

激光与光电子学进展

基于光纤布拉格光栅的准分布式高温监测系统

司晓龙¹, 吴林坊¹, 庄岩², 牟成博¹, 刘云启^{1*}

¹上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;

²上海华谊新材料有限公司, 上海 201507

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)具有复用能力强、灵敏度高、体积小、耐腐蚀等优点,广泛应用于多种工程监测中。使用 193 nm 准分子激光器在标准通信单模光纤(康宁, SMF-28)上制备了高反射率 FBG 阵列,并对其进行了约两个月的长期退火实验研究;设计了一种光纤高温传感系统,可在 400 °C 以下对环境的温度进行准分布式测量,测温误差小于 0.2 °C。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 准分布式测温; 高温传感; 光纤传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0106001

Quasi-Distributed High-Temperature Monitoring System Based on Fiber Bragg Grating

Si Xiaolong¹, Wu Linfang¹, Zhuang Yan², Mou Chengbo¹, Liu Yunqi^{1*}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Shanghai Huayi New Material Co. Ltd., Shanghai 201507, China

Abstract Fiber Bragg gratings (FBGs) have advantages such as excellent multiplexing capability, high sensitivity, compact structure, and corrosion resistance. Therefore, they have been widely used in various practical engineering applications. In this study, we used a 193-nm excimer laser to fabricate a highly reflective FBG array on a standard communication single-mode fiber (Corning, SMF-28). We performed a long-term annealing experiment for about two months. High-temperature optical fiber sensing systems are designed to achieve quasi-distributed measurement of environment temperature below 400 °C, with temperature measurement errors of less than 0.2 °C.

Key words fiber optics; fiber Bragg gratings; quasi-distributed temperature measurement; high temperature sensing; optical fiber sensors

OCIS codes 060.3735; 060.3738; 060.2300; 060.2370

1 引言

利用热电偶对环境温度进行监测是国内外工

程应用中一种普遍的技术手段,目前很多工程应用需要环境的温度进行准分布式实时监测,以便对环境温度有更全面、及时的了解,而热电偶难以满

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-05-22; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61875117)

*E-mail: yqliu@shu.edu.cn

足这一需求,采用热电偶对温度进行准分布式测量会导致成本大幅提升、传感器体积大幅增大。FBG 具有复用能力强、尺寸小、灵敏度高、响应速度快等优点,非常适合用于温度的准分布式测量。由于监测环境的温度可能很高,且 FBG 作为温度传感器需要长期、稳定地用于工程当中,因此对 FBG 的高温特性进行研究是非常有必要的。目前对 FBG 热稳定性的研究已经取得了较大的进展^[1-12],可将其大体分为 I 型 FBG 研究^[1-3]、II A 型 FBG 研究^[4-5]、II 型 FBG 研究^[6-11]。此外,文献[12-16]对再生光栅的高温特性进行了研究。FBG 在温度传感的工程应用方面也取得了一定的进展^[17-21],目前已成功应用于变压器^[17]、电机^[18]、井下油田^[19]、火灾报警系统^[20]等诸多领域。近年来,基于 FBG 的高温传感器已受到研究人员和工业界相关人士的关注。

I 型 FBG 的反射率在 300 °C 以上时会降低,在 900 °C 时会被完全擦除^[1],故 I 型 FBG 只能在 300 °C 以下长期工作,温度高于 300 °C 时 FBG 被擦除的现象被称为 FBG 的热衰退效应^[2]。柳阳等^[3]提出对 I 型 FBG 进行预热处理可提升其热稳定性的结论。Dong 等^[4]采用 193 nm 准分子激光在硼锆共掺光纤上写入了 II A 型 FBG,该 FBG 只有当温度升高到 500 °C 时,反射率才开始下降;Groothoff 等^[5]采用 193 nm 准分子激光在硼锆共掺光纤上写入了折射率调制深度高达 10^{-3} 量级的 II A 型 FBG,该 FBG 只有当温度超过 800 °C 时,反射率才开始明显下降;Archambault 等^[6]制备的 II 型 FBG 在 800 °C 退火 24 h 后,其反射率仍无明显下降,在 1000 °C 退火 4 h 后,该 FBG 才被完全擦除。飞秒激光结合逐点写入法^[7]或相位掩模法^[8]可在普通光纤上制备出能承受 900 °C 高温的 II 型 FBG。Grobnic 等^[9]使用飞秒激光在蓝宝石光纤上制备出了能承受 1500 °C 高温的 II 型 FBG;2018 年,廖常锐等^[10]介绍了飞秒激光制备 FBG 的机理,并综述了由飞秒激光制备的 FBG 在高温传感领域的研究进展;2019 年,Liu 等^[11]使用 193 nm 准分子激光制备了 FBG 并进行了退火实验,他们认为在 FBG 的制备过程中有两种折射率调制机理,一种是在低温时占主导地位,另一种是在高温时占主导地位。2002 年,Fokine^[12]报道了再生光栅的研究结果;2012 年,Cook 等^[13-14]制备了可在 1100 °C 以下稳定工作的再生光栅,其最高可承受 1295 °C 的高温,他们认为再生光栅形成的根本原因是高温下光纤的应力松弛差异导致折射率调制。

国内也开展了再生光栅相关的研究工作^[15]。2018 年,薛渊泽等^[16]从再生光纤光栅的形成机理、制备方法、特殊类型光栅的再生以及机械强度保护 4 个方面,对国内外再生光纤光栅的研究做了总结和分析。耐高温光纤光栅的研究仍是光纤光栅制备和应用领域的热点。目前很多团队对高温下 FBG 的反射率变化进行了大量研究,但是对长期处于高温(温度不变)环境下 FBG 的谐振波长变化规律的研究却不多。FBG 作为温度传感器,其需要在几年甚至更久的时间里稳定工作,这要求 FBG 的谐振波长不能出现明显的偏差,因此研究长期高温(温度不变)下 FBG 谐振波长的变化情况对于其工程应用有着重大意义。通过调研各种场合中需要测量的温度范围,发现很多应用场合的测温需求为室温至 400 °C。

本文使用 193 nm 准分子激光在 SMF-28 光纤上制备了 FBG,该 FBG 的反射带宽小于 0.2 nm,具备很好的复用能力和测温精度,且在 800 °C 下依然具有超过 50% 的反射率;通过高温传感实验,得到了 FBG 谐振波长和温度之间的关系,对 FBG 进行了近两个月的高温退火实验,得到了高温(温度不变)环境下 FBG 谐振波长的变化规律,该研究为 FBG 的实际工程应用提供了保证。另外设计了可应用于实际工程中的准分布式高温监测系统,实验结果表明,该系统可在 400 °C 以下长期稳定工作,实际测温误差小于 0.2 °C,其具有很好的应用前景。

2 光纤光栅退火与温度响应特性

2.1 FBG 的制备

FBG 的形成机理和很多因素相关,例如写入激光器的波长和能量、光纤掺杂情况、光纤光敏类型、光纤结构、载氢情况等。在光纤上制备 FBG 时,在光纤中引入的折射率调制往往是多种光敏机理共同作用的结果。为了提高 FBG 的制备效率,可在高掺锆或硼锆共掺的光纤上轻松地制备出 I 型 FBG 或 II A 型 FBG(取决于激光的曝光次数),但在这类光纤上制备的 FBG 的热稳定性不够好,因此常规方法制备的 I 型 FBG 或 II A 型 FBG 均不适用于高温传感。高能量的紫外脉冲曝光可在光敏性较差的光纤中缓慢地引入基于结构重组机理的折射率调制,但效率较低,其原因是这种类型的折射率调制需要高能量的紫外脉冲长时间曝光才可形成,本质是在

光纤的纤芯和包层表面引起物理性损伤。这种类型的折射率调制有着较高的热稳定性。

本研究使用 193 nm 准分子激光(工作能量和频率分别为 6.0 mJ、20 Hz)在 SMF-28 光纤上制备了 FBG。FBG 的制备过程中,透射光谱的变化如图 1(a)所示,FBG 谐振波长及谐振峰对比度的变化

如图 1(b)所示。激光刚开始曝光时,FBG 谐振波长变化及谐振峰对比度增大较快,这是因为基于色心机理的折射率调制具有较高的调制效率;激光后续曝光时,FBG 谐振波长变化及谐振峰对比度增大的速度逐渐下降,这是因为基于结构重组机理的折射率调制的效率较低。

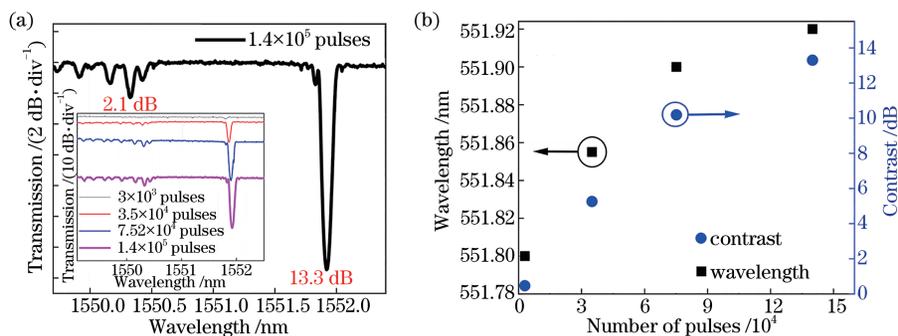


图 1 FBG 的制备。(a)不同脉冲曝光条件下 FBG 的透射光谱;(b)不同脉冲曝光条件下 FBG 的谐振波长和对比度

Fig. 1 Fabrication of FBGs. (a) Transmission spectrum of FBGs under different pulse exposure conditions; (b) wavelength and contrast of FBGs under different pulse exposure conditions

使用 193 nm 准分子激光在未载氢的 SMF-28 光纤上制备 FBG 时,当紫外脉冲曝光次数较少时,在光纤中引入的是基于色心机理的折射率调制,由于 SMF-28 光纤纤芯中锗的掺杂量较少,因此基于色心机理的折射率调制的深度并不大;当紫外激光的曝光脉冲次数较多时,高能量的紫外脉冲曝光会在光纤中引入一定的基于结构重组机理的折射率调制。本实验使用 193 nm 准分子激光在未载氢的 SMF-28 光纤上最高只能制备出谐振峰对比度为 13.3 dB 的 FBG,之后尽管激光曝光脉冲次数不断地增加,但 FBG 谐振峰的对比度不再增加。

使用其他紫外激光难以在未载氢的 SMF-28 光纤上制备出 FBG,在载氢和未载氢光纤上制备 FBG 的成栅机理不同,紫外激光在载氢光纤上制备的 FBG 的热稳定性较差。本研究使用 193 nm 准分子激光在未载氢的 SMF-28 光纤上制备了 FBG,由于在光纤中引入了基于结构重组机理的折射率调制,因此制备的 FBG 也具有较高的热稳定性。相较于其他传统 I 型 FBG 或 II A 型 FBG,该 FBG 具有较高的热稳定性;相较于采用飞秒激光制备的 II 型 FBG,该 FBG 具有较窄的反射带宽,保证了 FBG 的复用能力和测温精度;相较于再生光栅,该 FBG 具有更高的反射率和更好的机械性能。

2.2 FBG 的高温特性

FBG 具有热衰退效应,即随着温度升高,其反射率逐渐下降。为了研究实验中制备的 FBG 的高

温特性,确保其在高温下具有适当的反射率且可正常工作,采用管式气氛炉(SJX-1500)对其进行高温退火。图 2 为实验装置的示意图,管式炉内的最高温度为 1400 °C,FBG 水平放置在管式炉内,光纤两端通过高温胶固定,FBG 附近放置热电偶(FLUKE-53,K 型,分辨率为 0.01 °C),用于精确标定 FBG 周围的温度。实验中,为了实时、准确地测量出 FBG 反射率和谐振波长的变化,使用商用的传感器分析仪(MOI,SM125)来测量 FBG 的透射光谱(SM125 的波长分辨率为 0.1 pm,测量频率为 2 Hz)。SM125 的每个通道均内置有独立的光源和光信号探测器,因此每个通道均可作为光源或光谱分析仪使用。通道 1 输出的信号光经过 FBG 和光隔离器后进入通道 2,光隔离器用于保证通道 2 输出的信号光被隔离,因此在通道 1 可以测量 FBG 的反射光谱,在

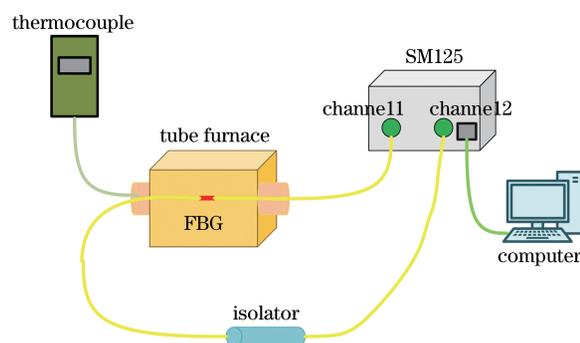


图 2 FBG 退火装置的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of annealing setup for FBGs

通道 2 可以测量 FBG 的透射光谱。实验中,管式炉的温度以 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升高,每隔 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,管式炉的温度稳定 20 min ,以保证 FBG 周围的实际温度与热电偶测得的温度一致,进而避免由热电偶温度响应速度慢引起的热电偶示数迟滞效应。

2.1 节中制备出的谐振峰对比度为 13.3 dB 的 FBG 在室温下放置半个月后,其谐振峰的对比度稳定在 10 dB 左右。该 FBG 的退火实验结果如图 3 所示。当温度高于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FBG 谐振峰的对比度开始下降,这是因为基于色心机理的折射率调制开始被擦除(193 nm 准分子激光在未载氢的 SMF-28 光纤上制备 FBG 的过程中,由于该光纤的纤芯掺杂了一定量的锗,因此会在光纤中引入基于色心机理的折射率调制);当温度达到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FBG 谐振峰的对比度约为 6 dB ;当温度达到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FBG 谐振峰的对比度降为 3.85 dB ,将 FBG 谐振峰的对比度换算为 FBG 的反射率,可得 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时其反射率依然超过 50% ,这是因为在 SMF-28 光纤中引入的基于

结构重组机理的折射率调制在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下都很稳定;而当温度超过 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FBG 谐振峰的对比度急剧下降,这是因为基于结构重组机理的折射率调制开始被擦除。由图 3(a)可知,随着温度的升高,FBG 谐振峰的对比度下降,但有两个明显的拐点:第一个拐点是在近 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,第二个拐点是在近 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。第一个拐点产生的原因是在 SMF-28 光纤上制备 FBG 的过程中引入了一些基于色心机理的折射率调制,这种折射率调制在温度超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会逐渐被擦除;第二个拐点产生的原因是在 SMF-28 光纤上制备 FBG 的过程中引入了基于结构重组机理的折射率调制,这种折射率调制在温度超过 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时才会被逐渐擦除。图 3(b)和图 3(c)分别为 $22.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $801\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 FBG 的透射光谱。退火实验结果表明,本文制备的 FBG 可以很好地应用于高温(低于 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下的温度测量;且该 FBG 反射峰的带宽仅为 0.2 nm ,可以保证 FBG 的复用能力和测温精度。

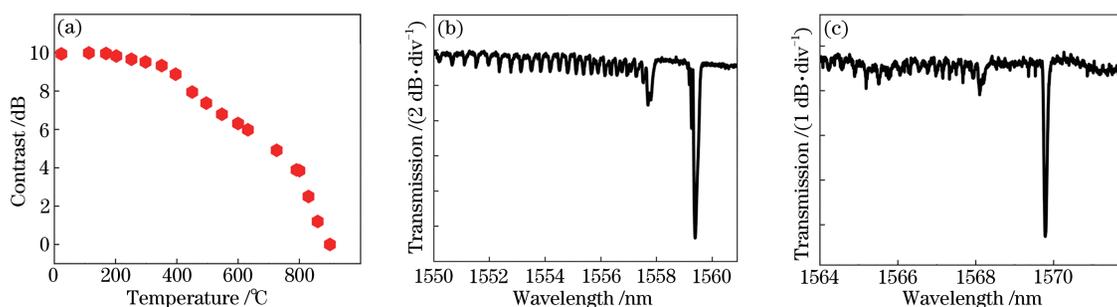


图 3 FBG 的退火实验结果。(a)高温下 FBG 的对比度;(b) $22.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的光谱;(c) $801\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的光谱

Fig. 3 Annealing experiment results of FBGs. (a) Contrast of FBGs under high temperature; (b) transmission spectrum of FBG under $22.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) transmission spectrum of FBG under $801\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.3 FBG 的温度传感

聚酰亚胺是一种性能优良的有机高分子材料,这种材料涂覆的光纤能够在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下稳定工作,在 $350\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内可短期使用,采用聚酰亚胺对 FBG 栅区进行重新涂覆处理可有效地保护 FBG 栅区,这种方法具有体积小、保护性强的优势,因此被广泛地使用。当瞬时温度超过 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (或长期温度超过 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时,聚酰亚胺涂覆层可能会发生炭化,因此针对高温下聚酰亚胺涂覆层对 FBG 的谐振波长的影响进行了研究。在 SMF-28 光纤上制备 FBG;使用聚酰亚胺对 FBG 栅区重新涂覆;在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对完成重新涂覆处理的 FBG 进行 2 h 退火处理,以使 FBG 的高温性质更加稳定;最后对 FBG 进行 3 次温度传感实验,实验结果如图 4 所示。由

图 4(a)可知,3 次温度传感的实验结果具有很强的重复性,实验数据几乎重合为一条曲线。在温度的变化范围较小时,可近似地认为 FBG 的谐振波长和温度呈线性关系。对 3 次实验数据进行了线性拟合,其拟合程度为 0.99736 ;而采用二次多项式进行拟合时,其拟合程度为 0.99997 。由图 4(b)的拟合结果可知,在 $30\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内 FBG 的谐振波长和温度之间更接近二次曲线关系。

2.4 FBG 的封装

高温光纤光栅应用于工业环境时,实际环境可能比较恶劣,且高温下光纤的机械性能变差,封装光纤光栅对于高温光栅的实际应用具有重要意义。FBG 工作在高温环境中,通常不仅需要对 FBG 栅区进行保护,还需对处于高温下的光纤进行保护。

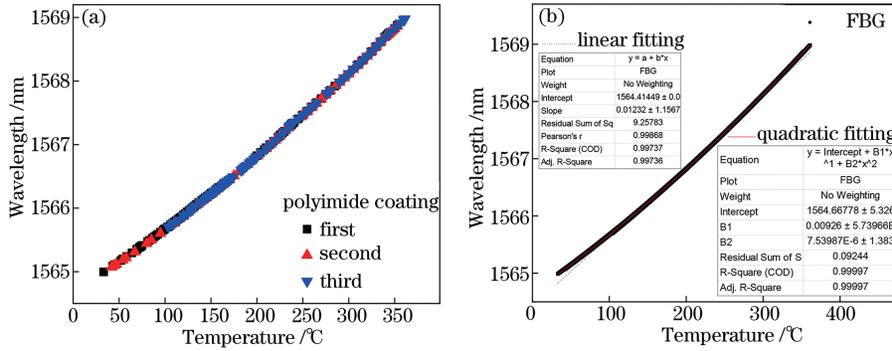


图 4 温度传感实验结果。(a)温度传感重复性实验;(b)3次实验数据的拟合结果

Fig. 4 Experiment results of temperature sensing. (a) Repeatability experiments of temperature sensing; (b) fitting results of three experimental data

选取尺寸合适的不锈钢管可以对 FBG 栅区和光纤进行保护, 以使其免于环境因素(应力、弯曲等)的干扰。本研究采用内径为 1 mm、外径为 2 mm 的不锈钢管对 FBG 进行封装, 图 5 为典型封装的效果图, 采用紫外固化胶、不锈钢管和光纤跳线对 FBG 传感器的右端进行封装, 并采用机械法将光纤和不锈钢管结合在一起, 进而完成对 FBG 传感器左端的封装。

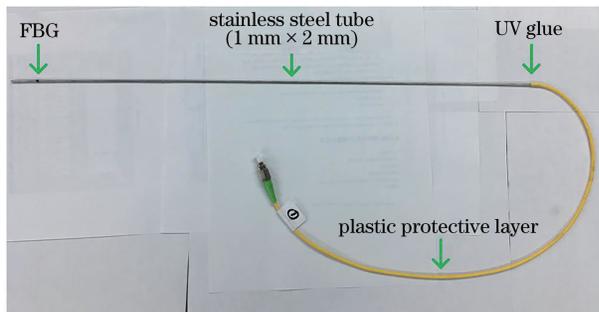


图 5 不锈钢封装的 FBG 传感器

Fig. 5 Stainless steel packaged FBG sensor

为了测试这种封装方法对 FBG 温度灵敏度的影响, 对其进行了温度传感实验, 实验结果如表 1 所示, 不锈钢管封装对 FBG 的温度灵敏度几乎没有影响, 这说明本封装方法中不锈钢管的热胀冷缩不会对 FBG 施加应力, 因此这种封装的主要作用是保护 FBG 不受外界应力的影响, 封装对 FBG 温度灵敏度的影响可以忽略。FBG 作为温度传感器应用于工程中时, 还需对实际情况进行具体分析。在某些场合, 需要采用更合适的保护方案来保证整个光路不受影响, 例如在环境较为复杂、人员流动性较强的场所, 可使用金属软管结合标准件对光纤的跳线部分进行保护(光纤跳线置于金属软管内部), 金属软管的另一端通过铠装光缆长距离铺设至中央控

制室内, 并与传感器件分析仪相连, 这种方法可很好地保护整个光路。

表 1 不锈钢管封装与否对 FBG 温度灵敏度的影响

Table 1 Effect of encapsulation using stainless steel tube on the temperature sensitivity of FBGs

unit: $\text{pm} \cdot \text{C}^{-1}$

Encapsulation	Temperature sensitivity			
	25—100	100—200	200—300	300—400
No	10.5	11.6	13.2	14.5
Yes	10.3	11.5	13.1	14.2

3 准分布式测温系统

3.1 准分布式设计

首先设计了基于 FBG 的准分布式温度监测系统, 如图 6(a)所示, 该系统主要分为 3 个模块: 1) 由 FBG 组成的准分布式温度传感网络; 2) 由光纤跳线、金属软管、铠装光缆组成的传输模块; 3) 由传感器分析仪(MOI, SM225)和计算机端解调软件组成

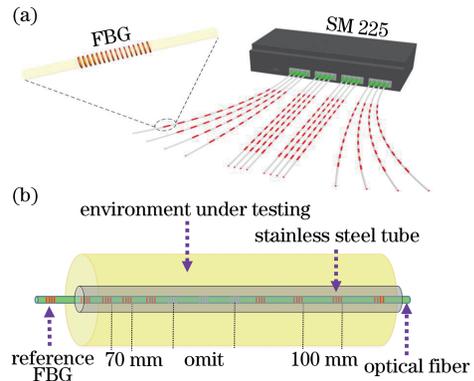


图 6 准分布测温的示意图。(a)整体示意图;(b)细节图

Fig. 6 Schematic diagram of quasi-distribution temperature measurement. (a) Comprehensive schematic; (b) partial schematic

的解调模块。准分布式温度传感网络具有 16 个彼此相互独立的光信号解调通道,每一个光纤通道上均可分布有很多个 FBG 测温位点(FBG 的数量由温度测量范围和待测位点的数量共同决定),每个 FBG 均可对其周围温度进行独立测量,FBG 在物理上的间隔可根据实际需求进行调整,如可根据实际需求(被测环境的温度分布情况),将其中一个光纤通路设计为如图 6(b)所示的结构:上部分 FBG 的间隔均为 70 mm,共 40 个 FBG;下部分 FBG 的间隔均为 10 mm,共 10 个 FBG。上下两部分共计 50 个 FBG。另外,在测温区外面连接一个参考 FBG,用于监测整个光纤通路是否受其他因素(应力、弯曲等)的影响。

3.2 长期退火与测温结果

在 FBG 的工程应用中,本研究采用的是 193 nm 准分子激光(工作能量和频率分别为 5.7 mJ、20 Hz)在 SMF-28 光纤上制备的 FBG,该 FBG 和图 1 中的 FBG 略有差别(主要差别是工程中所用 FBG 的谐振峰对比度约为 10 dB),这种 FBG 的制备具有很好的可重复性。FBG 在进行实际工程应用前,需经过一定的退火处理,退火处理会使光纤中的折射率调制发生一定的变化,进而影响 FBG 的谐振波长和反射率。虽然 FBG 在某一温度下完成退火处理的过程中,其反射率在室温至该退火温度的温度范围内不会发生变化,但制备的 FBG 长期工作在高温(温度不变)环境下,其谐振波长可能会发生一定变化。根据 2.2 节中的 FBG 的反射率和环境温度之间的关系,可知随着温度的升高,FBG 的反射率逐渐下降,该 FBG 在 800 °C 下依然具有超过 50% 的反射率,这保证了制备的 FBG 在高温下可以正常工作。根据 2.3 节 FBG 的温度传感重复性实验,可知 3 次实验数据的拟合程度为 0.99997 而非 1,这细小的差别说明高温(温度不变)下 FBG 的谐振波长存在微小变化。为了研究清楚高温(温度不变)下 FBG 谐振波长的变化情况,需对 FBG 进行长期高温退火处理。对光纤进行多次高温退火后的结果显示,随着温度的升高,光纤的机械性能逐渐下降,但是在某几个温度临界点后光纤机械性能下降得比较剧烈,当温度低于 400 °C 时,光纤仍具有一定的机械性能,而当温度超过 400 °C 时,光纤的机械性能迅速变差。为了保证长期退火处理后的 FBG 温度传感器仍然具有一定强度的机械性能,本研究选择在 400 °C 对 3.1 节中的 50 个 FBG

温度传感器进行长期退火实验,以研究高温(温度不变)下 FBG 谐振波长的变化情况,退火实验装置长 5 m,其内部温度可控。以 50 个 FBG 温度传感器中的 FBG(#1)-FBG(#5)为例,对 FBG 谐振波长的变化情况进行说明,结果如图 7 所示,另外 45 个 FBG 的谐振波长变化情况均符合这一规律。

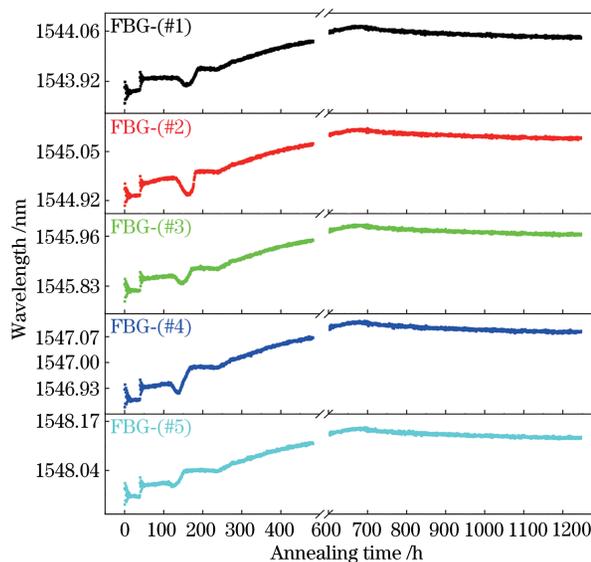


图 7 FBG 的波长和退火时间的关系

Fig. 7 Relationship between wavelength of FBGs and annealing time

退火装置的温度稳定在 400 °C,FBG 的谐振波长呈现向长波长方向漂移的趋势(其原因是大型退火装置的内部温度最初升温至 400 °C 时出现了波动,而采用小型退火炉对单个 FBG 进行退火的实验中未发现该现象),经 700 h 的退火处理后,FBG 的谐振波长才开始接近稳定状态,整个过程中 FBG 的谐振波长大约漂移了 200 pm。退火 150 h 时,所有 FBG 的谐振波长均向短波长方向漂移了约 30 pm,而后所有 FBG 的谐振波长又向长波长方向漂移,造成这个波动的原因是退火装置的内部温度出现了 2 °C 左右的波动。完成 1246 h 退火处理的 FBG,其谐振波长不再发生变化,谐振波长不再发生变化的原因是长时间退火处理后光纤中基于色心机理的折射率调制已被擦除,而基于结构重组机理的折射率调制在退火温度下很稳定,因此 FBG 的折射率调制不再变化,这为 FBG 温度传感器标定温度响应参数创造了条件。

在完成对 FBG 温度传感器的长期退火处理后,对 FBG 温度传感器的温度响应参数进行标定。本研究应用中的温度测量范围是 200~350 °C,因此将

退火后的 FBG 温度传感器在 200~350 °C 的范围内进行了温度传感实验,进而得到了 FBG 温度传感器谐振波长和其周围温度之间的对应关系。实验发现,不同位点的环境温度有细小差别,因此每个 FBG 温度传感器的温度响应参数均需要采用独立的实验数据进行标定,由于 50 个 FBG 温度传感器的实验情况非常相似,本研究选用其中一个 FBG 温度传感器的实验结果进行说明。FBG (#31) 的温度传感实验结果如图 8 所示,其二次曲线的拟合程度为 0.99984。

有研究表明^[22],在低温段(<100 °C)时,FBG 谐

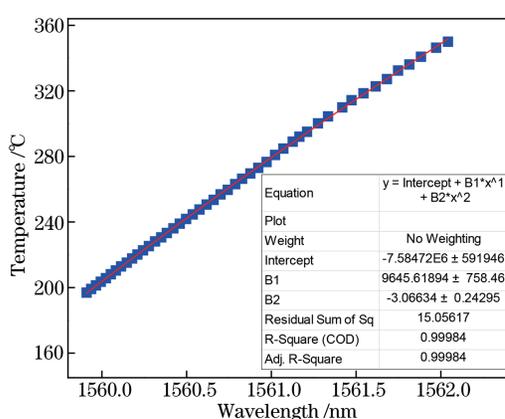


图 8 FBG(#31)温度传感器的标定结果

Fig. 8 Calibration results of FBG (#31) temperature sensor

表 2 准分布式高温监测系统的实验结果

Table 2 Experimental results of quasi-distributed high temperature monitoring system

unit: °C

Device	Measured temperature							
Thermocouple	197.6	212.9	229.8	248.9	268.3	271.3	273.0	280.9
FBG (#31)	197.791	212.797	229.974	249.028	268.167	271.117	273.147	281.012

4 结 论

FBG 作为一种常用的温度传感器,其在高温下的长期稳定性十分重要。本研究使用 193 nm 准分子激光在未载氢的 SMF-28 光纤上制备了带宽为 0.2 nm 的 FBG,该 FBG 在 800 °C 下依然具有超过 50% 的反射率;对其进行温度传感实验时发现,在 0~400 °C 的范围内 FBG 谐振波长和温度呈二次曲线的关系;利用不锈钢管对 FBG 完成封装后,设计了一个可在 0~400 °C 的范围内对环境温度进行准分布式测量的监测系统,在 400 °C 对该系统进行了 1246 h 的退火处理,结果表明退火过程中 FBG 的谐振波长逐渐向长波方向漂移,在 1246 h 的退火处理后 FBG 的谐振波长不再发生变化;采用热电偶作为

谐振波长和温度呈现较好的线性关系;但在高温段(>100 °C)时,应采用高阶多项式来拟合谐振波长和温度的关系。因此在温度测量范围较大时,FBG 谐振波长和温度之间采用多项式拟合更为准确。在 0~400 °C 的范围内,二次拟合已经足够准确,其拟合程度接近为 1;而在 0~1000 °C 的范围内,采用三次或者更高次拟合更为准确。本研究中的温度测量范围是 200~350 °C,由于二次拟合的拟合程度较好,且采用基于二次拟合的标定公式解调出的温度具有较小误差,因此本文选用二次拟合。根据图 8 中的拟合参数,可得 FBG (#31) 的温度传感响应参数、周围温度和 FBG (#31) 谐振波长之间的关系式为

$$T = -3.06634 \times \lambda^2 + 9645.61894 \times \lambda - 7584720, \quad (1)$$

式中: T 为 FBG (#31) 周围环境的温度,单位为 °C; λ 为 FBG (#31) 的谐振波长,单位为 nm。通过测量 FBG 谐振波长的变化,可得到其周围温度的信息。本系统采用的传感器分析仪的波长分辨率为 1 pm,由于 FBG 温度传感器的温度灵敏度大于 10 pm/°C,因此本系统的理论测温误差小于 0.1 °C。完成对 FBG 温度传感器传感参数的标定后,对该系统进行温度传感实验,表 2 为本系统实验数据和热电偶实际测量结果的对比(以 FBG (#31) 为例),由对比结果可知本系统的实际测量误差小于 0.2 °C。

参考标定,该系统的温度测量结果表明其实际测量误差小于 0.2 °C。相较于传统热电偶测温系统,该系统可实现对环境温度的准分布式实时监测,相较于其他 FBG 温度监测系统,该系统的温度测量范围更大,该系统在石油化工、钢铁冶金、航空航天等领域具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Meltz G, Morey W W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1516: 185-199.
- [2] Baker S R, Rourke H N, Baker V, et al. Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1470-1477.

- [3] Liu Y. Research on the low-cost high-temperature FBG sensor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
柳阳. 一种低成本高温 FBG 传感器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [4] Dong L, Liu W F, Reekie L. Negative-index gratings formed by a 193-nm excimer laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(24): 2032-2034.
- [5] Groothoff N, Canning J. Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation [J]. Optics Letters, 2004, 29(20): 2360-2362.
- [6] Archambault J L, Reekie L, Russell P S J. 100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses[J]. Electronics Letters, 1993, 29(5): 453-455.
- [7] Martinez A, Khrushchev I Y, Bennion I. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser [J]. Electronics Letters, 2005, 41(4): 176-178.
- [8] Mihailov S J, Smelser C W, Grobnc D, et al. Bragg gratings written in all-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 94-100.
- [9] Grobnc 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.
- [10] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328009.
廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328009.
- [11] Liu S, Ding L Y, Guo H Y, et al. Thermal stability of drawing-tower grating written in a single mode fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3073-3077.
- [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] Cook K, Smelser C, Canning J, et al. Regenerated femtosecond fibre Bragg gratings [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8351: 835111.
- [14] Cook K, Shao L Y, Canning J. Regeneration and helium: regenerating Bragg gratings in helium-loaded germanosilicate optical fibre [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(12): 1733.
- [15] Gao S R. Study on fiber grating-based novel sensing technologies and high temperature devices [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
高少锐. 基于光纤光栅的新型传感技术和高温器件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [16] Xue Y Z, Wang X F, Luo M M, et al. Review of regenerated fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020007.
薛渊泽, 王学锋, 罗明明, 等. 再生光纤布拉格光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020007.
- [17] Long J. Research on transformer core temperature monitoring method based on fiber Bragg grating sensor [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(6): 11-13.
龙剑. 基于光纤光栅传感器的变压器卷铁心温度监测方法研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(6): 11-13.
- [18] Wang P, Zhao H, Man Y G, et al. Quasi-distributed temperature measurements of stator bars inside a large generators based on fiber Bragg gratings [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(18): 131-136, 187.
王鹏, 赵洪, 满宇光, 等. 大电机定子线棒光纤光栅准分布式测温技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 131-136, 187.
- [19] Xin Y, Liu Z L, Zou J, et al. The application of high temperature long-term real-time monitoring technology in thermal recovery horizontal wells [J]. Offshore Oil, 2019, 39(2): 23-28.
辛野, 刘志龙, 邹剑, 等. 高温长效实时监测技术在热采水平井的应用[J]. 海洋石油, 2019, 39(2): 23-28.
- [20] Ma H C. Research on fire alarm technology based on fiber Bragg grating [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
马赫驰. 基于光纤光栅的感温火灾报警技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [21] Du Y, Si J H, Chen T, et al. Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 100606.
杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 100606.
- [22] Wang H L, Zhang J, Qiao X G, et al. A fiber Bragg grating temperature sensor with high temperature-resistance [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6): 964-966.
王宏亮, 张晶, 乔学光, 等. 一种耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 传感技术学报, 2008, 21(6): 964-966.