中起着举足轻重的作用,是现代传感技术的研究难点。航空航天、石油化工、能源领域对新型高温环境下应用的传感技术有着重大需求,一方面对现有传感技术提出了更高要求,另一方面也为未来高温环境下传感技术的发展趋势指引了方向。光纤 F-P 传感技术因其具有抗电磁干扰能力强、恶劣环境适应能力强、寿命长、精度高、易于多用途化等优点受到了研究人员的广泛关注和深入研究。本文对近年来国内外光纤 F-P 传感技术在高温环境下物理参量监测领域的研究进展进行了总结,为科研人员提供了参考和依据。随着光纤拼接技术、电子束蒸镀工艺、飞秒激光微加工、激光熔接和 MEMS 键合等先进工艺技术的成熟,一批可应用于高温环境下的高精密光纤 F-P 传感器应运而生。在具有高温耐受性的基础上,未来光纤 F-P 传感器逐渐向着特种材料光纤交叉应用、传感器小型化、功能多用途化方向发展。同时,基于耐高温蓝宝石光纤高温传感器也存在诸多待解决的技术难点,如:受限于

蓝宝石光纤的生长工艺,为了实现传感信号远距离传输,通常需要将蓝宝石光纤与石英光纤熔接,进行异质光纤波导结合。但是目前对于蓝宝石和石英介质光纤的熔接技术尚不成熟,存在熔接点损耗大、强度低等问题,传感器的制作难度高,其应用受限。此外,激光加工、光纤拼接、结构刻蚀对先进加工设备要求高,传感器制作成本昂贵,也影响了其规模化推广。未来,精简生产工艺流程,提高可批量化、标准化生产能力,实现高温环境下多参量监测是光纤 F-P 传感技术的重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Davies M A, Ueda T, M'Saoubi R, et al. On the measurement of temperature in material removal processes[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(2): 581-604.
- [2] Zhao G C, Tong X Y, Song L P, et al. Research progress and development of sapphire fiber sensor[J]. *Sensors and Transducers*, 2014, 174(7): 8-13.
- [3] Li Y, Li Z M, Xiong B, et al. Current status and development of aero-engine turbine blade temperature measurement technology [C]//China Association for Science and Technology Annual Meeting: Aero-engine Design, Manufacturing and Application Technology Seminar, Guizhou: [s.n.], 2013: 91-95.
李杨,李志敏,熊兵,等.航空发动机涡轮叶片温度测量技术现状与发展[C]//中国科协年会:航空发动机设计,制造与应用技术研讨会,贵州:出版者不详,2013: 91-95.
- [4] Xu C L, Xue X S, Piao C J, et al. Measurement and application on the surface emissivity for aeroengine turbine blades[J]. *Aeroengine*, 2015, 41(2): 89-92.
徐春雷,薛秀生,朴成杰,等.航空发动机高压涡轮

- 叶片表面红外发射率测量及应用[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 89-92.
- [5] Wang X J, Yu M, Zhu Y. Research of the demodulation method of the single crystal sapphire high-temperature sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(2): 209-214.
王晓军, 余森, 朱永. 蓝宝石晶体高温传感器解调方法研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(2): 209-214.
- [6] Dils R R. High-temperature optical fiber thermometer [J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1198-1201.
- [7] Zhou B K, Chen J H, Wang Z H. Fiber blackbody temperature sensor: CN2046210U[P]. 1989-10-18.
周炳琨, 陈家骅, 王志海. 光纤黑体腔温度传感器: CN2046210U[P]. 1989-10-18.
- [8] Guo Y Q, Xia W, Hu Z Z, et al. High-temperature sensor instrumentation with a thin-film-based sapphire fiber[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2068-2073.
- [9] Shen Y H, Tong L M, Wang Y Q, et al. Sapphire-fiber thermometer ranging from 20 to 1800 °C [J]. Applied Optics, 1999, 38(7): 1139-1143.
- [10] Zhang Y F, Ye L H, Qiu Y Q. Study on optical properties of sapphire fiber under high temperature[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5): 724-727, 769.
张月芳, 叶林华, 裘燕青. 蓝宝石光纤高温光学特性研究[J]. 半导体光电, 2009, 30(5): 724-727, 769.
- [11] Li H Y, Rao B Y, Zhao X F, et al. Development of fiber gratings inscribed by femtosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111420.
李宏业, 饶斌裕, 赵晓帆, 等. 基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111420.
- [12] Fokine M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(8): 1759-1765.
- [13] Habisreuther T, Elsmann T, Pan Z W, et al. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 860-865.
- [14] Chen C, Zhang X Y, Yu Y S, et al. Femtosecond laser-inscribed high-order Bragg gratings in large-diameter sapphire fibers for high-temperature and strain sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3302-3308.
- [15] Guo Q, Yu Y S, Zheng Z M, et al. Femtosecond laser inscribed sapphire fiber Bragg grating for high temperature and strain sensing[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2019, 18: 208-211.
- [16] Xu X Z, He J, Liao C R, et al. Multi-layer, offset-coupled sapphire fiber Bragg gratings for high-temperature measurements[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4211-4214.
- [17] Kou W Y, Wang W, Chen H B, et al. Non-scanning correlation demodulation for fiber-optic Fabry-Perot microcavity strain sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170630.
寇琬莹, 王伟, 陈海滨, 等. 非扫描相关解调光纤法布里-珀罗微腔应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170630.
- [18] Zhang T J, Jiang Y, Ma W Y. A high fineness optical fiber F-P pressure sensor based on MEMS[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170625.
张韬杰, 江毅, 马维一. 一种高精度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170625.
- [19] Zhang Y N, Li Y J, Wei T, et al. Fringe visibility enhanced extrinsic Fabry-Perot interferometer using a graded index fiber collimator[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(3): 469-481.
- [20] Chen J H, Zhao J R, Huang X G, et al. Extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer sensor for refractive index measurement of optical glass[J]. Applied Optics, 2010, 49(29): 5592-5596.
- [21] Ma J, Xuan H F, Ho H L, et al. Fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932-935.
- [22] Wu C, Fu H Y, Qureshi K K, et al. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 412-414.
- [23] Han M, Wang A. Exact analysis of low-finesse multimode fiber extrinsic Fabry-Perot interferometers [J]. Applied Optics, 2004, 43(24): 4659-4666.
- [24] Wang S, Liu T, Jiang J, et al. Zero-fringe demodulation method based on location-dependent birefringence dispersion in polarized low-coherence interferometry[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1827-1830.
- [25] Jiang Y. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1413-1420.
江毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1413-1420.

- [26] Jiang Y. Extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method high-resolution interrogation technique for fiber optic[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 925-932.
- [27] Liu T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(3): 1275-1278.
- [28] Zhang L, Yu Q X. An improved demodulation method for F-P and FBG multiplexing system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(8): 1008-1011.
张磊, 于清旭. 光纤 F-P 腔与 FBG 复用传感器精确解调方法研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1008-1011.
- [29] Yi J. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 925-932.
- [30] Cortés R, Khomenko A V, Starodumov A N, et al. Interferometric fiber-optic temperature sensor with spiral polarization couplers[J]. Optics Communications, 1998, 154(5/6): 268-272.
- [31] Jiang Y, Tang C J. Effect of nonlinear wavelength scanning to Fourier transform white-light interferometry [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(2): 426-432.
- [32] Bosselmann T, Ulrich R. High-accuracy position-sensing with fiber-coupled white-light interferometers [J]. Proceedings of SPIE, 1984, 0514: 361-364.
- [33] Velluet M T, Graindorcie P, Arditty H J. Fiber optic pressure sensor using white light interferometry [J]. Proceedings of SPIE, 1988, 838: 78-85.
- [34] Beheim G. Fibre-optic thermometer using semiconductor-etalon sensor[J]. Electronics Letters, 1986, 22(5): 238-239.
- [35] Meggitt B T, Hall C J, Weir K. An all fibre white light interferometric strain measurement system[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 79(1): 1-7.
- [36] Lee C E, Taylor H F. Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors[J]. Electronics Letters, 1988, 24(4): 193-194.
- [37] Wang A, He S, Fang X, et al. Optical fiber pressure sensor based on photo elasticity and its application[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(10): 1466-1472.
- [38] Wang J J, Dong B, 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.
- [39] Xiao H, Deng J D, Pickrell G, et al. Single-crystal sapphire fiber-based strain sensor for high-temperature applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2276-2283.
- [40] Yang S, Feng Z A, Jia X T, et al. Miniature all-sapphire single-crystal fiber Fabry-Perot sensor fabricated by femtosecond laser micro-machining and CO₂ laser welding[C]//CLEO: Applications and Technology 2020, May 10-15, 2020, Washington, DC, United States. Washington, D.C.: OSA, 2020: ATu3K.7.
- [41] Wang J J, Lally E M, Dong B, et al. Fabrication of a miniaturized thin-film temperature sensor on a sapphire fiber tip[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3406-3408.
- [42] Lee D, Tian Z P, Dai J X, et al. Sapphire fiber high-temperature tip sensor with multilayer coating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 741-743.
- [43] Liu G G, Sheng Q W, Dam D, et al. Self-gauged fiber-optic micro-heater with an operation temperature above 1000 °C[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1412-1415.
- [44] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. Optics Letters, 1991, 16(4): 273-275.
- [45] Zhu Y Z, Huang Z Y, Shen F B, et al. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements[J]. Optics Letters, 2005, 30(7): 711-713.
- [46] Zhu Y, Wang A. Surface-mount sapphire interferometric temperature sensor[J]. Applied Optics, 2006, 45(24): 6071-6076.
- [47] Yi J, Lally E, Wang A B, et al. Demonstration of an all-sapphire Fabry-Pérot cavity for pressure sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1): 9-11.
- [48] Jiang J F, Wu F, Wang S, et al. Experimental research on high temperature sapphire fiber Fabry-Perot sensing system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2017, 28(4): 347-353.
江俊峰, 吴凡, 王双, 等. 蓝宝石光纤法布里-珀罗高温传感的实验研究[J]. 光电子·激光, 2017, 28(4): 347-353.
- [49] Tian Z P, Yu Z H, Liu B, et al. Sourceless optical fiber high temperature sensor[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 195-198.

- [50] Yu X, Wang S, Jiang J F, et al. Self-filtering high-resolution dual-sapphire-fiber-based high-temperature sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1408-1414.
- [51] Ran Z L, Li C, Zuo H M, et al. Laser-machined cascaded micro cavities for simultaneous measurement of dual parameters under high temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 1988-1991.
- [52] Zhang P H, Zhang L, Wang Z Y, et al. Sapphire derived fiber based Fabry-Perot interferometer with an etched micro air cavity for strain measurement at high temperatures[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27112-27123.
- [53] Zhang P H, Zhang L, Mourelatos Z P, et al. Crystallization-sapphire-derived-fiber-based Fabry-Perot interferometer for refractive index and high-temperature measurement[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9016-9021.
- [54] Jia P G, Fang G C, Liang T, et al. Temperature-compensated fiber-optic Fabry-Perot interferometric gas refractive-index sensor based on hollow silica tube for high-temperature application[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 244: 226-232.
- [55] Wang X, Jiang J F, Wang S, et al. All-silicon dual-cavity fiber-optic pressure sensor with ultralow pressure-temperature cross-sensitivity and wide working temperature range[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 521-529.
- [56] Li W W, Liang T, Jia P G, et al. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on sapphire direct bonding for high-temperature applications[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1662-1666.
- [57] Chen H B, Chen Q Q, Wang W, et al. Fiber-optic, extrinsic Fabry-Perot interferometric dual-cavity sensor interrogated by a dual-segment, low-coherence Fizeau interferometer for simultaneous measurements of pressure and temperature[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38744-38758.
- [58] Yu X, Wang S, Jiang J F, et al. Hybrid sapphire dual-Fabry-Perot-cavities sensor for high temperature and refractive index measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 415: 99.