

引用格式: YANG Hangzhou, LIU Xin, NAN Pengyu, et al. Progress in Research of Optical Fiber High Temperature and Strain Sensor (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1006002

杨杭洲,刘鑫,南朋玉,等. 光纤高温应变传感器研究进展(特邀)[J]. 光子学报,2022,51(10):1006002

光纤高温应变传感器研究进展(特邀)

杨杭洲,刘鑫,南朋玉,辛国国

(西北大学 物理学院, 西安 710069)

摘 要: 高温应变传感器在航空航天、石油勘探、工业冶炼等领域有巨大的潜在需求。传统的电学类传感器受限于其电学原理和材料特性,无法长时间在高温、高压、强电磁干扰、化学腐蚀等恶劣环境下保持精确测量。基于此,国内外研究团队对光纤高温应变传感器进行了大量研究,在提升传感器的耐温性能和提高传感器的应变灵敏度等方面取得了一系列成果。本文综述了基于光纤布拉格光栅型、光纤干涉型高温应变传感器的传感机理、实验方法及封装应用的研究现状,总结了不同传感机理对温度、应变的响应特性,重点介绍了光纤高温应变传感器的最新进展,并对光纤高温应变传感器的未来发展方向进行了展望。

关键词: 光纤传感器;高温应变;光纤布拉格光栅;法布里-珀罗干涉仪;马赫-曾德尔干涉仪;温度和应变测量

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225110.1006002

0 引言

高温应变传感器在航空航天、石油勘探、工业冶炼等领域有巨大的潜在需求。目前,传统使用的热电偶和电阻应变片可以分别用来测量温度和应变,但其存在很多不足。热电偶的测量温度虽然可以达到 1 000 °C 以上,但其价格昂贵、响应速度慢、测量精度低、对污染十分敏感且在高温工况下工作易老化;电阻应变片的价格也十分昂贵,使用寿命短、粘贴过程复杂、测量精度低。故基于电学类的高温应变传感器较难适用于高温恶劣环境中。光纤传感器在尺寸、成本、寿命、分辨率、抗电磁干扰能力、抗恶劣工况能力等方面具有诸多优势,已广泛用于结构健康的监测中^[1-2]。因此,光纤高温应变传感器在高温环境中的应用十分广泛^[3-5]。此外,采用目前制备技术成熟的超高温陶瓷、碳/碳化硅等材料封装保护传感器可以用于高温环境中的热结构健康监测。

探索并研制能够用于高温环境中的光纤传感器具有重要意义。但是,采用光纤高温应变传感器对高温环境中的热结构进行温度和应变的实时监测,在解调过程中传感器同时响应温度和应变,会出现交叉敏感问题;在应变测量过程中,温度同时影响测量结果,从而造成较大的应变测量误差,怎样解决这个问题尤为重要。目前采用的解调方法主要是双波长解调和温度补偿解调两种。双波长解调方法采用双参量矩阵解调温度和应变,在高温环境中会造成较大的测量误差^[6-7];温度补偿解调方法采用胶粘剂封装保护其中一个传感器结构,使其只响应温度,并且对另一个传感器结构进行温度补偿,但是由于胶粘剂不耐高温,该方法只适用于低温环境中的实验测试^[8]。目前,有效解决光纤传感器的温度应变交叉敏感问题的研究方案和技术路线并不清晰明确,特别是对超高温情况下应变的监测更是如此。

本文首先综述了基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)型、光纤干涉型的高温应变传感器的研究进展,然后总结了不同传感机理对温度、应变的响应特性并对其归纳比较,最后对光纤高温应变传感器

基金项目:陕西省科技计划(No. 2020GY-187),陕西省教育厅科研项目(No. 21JK0945)

第一作者:杨杭洲(1981—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术。Email: yanghz@nwu.edu.cn

通讯作者:辛国国(1983—),男,副教授,博士,主要研究方向为光与物质的相互作用及光学测量。Email: xinguo@nwu.edu.cn

收稿日期:2022-07-18;录用日期:2022-10-09

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

的未来发展方向进行了展望。

1 FBG型高温应变传感器

1.1 FBG温度传感原理

光栅区域的有效折射率 n_{eff} 和光栅的周期 Λ 决定了光栅的布拉格波长 λ_B 。当环境的物理参量影响这两个参数时,光栅的布拉格波长会发生漂移。其漂移规律可由布拉格公式推导出来,即

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

在环境的温度变化情况下,FBG的布拉格波长会发生漂移。所以,利用FBG对于温度的响应特性,可以实时监测布拉格波长并建立与温度的函数关系式,进而得到温度的变化量。

FBG的温度灵敏度 K_T 表示为

$$K_T = \frac{d\lambda}{dT} = \lambda_B(\alpha + \zeta) \quad (2)$$

式中, λ 表示波长, T 表示温度, α 和 ζ 分别表示光纤材料的热膨胀系数和热光系数。

1.2 FBG应变传感原理

在环境的应变变化情况下,FBG的布拉格波长也会发生漂移,其主要原因是光栅区域的折射率和光栅的周期发生变化。所以,利用FBG对应变的响应特性,可以实时监测布拉格波长并建立与应变的线性关系式,进而得到应变的变化量。

在FBG受到轴向应变的情况下,其布拉格波长会发生漂移。布拉格方程可以表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} \quad (3)$$

式中, Δ 表示相应参数的变化量, λ_B 表示布拉格波长, n_{eff} 表示有效折射率, Λ 表示光栅的周期。

光纤在三个维度受到的应变可以表示为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nu \frac{P_{11}}{E} \\ -\nu \frac{P_{12}}{E} \\ \frac{P_{12}}{E} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, ϵ 表示应变, E 表示弹性模量, ν 表示泊松比, P_{11} 和 P_{12} 表示弹光系数。

FBG的应变灵敏度 K_ϵ 可以表示为

$$K_\epsilon = 1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (5)$$

FBG的布拉格波长和轴向应变之间的表征关系可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\epsilon \epsilon_z \quad (6)$$

1.3 FBG高温应变传感器

自1978年HILL K O等^[9]首次证明在光纤中通过光敏性形成永久光栅以来,研究者深入地研究了FBG的制备方法和测试性能。采用激光对纤芯的折射率进行调制,可以得到FBG。折射率调制是由光纤材料本身的光敏性引起的^[10]。

目前,基于FBG高温应变传感器的研究报道很多。2009年,重庆大学ZHU Y等^[11]制作了一种基于红外飞秒激光刻写双FBG的高温应变传感器,两个FBG的中心波长分别为1 310 nm和1 550 nm,将传感器放入刚玉管内部,再将传感器和刚玉管放入高温炉中进行温度和应变测试。实验结果表明,因为两个FBG的中心波长具有不同的有效折射率,所以传感器可以实现800 °C的温度和应变的同时测量。

同年,大连理工大学的LI G Y等^[12]研究和讨论了化学成分光栅(Cheical Composition Grating, CCG)在24~900 °C温度范围内的温度和应变响应。实验结果表明,在整个温度范围内,温度响应为非线性曲线,在恒定温度下,CCG的波长漂移与施加的拉伸应变呈线性关系,此外,CCG的应变响应与温度无关。

2010年,密苏里科技大学 HUANG Y 等^[13]利用 CO₂激光刻写的长周期光纤光栅(Long-period Fiber Grating, LPFG)传感器在高温环境下进行大应变测量,使用单个 LPFG 传感器的两种包层模式(LP06 和 LP07)同时测量温度和应变,实现了 700 °C 下的应变测量,应变分辨率为 0.5 μ ϵ 。

2014年,西北大学乔学光团队^[14]设计制作了一种应变灵敏度提高的光纤高温应变传感器。首先,采用化学腐蚀法对单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)进行处理,获得直径分别为 90 μm 和 60 μm 的 FBG;然后,采用热处理方法对 FBG 进行热处理,得到热再生光栅(Regenerated Fiber Bragg Grating, RFBG)。实验结果表明,该传感器实现了 800 °C 下的应变测量,且应变灵敏度从 0.9 pm/μ ϵ 提高至 4.5 pm/μ ϵ 。

2015年,本文课题组^[15]制作了一种级联 RFBG 传感器,使用 KrF 准分子激光器在 SMF 刻写中心波长分别为 1 304 nm 和 1 547 nm 的两个 FBG,然后,采用热处理方法对 FBG 进行热再生,得到 RFBG。实验结果表明,该传感器实现了 900 °C 下 1 000 μ ϵ 范围内的温度和应变的同时测量。此外,采用三阶参量矩阵来展示传感器的响应特性,测量的温度误差和应变误差分别是 28.3 °C 和 4.1 μ ϵ 。

2016年,德国莱布尼茨光子技术研究所的 HABISREUTHER T 等^[16]提出了基于刻写一阶 FBG 的蓝宝石光纤传感器用于测量高温和应变,传感器在高达 600 °C 的温度下进行了应变测试,实验结果表明,蓝宝石 FBG 传感器能够以大约 10 μ ϵ 的分辨率确定应变,并且使用传感器进行高温应变传感时,最大施加应变为 1 500 μ ϵ ,没有任何传感器的故障迹象。

2017年,本文课题组^[17]制作了一种基于双 RFBG 的光纤高温应变传感器,其结构示意图如图 1。在高掺锗的 SMF 和硼锗共掺的 SMF 分别刻写了一个 FBG,为了得到两个具有不同应变灵敏度的 FBG,用化学腐蚀法处理高掺锗的 FBG,通过缩小光纤的直径,提高 FBG 的应变灵敏度;然后,用热处理方法对 FBG 进行热再生,得到 RFBG。进一步的实验表明,该传感器实现温度、应变双参量的同时测量(温度 < 800 °C;应变 < 1 000 μ ϵ),其温度和应变的测量误差分别是 4.6 °C 和 19.9 μ ϵ 。

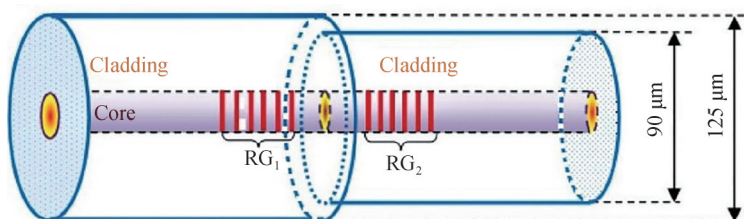


图1 双 RFBG 的传感器结构示意图^[17]

Fig. 1 Schematic diagram of the dual RFBG sensor structure^[17]

同年,西北大学 YANG T T 等^[18]采用 800 nm 飞秒激光刻写技术,在多模光纤(Multimode Fiber, MMF)中成功地刻写 FBG,其结构示意图如图 2 所示,MMF 的基模和高阶模在纤芯失配处激发,在传输过程中产生两个明显的共振峰,实验测试了单个共振峰在超高温条件下的应变响应。实验结果表明,在温度 600~900 °C 范围内,应变灵敏度与温度呈线性关系,且应变灵敏度提高到 5.24 pm/μ ϵ ,该传感器可用于高温环境下的应变测量。

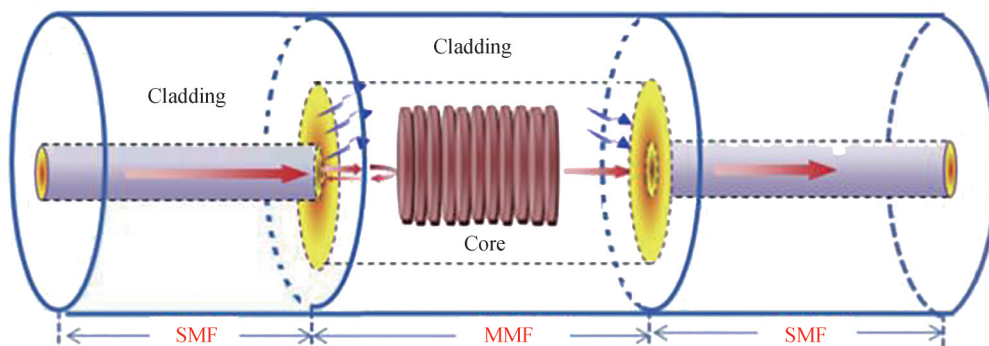


图2 多模 FBG 结构示意图^[18]

Fig. 2 Schematic diagram of multi-mode FBG structure^[18]

2018年,北京信息科技大学ZHANG Y M等^[19]制作了一种基于FBG的高温应变传感器,使用红外飞秒激光器分别在纯石英SMF和掺锗SMF的纤芯刻写FBG,然后进行高温应变实验。实验结果表明,该传感器可以实现800 °C下1 000 $\mu\epsilon$ 范围内的测量。在相同的高温应变情况下,纯石英FBG的响应灵敏度低于掺锗FBG。为了确保传感器拥有良好的稳定性,建议在500 °C以下进行应变测量。

同年,吉林大学GUO Q等^[20]采用飞秒激光逐行扫描法制作了一种蓝宝石FBG高温应变传感器,在直径为60 μm 的单晶蓝宝石光纤中获得了三阶FBG。实验研究了传感器在室温到1 600 °C温度范围内的温度传感特性,在1 000~1 600 °C温度范围内,其温度灵敏度为34.96 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。此外,分别在26 °C、500 °C、1 000 °C和1 600 °C测试了传感器的应变传感特性,其应变灵敏度分别是1.42 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 、1.42 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 、1.44 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 和1.45 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。实验结果表明,该传感器在对处在高温环境中的健康监测领域具有较好的应用价值。

2019年,西北大学SU D等^[21]提出了一种利用SMF和细芯光纤(Thin Core Fiber, TCF)刻写的紧凑型双FBG用于同时测量高温和应变,这两种FBG具有不同的热光系数和弹光系数,对温度和轴向应变响应呈现有区别化的灵敏度,实验结果表明,该传感器实现了800 °C下1 000 $\mu\epsilon$ 范围内的同时测量,应变灵敏度高达3.25 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。

2020年,葡萄牙应用光子学研究院的VIVEIROS D等^[22]提出了一种采用飞秒激光刻写离轴FBG用于测量温度和应变,光栅与纤芯中心横向偏移超过2.5 μm ,可以在单模光纤中制造一个多模干涉部分,该部分可以支持两种独立的光纤模式(LP_{0,1}和LP_{1,1})。实验结果表明,在23~300 °C的温度范围内,传感器的温度灵敏度为12 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,在0~522 $\mu\epsilon$ 的应变范围内,传感器的应变灵敏度为1.44 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。

2022年,本文课题组^[23]提出了一种用于温度和应变区分测量的光纤传感器。该传感器由两个级联的RFBG和两个毛细玻璃管组成,其结构示意图如图3所示。RFBG₂被封装在一个毛细玻璃管中,仅对温度响应,而RFBG₁对温度和应变都响应。实验结果表明,传感器的温度响应在100~1 000 °C的温度范围内呈线性变化,其温度灵敏度为15.7 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,此外,传感器在300~900 °C温度范围内的应变测量具有良好的可重复性。在600 °C温度下以及0~120 $\mu\epsilon$ 的应变范围内,两个毛细石英管的整合封装使RFBG₁的应变灵敏度提高至5.46 $\text{pm}/\mu\epsilon$,该应变灵敏度比常见的RFBG应变传感器高5倍左右。

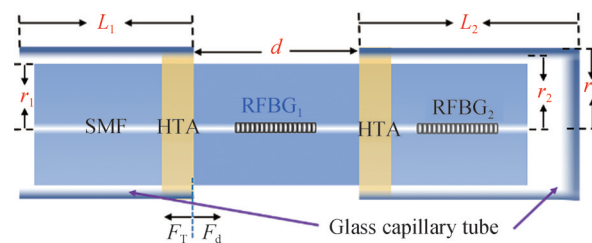


图3 级联RFBG传感器结构示意图^[23]

Fig. 3 Schematic diagram of cascaded RFBG sensor structure^[23]

表1列出了文献报道的各种基于FBG的光纤高温应变传感器的测量参数比较,包括测量温度和应变范围、温度和应变灵敏度。

对于光纤高温应变传感器存在的温度和应变交叉敏感问题,研究报道的解决方法比较多,但是,由于光纤自身会受温度影响的特性,这些方法都不能精确测量温度应变。现有的光纤温度应变传感器主要通过两个FBG并联或级联用于测量温度和应变,使其中一个FBG只响应温度,另一个FBG响应温度和应变,用温度补偿解调方法,实现同时测量温度和应变,解决温度应变交叉敏感问题。但是,这种解调方法受限于传感器的封装技术和FBG不耐高温的特点,一直停留在300 °C以下的实验测试阶段。此外,文献[24-25]也报道了用双参量矩阵同时测量温度和应变,用光谱上的两个监测点同时测量温度和应变,这两个监测点具有不同的温度灵敏度和应变灵敏度,这种解调方法是采用传感器的温度响应以及在确定温度点的应变响应,实现同时测量温度和应变。但是,当测量的环境温度变化时,传感器的应变灵敏度也会发生变化,造成温度和应变存在较大耦合,存在较大的测量误差,尤其在高温下的测量误差非常大^[26]。

表1 FBG型高温应变传感器的测量参数比较^[11,13-15,17,20-23]Table 1 Comparison of measurement parameters of FBG type high temperature and strain sensor^[11,13-15,17,20-23]

Year	Sensor structure	Temperature range	Temperature sensitivity	Strain range	Strain sensitivity	Temperature compensation	Ref.
2009	CCG	24~900 °C	13.8 pm/°C	0~1 000 $\mu\epsilon$	1.1 pm/ $\mu\epsilon$	No	[11]
2010	Long-period FBG	25~700 °C	163 pm/°C	0~15 000 $\mu\epsilon$	0.31 pm/ $\mu\epsilon$	No	[13]
2014	Etched RFBG	24~800 °C	12.2 pm/°C	0~1 000 $\mu\epsilon$	4.5 pm/ $\mu\epsilon$	No	[14]
2015	Cascaded RFBG	25~900 °C	15.2 pm/°C	0~1 000 $\mu\epsilon$	0.81 pm/ $\mu\epsilon$	No	[15]
2017	Double RFBG	20~800 °C	16.3 pm/°C	0~1 000 $\mu\epsilon$	1.57 pm/ $\mu\epsilon$	No	[17]
2018	Sapphire FBG	26~1 600 °C	34.96 pm/°C	0~1 300 $\mu\epsilon$	1.45 pm/ $\mu\epsilon$	No	[20]
2019	Dual FBG	100~800 °C	12.5 pm/°C	0~1 000 $\mu\epsilon$	3.25 pm/ $\mu\epsilon$	No	[21]
2020	Off-axis FBG	23~300 °C	12 pm/°C	0~522 $\mu\epsilon$	1.44 pm/ $\mu\epsilon$	No	[22]
2022	Two RFBG	100~1 000 °C	15.7 pm/°C	0~120 $\mu\epsilon$	5.46 pm/ $\mu\epsilon$	Yes	[23]

2 光纤干涉型高温应变传感器

2.1 光纤法布里-珀罗干涉仪高温应变传感器

光纤法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)传感器对应变十分敏感,目前这种传感器在高温环境中的应变测量得到了广泛关注。当外界环境中的温度和应变发生变化时,F-P腔的腔长以及腔内的介质折射率会发生改变,导致干涉光谱波长产生漂移,对监测干涉波长的变化量进行数据分析处理,可得到温度和应变的变化量。目前,文献报道用于测量高温应变的FPI类型有气泡型FPI、FPI级联FBG型、FPI级联RFBG型等。基于光纤FPI的应变传感器研究报道很多,其制作方法也较多,如激光加工法^[27-29]、电弧放电法^[30-33]、化学腐蚀法^[34-35]等。

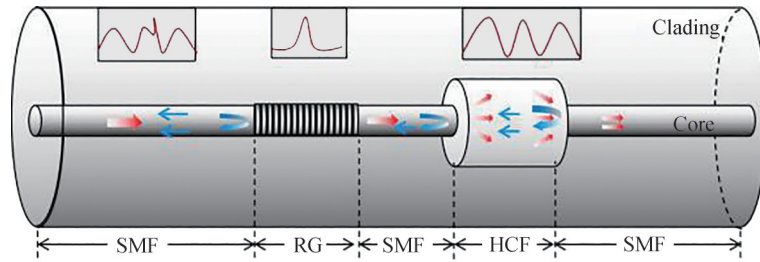
2009年,电子科技大学RAO Y J等^[36]制作了一种基于空芯光子晶体光纤(Hollow Photonic Crystal Fiber, HPCF)的FPI传感器,采用熔接机将HPCF熔接在两段SMF之间,获得了微型FPI传感器。实验结果证明,传感器在室温到700 °C内具有良好的稳定性,实现了20~600 °C温度范围内的应变测量,应变灵敏度为5.94 nm/ $\mu\epsilon$ 。

2014年,武汉理工大学XIONG L等^[37]提出了一种非本征型FPI-FBG复合传感器,该复合传感器的F-P腔由一段毛细玻璃管、一段SMF以及一段刻写FBG的镀金SMF组成,用热处理的FBG进行温度测量,用光纤FPI进行应变测量。实验结果表明,该传感器能够同时测量温度和大应变,温度和应变测量范围分别可达500 °C和10 000 $\mu\epsilon$,所测温度灵敏度为13.6 pm/°C,应变灵敏度为46 nm/ $\mu\epsilon$,此外,传感器实现了有效的温度补偿。

2015年,波尔图大学FERREIRA M S等^[38]提出了一种基于新型石英管的FPI传感器用于高温下的应变测量,该石英管有厚度约为14 μm 的包层和四个直径约20 μm 的小棒,每个小棒放置在完全相反的位置,确保石英管的机械稳定性,通过在两段单模光纤之间熔接一段石英管形成FPI,并且研究了热退火对传感器稳定性的影响,以便改善传感器的传感性能。实验结果表明,长度为17 μm 的石英管制作的传感器具有低于1 pm/°C的温度灵敏度,其应变灵敏度为13.9 pm/ $\mu\epsilon$ 。

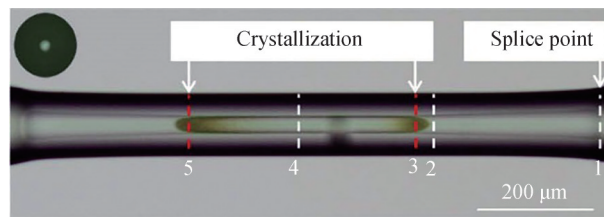
2016年,本文课题组^[39]制作了一种基于FPI级联RFBG的高温应变传感器,其结构示意图如图4所示。通过商业熔接机将一段空芯光纤(Hollow Core Fiber, HCF)熔接在两段SMF之间制作FPI;然后,将FPI与种子光栅级联,对传感器进行热处理得到RFBG。实验结果表明,该传感器由一个条件数为12.09的矩阵组成,可以实现温度应变双参量的同时测量(温度<600 °C;应变<600 $\mu\epsilon$),其温度和应变测量误差分别为4.6 °C和19.9 $\mu\epsilon$ 。

2018年,电子科技大学YANG T T等^[40]设计制作了一种高集成度的光纤高温应变传感器,该传感器由800 nm的飞秒激光器刻写的FBG和157 nm激光器微加工技术制作的光纤FPI级联而成,实现了高温环境中的应变精确测量。FBG对温度响应,但对应变不响应;而光纤FPI对应变响应,但对温度响应很小。实验结果表明,传感器具有良好的响应特性,实现了500 °C下650 $\mu\epsilon$ 范围内的同时测量。

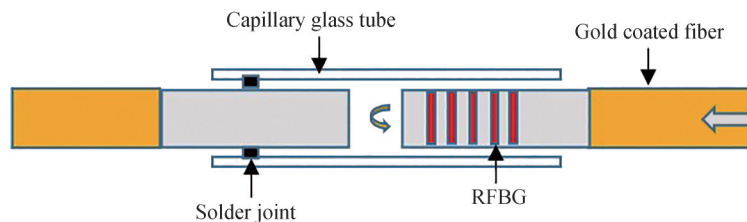
图4 FPI级联RFBG的传感器结构示意图^[39]Fig. 4 Schematic diagram of the sensor structure of the FPI cascaded RFBG^[39]

同年,都柏林理工学院的LIU D J等^[41]提出了一种基于HCF的高温应变传感器,传感器由一小段HCF在两个标准单模之间熔接而成,该传感器具有高灵敏度的优点,其温度灵敏度为 $33.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,工作温度范围为室温到 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$,并且具有良好的稳定性和重复性,具有相对较低的应变灵敏度($0.46 \text{ pm}/\mu\epsilon$),表明传感器在高温传感领域具有巨大的潜力。

2019年,上海大学PANG F F等^[42]提出了一种基于氧化铝陶瓷衍生光纤(Alumina Ceramic Derived Fiber, CDF)的FPI传感器用于高温应变传感,该传感器由两段SMF之间拼接一段CDF组成,传感器的显微图如图5所示,在室温到 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,对传感器的应变响应特性进行实验标定,实验结果表明,传感器的波长漂移变化量与拉伸应变变化量呈线性关系,在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下,数据分析所得应变灵敏度为 $1.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$,温度灵敏度为 $15.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,并且线性响应可在 $0\sim 3\,000 \mu\epsilon$ 范围内重复测试。此外,该传感器在 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下具有良好的重复性,其应变测量范围为 $0\sim 2\,000 \mu\epsilon$ 。

图5 基于CDF的FPI传感器的显微图^[42]Fig. 5 Micrograph of the FPI sensor based on CDF^[42]

2020年,武汉理工大学NAN J等^[43]设计了一种腔长自由伸缩的新型复合传感器。传感器由非本征型FPI和镀金的RFBG组成,其结构示意图如图6所示,并且在陶瓷悬臂梁上测试了传感器的响应特性。实验结果表明,传感器实现了室温到 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的应变测量,其温度灵敏度为 $10.98 + 0.008\,31T \text{ pm}/^\circ\text{C}$, T 表示温度,温度分辨率为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$,应变分辨率为 $0.5 \mu\epsilon$ 。传感器在实验测试中可以消除热应变干扰,具有良好的稳定性。

图6 传感器结构示意图^[43]Fig. 6 Schematic diagram of the sensor structure^[43]

同年,本文课题组^[44]提出了一种基于光纤FPI级联RFBG的传感器用于同时测量高温环境下的温度和应变,其结构示意图如图7所示,光纤FPI由长度为 $74 \mu\text{m}$ 的空芯石英管(Hollow Core Silica Tube, HCST)熔接在两段SMF之间,其对温度和应变都响应,而RFBG嵌入在毛细刚玉管内,使其对施加的应变不响应,用于FPI结构的温度补偿,实验结果表明,该传感器在 $100\sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,温度灵敏度为 $18.01 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,

在 300~1 000 °C 的温度范围内,应变响应规律呈线性关系,应变测量范围为 0~450 $\mu\epsilon$,在温度为 800 °C 时,其应变灵敏度为 2.17 pm/ $\mu\epsilon$ 。

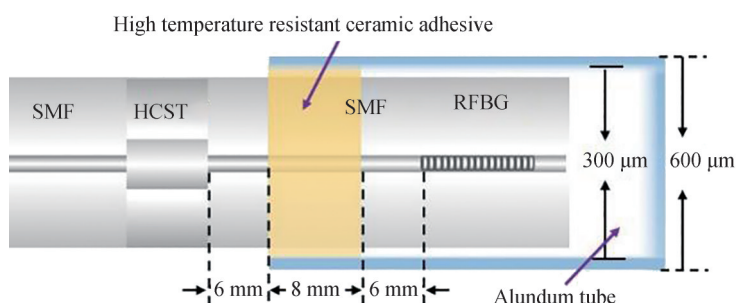


图 7 FPI 级联 RFBG 传感器结构示意图^[44]

Fig. 7 Schematic diagram of the FPI cascaded with RFBG sensor structure^[44]

2021 年,武汉理工大学 LI T L 等^[45]制作了一种能够在高温下进行超大应变测量的光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) FPI 传感器,其结构示意图如图 8 所示。采用激光焊接固定和自由悬挂方式分别将两段 PCF 插入毛细石英管的两侧,形成一个非本征型 FPI 传感器。这种传感器结构使单侧滑动的 F-P 腔具有较大的应变测量范围,推导了传感原理并进行了实验验证。实验结果表明,该传感器在室温到 1 100 °C 的温度范围内,显示了良好的热稳定性,在温度 1 000 °C 下,可准确检测到较大的机械诱导应变值为 9 436.66 $\mu\epsilon$ 。

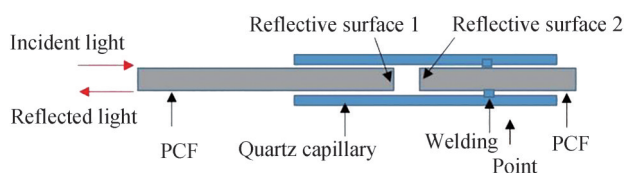


图 8 基于 PCF 的 FPI 传感器结构示意图^[45]

Fig. 8 Schematic diagram of the FPI sensor structure based on PCF^[45]

2022 年,本文课题组^[46]提出了一种基于游标效应和 II 型 FBG 的超灵敏双 FPIs 传感器用于同时测量温度和应变,其结构示意图如图 9 所示。两个 FPI 由一段 HCST、两段 SMF 和一段 MMF 组成,在 26~1 000 °C 的温度范围内,其产生的叠加干涉光谱的温度灵敏度为 6.98 pm/°C,应变测量范围为 0~350 $\mu\epsilon$,在温度为 800 °C 时,其应变灵敏度为 127.32 pm/ $\mu\epsilon$,此外,采用飞秒激光在 SMF 刻写 FBG,FBG 封装在毛细玻璃管中,只响应温度,对施加的应变不响应,其温度灵敏度为 15.14 pm/°C。

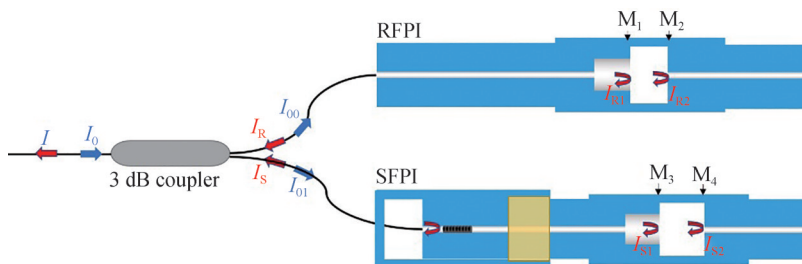


图 9 基于双 FPIs 传感器结构示意图^[46]

Fig. 9 Schematic diagram of the sensor structure based on double FPIs^[46]

表 2 列出了文献报道的各种基于 FPI 的光纤高温应变传感器的测量参数比较,包括测量温度和应变范围、温度和应变灵敏度。

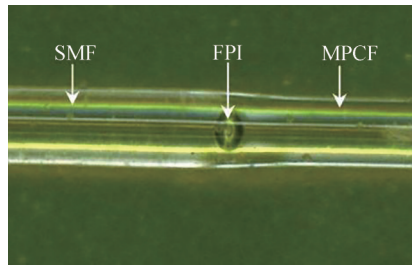
表2 光纤FPI型高温应变传感器的测量参数比较^[33,37,39-40,42,44-46]Table 2 Comparison of measurement parameters of optical fiber FPI type high temperature and strain sensor^[33,37,39-40,42,44-46]

Year	Sensor structure	Temperature range	Temperature sensitivity	Strain range	Strain sensitivity	Temperature compensation	Ref.
2009	HCPCF FPI	100~700 °C	163.55 pm/°C	0~414 $\mu\epsilon$	5.94 nm/ $\mu\epsilon$	No	[33]
2014	EFPI-FBG	25~500 °C	13.6 pm/°C	0~10 000 $\mu\epsilon$	46 nm/ $\mu\epsilon$	Yes	[37]
2016	FPI-RFBG	19~600 °C	13.97 pm/°C	0~600 $\mu\epsilon$	1.23 pm/ $\mu\epsilon$	No	[39]
2018	FPI-FBG	25~500 °C	15.2 pm/°C	0~650 $\mu\epsilon$	0.81 pm/ $\mu\epsilon$	No	[40]
2019	CDF FPI	20~1 200 °C	15.6 pm/°C	0~2 000 $\mu\epsilon$	1.5 pm/ $\mu\epsilon$	No	[42]
2020	RFBG-FPI	100~1 000 °C	18.01 pm/°C	0~450 $\mu\epsilon$	2.17 pm/ $\mu\epsilon$	Yes	[44]
2021	PCF FPI	28~1 100 °C	426.7 pm/°C	0~9 436.66 $\mu\epsilon$	25.1 pm/ $\mu\epsilon$	No	[45]
2022	Double FPIs	26~1 000 °C	15.14 pm/°C	0~350 $\mu\epsilon$	127.32 pm/ $\mu\epsilon$	Yes	[46]

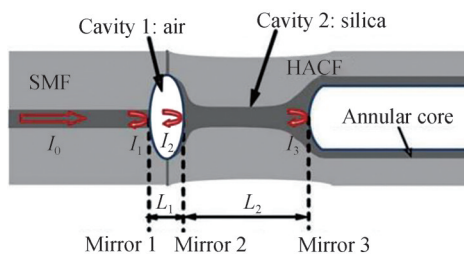
2.2 微泡型光纤高温应变传感器

微泡型光纤高温应变传感器也属于光纤FPI高温应变传感器类型,其本质是在光纤端面或者内部制作微泡型FPI。目前,这种传感器用于测量高温和应变的研究鲜有报道,因为这种微泡型FPI不耐高温,而且容易断裂。

2011年,重庆大学DENG M等^[47]提出了一种简单、坚固的气泡腔光纤FPI传感器,该传感器是通过商业熔接机将一段多模光子晶体光纤(Multimode Photonic Crystal Fiber, MPCF)和一段SMF熔接制作而成,气泡腔的两个光滑的玻璃-空气界面作为FPI的两个反射镜,传感器的显微图如图10所示,实验结果表明,传感器实现了750 °C下1 850 $\mu\epsilon$ 范围内的测量,其温度灵敏度为0.6 pm/°C,应变灵敏度为2.3 pm/ $\mu\epsilon$ 。

图10 基于气泡腔FPI传感器的显微图^[47]Fig. 10 Micrograph of the FPI sensor based on bubble cavity^[47]

2014年,哈尔滨工程大学ZHOU A等^[48]提出了一种复合腔结构的光纤FPI传感器,该FPI嵌入在光纤中间,用于同时测量温度和轴向应变,FPI由一个球型空气腔级联一个石英腔组成,二者都是在空芯环型光纤(Hollow Annular Core Fiber, HACF)的内部制作而成,其结构示意图如图11所示,实验结果表明,在室温-500 °C,空气腔和石英腔的温度灵敏度分别为1.3 pm/°C和13 pm/°C,其应变灵敏度分别为5.2 pm/ $\mu\epsilon$ 和1.1 pm/ $\mu\epsilon$,其对温度和应变呈现不同的灵敏度,可实现温度和应变的同时测量。

图11 基于HACF的FPI传感器结构示意图^[48]Fig. 11 Schematic diagram of the FPI sensor structure based on HACF^[48]

2018年,中国科学技术大学ZHOU K等^[49]提出了一种高应变灵敏度的光纤气泡FPI传感器,微气泡结构可以控制,特别是空气腔长度和侧壁厚度,该传感器的应变灵敏度高达56.69 pm/ $\mu\epsilon$,是目前报道的多数

FPI应变传感器的几倍,在室温到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,该传感器具有较低的温度灵敏度,低至 $0.682\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,拉伸应变与温度之间的交叉灵敏度降低到 $0.012\text{ }\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ 。

2019年,北京航空航天大学ZHANG P H等^[50]提出了一种基于蓝宝石衍生光纤(Sapphire Derived Fiber, SDF)的FPI传感器,用于高温环境中的应变测量,其结构示意图如图12所示,实验结果表明,在 $20\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,该传感器在 $0\sim 1\ 000\text{ }\mu\epsilon$ 范围的应变灵敏度在 $1.29\text{ pm}/\mu\epsilon$ 上下波动,且波动范围随温度的升高而增大,但整体相对波动较小。

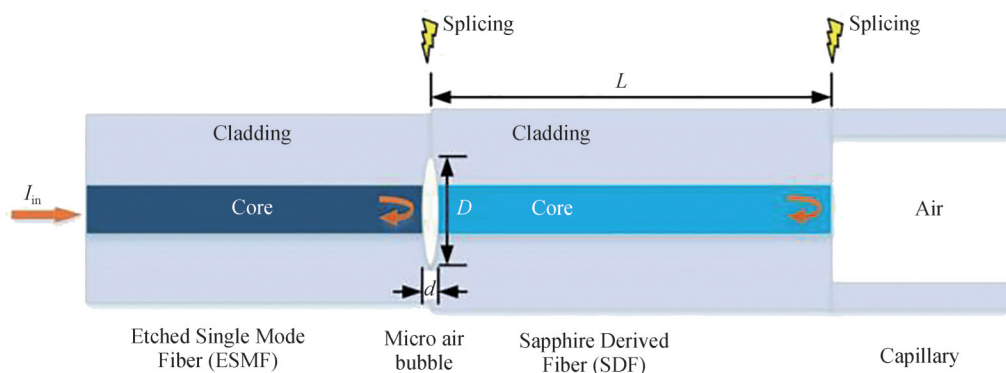


图12 FPI传感器结构示意图^[50]

Fig. 12 Schematic diagram of the FPI sensor structure^[50]

2.3 光纤马赫-曾德尔干涉仪高温应变传感器

至今为止,基于马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)的光纤高温应变传感器的研究报道比较少,基于光纤MZI传感器的结构种类较多,但多数只用于测量温度或只用于测量应变^[51-53],少数的光纤MZI传感器用于同时测量温度和应变。

2018年,苏州大学ZHANG N等^[54]提出了一种基于微型模态干涉仪的新型光纤传感结构用于测量温度和应变。传感器主要基于MZI传感机制,由一根单模光纤的两个向上锥形之间引入向下锥形组成,实验结果表明,传感器的温度灵敏度为 $87.8\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,应变灵敏度为 $0.7\text{ pm}/\mu\epsilon$,该传感器仅由单模光纤制作而成,价格便宜并且具有实用性,整个制作过程只需用商业光纤熔接机控制切割和拼接即可。

2019年,南昌航空大学LIAO Y C等^[55]提出了一种基于拉锥形光纤MZI传感器,光纤MZI结构由两个锥形的单模光纤组成,传感器通过热处理,可以得到稳定的温度测量结果,实验结果表明,在 $80\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,传感器在加热和冷却过程中的温度灵敏度分别为 $0.114\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.116\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,具有良好的温度响应,且温度稳定性好,测量得到的应变灵敏度为 $1.33\text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

同年,北京交通大学ZHANG C B等^[56]提出了一个基于熔接双芯光纤(Twin-Core Fiber, TCF)的微型光纤应变传感器,传感器结构有两种光纤锥体,分别为弱锥体和T形锥体。实验结果表明,在 $0\sim 841.5\text{ }\mu\epsilon$ 的应变范围内,传感器的两个波谷应变灵敏度分别为 $3.31\text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $6.11\text{ pm}/\mu\epsilon$,温度灵敏度为 $0.69\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,该传感器具有良好的测试稳定性和较低的温度灵敏度,有利于精确测量应变。

2020年,南昌航空大学LIU J等^[57]提出了一种基于少模光纤的MZI传感器,并进行了实验验证,该传感器由两段SMF之间熔接一段少模光纤制作而成,经过 2 h 的热处理,传感器在室温到 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量中表现出较高的稳定性和重复性,温度灵敏度约为 $48.2\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,应变灵敏度为 $1.5\text{ pm}/\mu\epsilon$,此外,传感器的温度应变交叉灵敏度仅为 $0.031\text{ }^{\circ}\text{C}/\mu\epsilon$,是一种应变不敏感的光纤高温传感器。

3 光纤高温应变传感器封装及其应用

3.1 光纤高温应变传感器封装

目前,固定光纤传感器最常用的封装材料是环氧胶粘剂,即通过胶粘剂将光纤传感器固定到待测结构表面。但是,这种封装方法受限于胶粘剂的工作温度,不能应用于高温环境中的光纤高温应变传感器封装,研究报道的光纤高温应变传感器封装方法较少。

2014年,华东理工大学 TU Y等^[58]提出了一种用于高温部件结构完整性监测的金属封装 RFBG 应变传感器,在恒定条件下,通过轴向拉伸传感器进行应变响应测试,测试室温到 400 °C。实验结果表明,该传感器线性度、稳定性和可重复性均较好,此外,实验结果与预测应变数值的比较表现出令人满意的一致性。

2016年,大连理工大学 ZHOU Z等^[59]提出了一种碳纤维增强聚合物封装 FBG 应变传感器,并对其在正常环境和恶劣环境下的传感性能进行了实验研究。实验结果表明,传感器在恶劣环境下保持了与裸露的 FBG 传感器一样的优良传感性能,并且由于碳纤维增强聚合物材料的使用,其耐久性显著提高,应变测量范围增加到 8 000~12 000 $\mu\epsilon$,该传感器在 140 °C 的环境温度下不会退化。

2019年,北京遥测技术研究所 LI J Y等^[60]提出了一种高温合金封装的耐高温镀金光纤 EFPI 应变传感器,其封装基底图如图 13 所示。该传感器可以耐 850 °C 高温,通过仿真计算,对于模型的应变传递规律进行探究,提出灵敏度优化方案,在理论和模拟的指导下完成相应实验标定,测试证明该传感器具有良好的重复性,通过搭载运载火箭发动机试车得到试车过程涡轮泵表面的应变数据,证明该传感器具备工程实用价值。

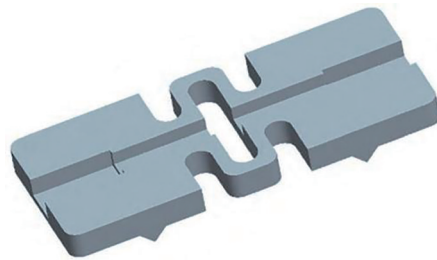


图 13 传感器封装基底示意图^[60]

Fig. 13 Schematic diagram of the sensor package base^[60]

3.2 光纤高温应变传感器应用

较高比例的光纤高温应变传感器仍处于实验室研制阶段,在批量生产和实际应用中存在较多工程化问题。目前在实验室研究基础上,科研工作者开发了一些能够在实际生产中应用的光纤高温应变传感器。21世纪初,美国国家航空航天局在研究机翼形状测量方法时,在一根复合材料制成的空心管上布置了多条弱反射 FBG 传感器,可实现弯曲扭转组合状态下挠度的计算测量,进行多次往返航天飞行器项目中的测试。实验结果证明,基于 FBG 原理的传感器是进行集成化健康监测的最佳选择。此外,国外许多研究机构也将光纤传感网络应用到机翼的蒙皮结构上,用于实现热结构的温度和应变的实时在线监测。

在高温环境中的热结构健康监测领域,国内的一些高校开展了近 20 年的研究工作。哈尔滨工业大学 MENG S H等^[61]通过对大量的胶粘剂及粘接工艺的研究,提供了一种在 700 °C 高温环境中粘接超高温陶瓷结构与石英光纤的方法,实现了高温环境中热结构的温度和应变的同时监测,为热结构的健康监测提供了一种新方法。哈尔滨工业大学 XIE W H等^[62]经过长期试验,提出了使用 CCG 对高温合金和碳/碳结构进行高温应变测试的实验方法和信号处理技术,实验结果表明,粘贴在高温合金和碳/碳结构表面的 CCG 的波长随着温度的升高呈非线性增长,并且 CCG 的应变灵敏度与温度相关,在 600 °C 以下的温度环境中变化稳定,在 600 °C 以上的温度环境中,随着温度的增加,其应变传递系数趋于轻微下降。

国外不但对光纤高温应变传感器的原理性和基础性进行了研究,而且对实际使用时高温应变传感器的集成方式和功能验证也进行了研究,并在此基础上进行了初步的实验测试。相比之下,国内报道的光纤高温应变传感器应用于高温环境中热结构监测的研究在实际应用方面探索较少,急需加大研究力度。

4 结论

光纤高温应变传感器具有尺寸小、成本低、分辨率高、抗电磁干扰能力强等优点,在高温恶劣环境中的结构健康监测中得到了广泛应用。目前,国内外的研究单位和高校对光纤高温应变传感器进行了大量研究,在耐温性提升和应变增敏方面取得了一系列成果。文中综述了基于 FBG 型、光纤干涉型高温应变传感器的传感机理、实验方法以及封装应用情况,总结了不同传感机理对温度、应变的响应特性。目前,光纤高

温应变传感器存在温度应变交叉敏感问题,温度会影响应变的测量结果,并且传感器的封装保护及其应用还一直在探索阶段,在极端环境条件下,传感器不能精确地测量温度和应变。未来,对于光纤高温应变传感器的重点研究工作有以下几点:一是需要设计新颖的传感器结构和研究新的温度和应变解调方法,解决光纤高温应变传感器的温度应变交叉敏感问题,提高传感器的测量精度;二是设计新的封装结构结合耐高温材料,封装保护传感器,使传感器能够应用于极端环境下的实际场合,并且能够精确测量待测物的温度和应变。随着各种尖端科技的发展,对于高温环境中的温度应变传感的需要也会越来越迫切,而光纤高温应变传感器仍会成为高温领域的研究热点。

参考文献

- [1] LI H N, LI D S, SONG G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. *Steel Construction*, 2004, 26(11): 1647-1657.
- [2] TENNYSON R C, MUFTI A A, RIZKALLA S, et al. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(3): 560-573.
- [3] NAEEM K, CHUNG Y, KIM B. Cascaded two-core PCFs-based in-line fiber interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(9): 3322-3327.
- [4] WANG Y X, BAO H H, RANG Z, et al. Integrated FP/RFBG sensor with a micro-channel for dual-parameter measurement under high temperature[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4250-4254.
- [5] PAN Y, LIU T, JIANG J, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using spheroidal-cavity-overlapped FBG[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-6.
- [6] JIANG Y, YANG D, YUAN Y, et al. Strain and high-temperature discrimination using a Type II fiber Bragg grating and a miniature fiber Fabry - Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6341-6345.
- [7] KONRAD M, KAZIMIERZ J D, MICHA M, et al. Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry-Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1464-1467.
- [8] SONG M, SANG B L, SANG S C, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube[J]. *Optical Fiber Technology*, 1997, 3(2): 194-196.
- [9] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [10] HILL K O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 32(10): 1035-1037.
- [11] ZHU Y, MEI H, ZHU T, et al. Dual-wavelength FBG inscribed by femtosecond laser for simultaneous measurement of high temperature and strain[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 675-678.
- [12] LI G Y, GUAN B O. The strain response of chemical composition gratings at high temperatures[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(2): 025204.
- [13] ZHU Y, MEI H, ZHU T, et al. Dual-wavelength FBG inscribed by femtosecond laser for simultaneous measurement of high temperature and strain[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 675-678.
- [14] WANG Y P, QIAO X G, YANG H Z, et al. Sensitivity-improved strain sensor over a large range of temperatures using an etched and regenerated fiber Bragg grating[J]. *Sensor*, 2014, 14(10): 18575-18580.
- [15] YANG H Z, QIAO X G, WANG Y P, et al. In-fiber Gratings for simultaneous monitoring temperature and strain in ultrahigh temperature[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 27(1): 58-61.
- [16] HABISREUTHER T, ELSMANN T, GRAF A, et al. High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-8.
- [17] ZHANG P, YANG H, WANG Y, et al. Strain measurement at temperatures up to 800 °C using regenerated gratings produced in the high Ge-doped and B/Ge co-doped fibers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(22): 6073-6078.
- [18] YANG T T, QIAO X G, RONG Q, et al. Fiber Bragg gratings inscriptions in multimode fiber using 800 nm femtosecond laser for high-temperature strain measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 138-142.
- [19] ZHANG Y, DING X, SONG Y, et al. Characterization of a fiber Bragg grating in pure-silica-core and Ge-doped-core optical fiber under high-temperature strain[J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, 7(8): 675-678.
- [20] 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.
- [21] SU D, QIAO X, CHEN F, et al. Compact dual fiber Bragg gratings for simultaneous strain and high-temperature measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5660-5664.
- [22] VIVEIROS D, AMORIM V A, MAIA J M, et al. Femtosecond laser direct written off-axis fiber Bragg gratings for sensing applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106227.
- [23] TIAN Q, XIN G, LIM K S, et al. Optical fiber sensor with double tubes for accurate strain and temperature measurement

- under high temperature up to 1000 °C[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(12): 11710-11716.
- [24] JIANG Y, YANG D, YUAN Y, et al. Strain and high-temperature discrimination using a Type II fiber Bragg grating and a miniature fiber Fabry - Perot interferometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6341-6345.
- [25] YAN Q, LIU W, DUAN S, et al. A cascade structure made by two types of gratings for simultaneous measurement of temperature and strain[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 42: 105-108.
- [26] TIAN Q, YANG H, LIM K S, et al. Temperature and strain response of in-fiber air-cavity Fabry-Perot interferometer under extreme temperature condition[J]. Optik, 2020, 220: 165034.
- [27] YANG, T T, RAN Z, HE X, et al. Temperature-compensated multifunctional all-fiber sensors for precise strain/high-pressure measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37 (18): 4634-4642.
- [28] LIU J, WANG D N, LIU Y. Sensitivity improvement by fusion splicing of single mode fibers with core offset[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(10): 3722-3730.
- [29] PAIXO T, FRANCISCO A. Highly sensitive fiber optic temperature and strain sensor based on an intrinsic Fabry-Perot interferometer fabricated by a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2019, 44(19): 4833-4836.
- [30] LIU S, WANG Y, LIAO C, et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry - Perot interferometer [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2121-2124.
- [31] ZHOU A, QIN B, ZHU Z, et al. Hybrid structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5267-5270.
- [32] GANG T, TONG R, BIAN C. A novel strain sensor using a fiber taper cascaded with an air bubble based on Fabry - Perot Interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(4): 4618-4622.
- [33] CHEN Y, LUO J, LIU S, et al. A high-strength strain sensor based on a reshaped micro-air-cavity[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4530.
- [34] 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.
- [35] GONG Y, RAO Y J, GUO Y, et al. Temperature-insensitive micro Fabry-Pérot strain sensor fabricated by chemically etching Er-doped fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2009, 21(22): 1725-1727.
- [36] RAO Yunjiang, LI Hong, ZHU Tao, et al. Fabry-Pérot interferometric high temperature strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. Chinese Laser, 2009(6): 1484-1488.
饶云江, 黎宏, 朱涛, 等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉型高温应变传感器[J]. 中国激光, 2009(6): 1484-1488.
- [37] XIONG L, ZHANG D, LI L, et al. EFPI-FBG hybrid sensor for simultaneous measurement of high temperature and large strain[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(12): 120605-120609.
- [38] FERREIRA M S, RORIZ P, BIERLICH J, et al. Fabry-Perot cavity based on silica tube for strain sensing at high temperatures[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 16063-16070.
- [39] LIU H, YANG H Z, QIAO X, et al. Strain measurement at high temperature environment based on Fabry-Perot interferometer cascaded fiber regeneration grating[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 248: 199-205.
- [40] YANG T, HE X, RAN Z, et al. Highly integrated all-fiber FP/FBG sensor for accurate measurement of strain under high temperature[J]. Materials, 2018, 11(10): 1867.
- [41] LIU D, WU Q, MEI C, et al. Hollow core fiber based interferometer for high-temperature (1 000 °C) measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(9): 1583-1590.
- [42] WANG Z, LIU H, MA Z, et al. High temperature strain sensing with alumina ceramic derived fiber based Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27691-27701.
- [43] NAN J, ZHANG D, WVN X, et al. Elimination of thermal strain interference in mechanical strain measurement at high temperature using an EFPI-RFBG hybrid sensor with unlimited cavity length[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(10): 5270-5276.
- [44] TIAN Q, XIN G, LIM K S, et al. Cascaded Fabry-Perot interferometer-regenerated fiber Bragg grating structure for temperature-strain measurement under extreme temperature conditions[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 30478-30488.
- [45] XIA P, TAN Y, LI T, et al. A high-temperature resistant photonic crystal fiber sensor with single-side sliding Fabry-Perot cavity for super-large strain measurement[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 318: 112492.
- [46] LIU X, NAN P, ZHU J, et al. Ultrasensitive parallel double-FPIs sensor based on Vernier effect and Type II fiber Bragg grating for simultaneous measurement of high temperature and strain[J]. Optics Communications, 2022, 508: 127717.
- [47] DENG M, TANG C P, ZHU T, et al. PCF-based Fabry-Pérot interferometric sensor for strain measurement at high temperatures[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 700-702.
- [48] ZHOU A, QIN B, ZHU Z, et al. Hybrid structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Optics letters, 2014, 39(18): 5267-5270.
- [49] ZHOU K, AI M Z, QIAN Z H, et al. High-sensitivity strain sensor with an in-fiber air-bubble Fabry-Perot interferometer[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(18): 181901.

- [50] ZHANG P, ZHANG L, WANG Z, 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): 27112-27113.
- [51] LIAO C R, WANG D N, WANG Y. Microfiber in-line Mach-Zehnder interferometer for strain sensing [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 757-759.
- [52] DONG X, DU H, LUO Z, et al. Highly sensitive strain sensor based on a novel Mach-Zehnder interferometer with TCF-PCF structure[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 278.
- [53] DONG L G, GANG T T, BIAN C, et al. A high sensitivity optical fiber strain sensor based on hollow core tapering[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 56: 102179.
- [54] ZHANG N, XU W, YOU S, et al. Simultaneous measurement of refractive index, strain and temperature using a tapered structure based on SMF[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 70-74.
- [55] LIAO Y C, LIU B, LIU J, et al. High temperature (up to 950 °C) sensor based on micro taper in-line fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2394.
- [56] ZHANG C, NING T, ZHENG J, et al. An optical fiber strain sensor by using of taper based TCF structure[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105687.
- [57] LIU J, LUO C, YANG H, et al. Mach-Zehnder interferometer for high temperature (1 000 °C) sensing based on a few-mode fiber[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(3): 341-349.
- [58] TU Y, TU S T. Fabrication and characterization of a metal-packaged regenerated fiber Bragg grating strain sensor for structural integrity monitoring of high-temperature components[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(3): 035001.
- [59] ZHOU Z, WANG Z, SHAO L. Fiber-reinforced polymer-packaged optical fiber Bragg grating strain sensors for infrastructures under harsh environment[J]. *Journal of Sensors*, 2016, 2016: 3953750.
- [60] PERTIC C M, SRIDHARAN N, HEHR A, et al. High-temperature strain monitoring of stainless steel using fiber optics embedded in ultrasonically consolidated nickel layers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085041.
- [61] MENG Songhe, DU Chong, XIE Weihua, et al. Application of high temperature optical fiber sensor in temperature and strain measurement of thermal structure [J]. *Solid Rocket Technology*, 2013, 36(5): 701-705.
孟松鹤, 杜翀, 解维华, 等. 光纤高温传感器在热结构温度和应变测试中的应用[J]. *固体火箭技术*, 2013, 36(5): 701-705.
- [62] XIE W, MENG S, JIN H, et al. Measurement of high-temperature strains in superalloy and carbon/carbon composites using chemical composition gratings[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(1): 1-28.

Progress in Research of Optical Fiber High Temperature and Strain Sensor (Invited)

YANG Hangzhou, LIU Xin, NAN Pengyu, XIN Guoguo
(School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Optical fiber sensors have the advantages of small size, low cost, high resolution, compact structure, strong anti-electromagnetic interference ability, etc., which have been widely used in structural health monitoring. The application of optical fiber high temperature strain sensors in the high temperature and harsh environment in aerospace, petroleum exploration, industrial smelting and other fields has attracted more and more interest of researchers. At present, thermocouples and resistance strain gauges are commonly used to measure temperature and strain, respectively. However, both of them have many shortcomings. Thermocouples are very expensive, low precision and sensitive to pollution; the resistance strain gauges themselves have very high costs, short service life, complicated pasting process and low measurement accuracy. Therefore, there are so many challenges for high temperature strain sensors based on electrical type in high-temperature and harsh environments and it is urgently ask for developing other kinds of sensors to be used in these environments. Optical fiber high temperature strain sensors are one of the most important sensors due to their many advantages. For example, they can be protected by ultra-high temperature ceramics, carbon/silicon carbide and other materials with mature preparation technologies, and can be used for thermal structure health monitoring in high temperature environment.

It is of great significance to explore and develop optical fiber sensors that can be used in high temperature environment. However, when optical fiber high-temperature strain sensor is used to monitor

the temperature and strain of thermal structure in the high-temperature environment in real time, the sensor can respond to temperature and strain at the same time in the demodulation process, resulting in the problem of cross-sensitivity. In the process of strain measurement, temperature affects the measurement results at the same time, resulting in a large strain measurement error. How to solve this problem is particularly important. At present, there are two demodulation methods: dual-wavelength demodulation and temperature compensation demodulation. Dual-wavelength demodulation method adopts dual-parameter matrix to demodulate temperature and strain, which can cause large measurement error in high temperature environment. In the temperature compensation demodulation method, one of the sensor structures is protected by adhesive package, so that it only responds to temperature, and the other sensor structure is compensated for temperature. However, this method is only suitable for the experimental test in low temperature environment because the adhesive is not resistant to high temperature. At present, the research scheme and technical route to effectively solve the temperature-strain cross-sensitivity problem of optical fiber sensors are not clear, especially for strain monitoring at ultra-high temperature. Therefore, it is an extremely urgent problem to design the sensor structure and improve the demodulation method to realize the accurate measurement of temperature and strain in high temperature environment. The developed optical fiber high temperature strain sensors should not only have a more reliable demodulation method, but also largely solve the main technical problems left by the current optical fiber high-temperature strain sensor.

In this paper, sensing mechanisms, experimental methods and packaging applications based on FBG and optical fiber interference type high-temperature strain sensors are reviewed. The response characteristics of different sensing mechanisms to temperatures and strain are summarized and the measurement parameters of various fiber optic high temperature strain sensors are compared in table, including the measure range of temperature and strain, the sensitivity of temperature and strain, and the latest development of optical fiber high temperature strain sensor is introduced emphatically. Finally, the perspective of optical fiber high temperature strain sensor is forecasted.

Key words: Fiber optic sensor; High temperature strain; Fiber Bragg grating; Fabry-Perot interferometer; Mach-Zehnder interferometer; Temperature and strain measurement

OCIS Codes: 060.2370; 280.4788; 060.2300; 060.3735