

基于再生低反射率光纤光栅和饱和吸收体的高温光纤激光传感研究

赵小丽¹, 张钰民¹, 杨润涛¹, 骆飞^{1,2,3}, 祝连庆^{1,2,3*}

¹北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

²现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192;

³北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192

摘要 针对再生光纤光栅因反射率低而无法直接用于实际工程中温度测量的问题, 提出一种采用光纤激光传感器结合再生低反射率光纤光栅的方法, 将再生光栅作为光纤激光器谐振腔的低反镜, 采用未抽运的掺铒光纤(EDF)作为饱和吸收体, 实现了线宽压缩, 多纵模抑制。激光器输出激光的阈值电流为 68.9 mA。在 150 mA 的电流下, 300~800 °C 温度范围内, 激光器输出激光稳定, 且输出波长与温度呈良好的线性关系。在升降温测试下, 相关系数均为 0.99974, 平均温度灵敏度为 15.41 pm/°C, 且在 700 °C 下, 3 h 的稳定测试中, 激光波长的最大变化量为 0.032 nm, 而强度的最大变化量为 0.409 dB。实验结果表明, 升降温过程中, 信噪比均高于 50 dB, 输出激光具有良好的稳定性, 且没有跳模现象发生。

关键词 光纤光学; 再生光纤光栅; 光纤激光传感; 光纤饱和吸收体; 低反射率; 稳定性

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060605

High-Temperature Fiber Laser Sensing Based on Low-Reflectivity Regenerated Fiber Bragg Grating and Saturable Absorber

Zhao Xiaoli¹, Zhang Yumin¹, Yang Runtao¹, Luo Fei^{1,2,3}, Zhu Lianqing^{1,2,3}

¹Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

²Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China;

³Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract Regenerated fiber Bragg grating (RFBG) cannot be directly used in practical engineering for temperature measurement due to its low reflectivity, so a high-temperature fiber laser sensing method based on low-reflectivity RFBG is proposed. RFBG is used as one mirror of the resonant cavity, and a length of unpumped Er-doped fiber (EDF) as saturated absorber is adopted to compress line width and suppress multi-longitudinal mode of laser. The current threshold of fiber laser is 68.9 mA. At 150 mA, the output laser is stable and has a good linear relationship with temperature when temperature varies in the range of 300 to 800 °C. In the temperature rising and falling test, the correlation coefficient is up to 0.99974, and the average temperature sensitivity is 15.41 pm/°C. During 3 h of laser stability test at 700 °C, the maximum variation of the laser wavelength and intensity is 0.032 nm and

收稿日期: 2017-12-21; 收到修改稿日期: 2017-12-25

基金项目: 北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目(TJSHG201510772016)、北京市优秀人才培养资助项目(2015000020124G074)

作者简介: 赵小丽(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感及光纤激光传感方面的研究。

E-mail: zhaoxiaoli8906@163.com

导师简介: 骆飞(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事光纤激光器与传感器技术方面的研究。

E-mail: feiluomail@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: zhulianqing@sina.com

0.409 dB, respectively. The results show that the signal-to-noise ratio is higher than 50 dB, the output laser is stable, and there is no mode hopping phenomenon in the temperature-rising and temperature-falling process.

Key words fiber optics; regenerated fiber Bragg grating; fiber laser sensing; fiber saturable absorber; low reflectivity; stability

OCIS codes 060.3735; 060.3510; 060.2410; 060.2370

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种性能优良的传感元件,广泛应用于温度、应变、位移等传感器中,具有抗电磁干扰能力强、准确性高、复用性好等优点^[1]。普通的光纤光栅一般只适应于温度低于 200 °C 的环境中^[2],这是由于普通光纤光栅的耐高温性能差,如果长时间工作在高温环境下,光栅的折射率会发生周期性调制,折射率逐渐衰退直至完全消失。光纤的这种特性极大地限制了光纤光栅在高温环境中的应用^[3]。为了在高温领域如航空航天、石油化工、能源开采等应用中进行传感测量,国内外研究人员对高温光纤光栅的特性进行了研究,由于再生光纤光栅具有制作简单、光谱特性好且在高温下光谱不衰退等突出优点,引起了广泛关注^[4]。

2002年,瑞典科学家 Fokine^[5]首次报道了一种通过高温热处理得到的耐高温光纤光栅,取名为化学组分光纤光栅(CCG)。再生光栅可在高温环境下用作温度/应变传感。2016年,Gunawardena等^[6]使用改进的化学气相沉积技术,在氢化镓硅酸盐光纤上刻写种子光栅,并将其作为高温领域的温度传感器,在 25~750 °C 温度范围内,再生光栅的温度灵敏度在升温过程为 15.2 pm/°C,降温过程为 15.0 pm/°C;2017年,Tu等^[7]提出一种基于载氢硼镭共掺光敏光纤生成再生光栅的方法,该方法结合改进的金属化封装形式,基于磁控溅射和电镀相结合的原理,将再生光栅作为高温环境中的应变传感器,该应变传感器在恒定高温达 540 °C 下具有良好的线性度、稳定性和重复性。将热再生光栅用于光纤激光器中作高温传感使用,光纤激光传感系统不仅保留了光纤传感的优势,还融合了光纤激光器的光信噪比高和线宽窄等优点^[8],适合远距离传输,而热再生光栅既可提高光纤激光器的工作温度,也可增加传感灵敏度等。Chen等^[9]将热再生光纤光栅用于耐高温分布式布拉格反射(FBR)激光传感器中,该激光器由两个匹配的再生光纤光栅组成,可在 750 °C 的高温下长期发射激光;Rodriguez-Cobo等^[10]采用紫外激光刻写光纤光栅,退火后将光栅应用于光纤激光器中,该光纤激光器可在高温下得到

窄线宽光谱。两个退火后的光栅构成 FBR 激光传感器,可在 500 °C 的高温环境下稳定工作。但这些方法过程较为复杂,温度灵敏度或测试温度仍可再提升,且 FBR 激光器中使用的两个再生光栅存在不完全匹配的问题,导致输出激光产生的损耗较大。

由于再生光纤光栅存在退火时间长、退火之后的光纤更加脆弱,以及反射率低等问题^[11],其在高温传感领域的应用受到限制。为提高再生光纤光栅的测量温度和温度灵敏度,拓宽低反射率再生光栅在高温领域的应用,避免 FBR 激光器中两个再生光栅不完全匹配的问题,简化实验结构和实验过程,本文采用线形谐振腔结合未抽运的掺铒光纤(EDF)作为饱和吸收体(SA)的方法,使用 244 nm 氩离子激光器,通过 10 mm 的相位掩模板在经过载氢的普通单模光纤上刻写种子光栅,以该光栅经退火后再生的低反射率光栅作为谐振腔低反镜,构成激光传感器,达到激光的选频、稳频以及抑制多模振荡的目的,减小低反射率光栅对传感性能的影响。实验结果表明,该光纤激光的输出具有稳定、信噪比高、无跳模的特点,能在 700 °C 范围内稳定工作。

2 实验装置和原理

实验装置如图 1 所示,本实验采用线形谐振腔结构,7 m 长的掺铒光纤作为增益介质,以 980 nm 的激光二极管(LD)作为抽运源,其峰值波长为 976 nm,通过波分复用器 1(WDM1)进入 EDF1 对其进行抽运。光纤激光器的左侧使用分光比为 50:50 的耦合器,形成一个 Sagnac 环,并在其中插入一段长为 2.5 m 的未抽运的掺铒光纤(EDF2)作为饱和吸收体,形成自诱导的超窄带 FBG。光纤激光器右侧是以一个原始中心波长为 1555.452 nm 的再生低反射率光纤光栅作为低反镜,WDM2 起到滤除 980 nm 抽运光的作用。在谐振腔内加入饱和吸收体,利用介质烧孔效应,实现激光稳定运转,抑制跳模。利用线形腔光纤激光器中谐振腔的一端作为传感单元,温度信号在谐振腔中对再生 FBG 的周期或折射率进行调制,使 FBG 反射峰波长发生漂移,进而使通过 FBG 的反射光发生变化,改变输出激光的中心波长和强度,利用光谱仪(OSA)观察输出激光

光谱信息,测量光纤激光器输出激光的强度和波长的变化,可实现对温度信号的测量。

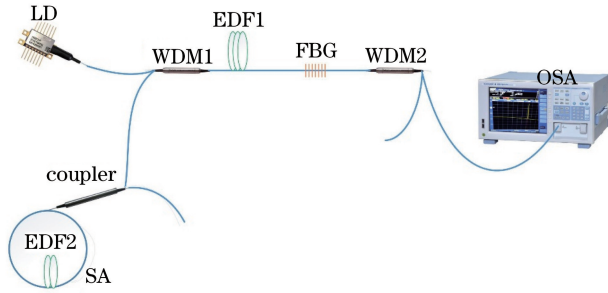


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental device

饱和和吸收体实现压缩线宽、防止跳模以及稳定激光的基本原理为:当抽运光经过 FBG 时,光栅只对与其中心波长相匹配的光进行反射(即为光栅的选频作用),经过 FBG 反射回的光被分光比为 50:50 的耦合器分裂为强度相同方向相反的两束光,将耦合器两端通过一段 EDF2 连接,构成 Sagnac 回路。分裂形成的两束光随后在未抽运 EDF2 中对向传输并发生干涉,形成驻波。由于在没有抽运光的情况下,未抽运 EDF2 中的 Er^{3+} 对信号光产生强烈的饱和和吸收效应,吸收系数沿光纤轴向发生周期性的改变,在波峰处,吸收系数小,而在波谷处,吸收系数大,形成空间烧孔效应。此时干涉光在谐振腔内形成的驻波场会使腔内损耗发生周期性变化,从而使饱和吸收体的折射率沿光纤轴向发生微弱的周期性变化,这种折射率的周期性变化所导致的结果类似于在饱和吸收体内形成一种自写入的超窄带光栅滤波效应,其功能是对腔内运行的振荡激光进行带宽更窄的选频,同时起到稳频的作用。这种自写入光纤光栅长度很长(本文为 2.5 m),导致峰值反射率很大,而反射带宽很小,并且反射中心波长具有自适应特性,因此可以有效地抑制跳模的产生。当这种自写入光栅的带宽小于激光的两个相邻纵模间隔时,仅有一个纵模可以形成稳定振荡,从而实现激光的稳定输出^[12-15]。

线形腔纵模间隔可表示为

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nL}, \quad (1)$$

式中: c 为光在真空中的传播速度; n 为谐振腔的折射率; L 为等效谐振腔长度。实验中等效谐振腔长 $L=7$ m,取 $n=1.45$ 。经计算得,纵模的模式间隔约为 14.8 MHz。

自写入的等效光纤光栅带宽 Δf 可以表示为^[12,16]

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda} \kappa \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (2)$$

式中: Δn 为 EDF2 的折射率调制深度; λ 为等效光栅的中心波长; n_{eff} 为 EDF2 的有效折射率; $\kappa=2\Delta n/n_{\text{eff}}\lambda$,为自写入等效光栅的耦合系数; $N=L_g/\Lambda$,为自写入等效光栅形成的周期数, $\Lambda=\lambda/2n_{\text{eff}}$ 为自写入等效光栅的周期, L_g 为自写入形成的等效光栅的长度,即未抽运掺铒光纤(EDF2)的长度。当 $L_g=2.5$ m, $\lambda\approx 1555$ nm, $n_{\text{eff}}=1.45$, $\Delta n\approx 3\times 10^{-7}$ 时, Δf 约为 12.2 MHz,而线形腔的纵模间隔约为 14.8 MHz,线形腔的纵模间隔大于自写入等效光栅的带宽,故而可在一定程度上抑制跳模现象的发生,从而实现激光的稳定输出。

由于光栅用的是输出型低反射率光栅,可以从输出光栅的一端直接输出激光。激光传感器实验装置实物图如图 2 所示。

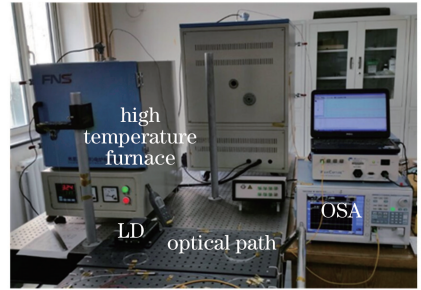


图 2 实验装置实物图

Fig. 2 Photo of experimental device

实验中所使用的种子光栅由氩离子激光器刻写,光纤型号是康宁 SMF-28e,光谱仪(OSA)型号为 YOKOGAWA 公司的 AQ6370D,分辨率为 0.02 nm,波长扫描范围为 600~1700 nm。

为测试光纤激光传感器中作为谐振腔低反镜的光纤光栅在高温下对输出激光的影响,进行如下实验:常温下,改变激光器的驱动电流,观察光谱仪输出,得到激光器的阈值电流为 68.9 mA,将激光谐振腔中的种子光栅水平自由地放入高温马弗炉中,在炉内中心位置放置一个热电偶,用于监测炉内实际温度。半小时内将温度升至 900 °C,稳定一段时间,在此过程中种子光栅退化并被完全擦除后再生。

由于激光传感器使用再生光栅作为温度敏感元件,故其输出激光的中心波长随温度变化而变化。为了观察输出激光波长在 300~800 °C 温度范围内随温度的变化情况,将抽运激光器的驱动电流固定为 150 mA,改变高温马弗炉的温度,由光谱仪观察输出激光光谱信息,每隔 100 °C 设定一个恒温点,每

个恒温点保持 50 min, 在温度稳定后的每 5 min 记录 1 次数据, 记录 10 次之后改变温度。对每个温度下, 所采集的 10 组数据的中心波长取平均值并进行拟合。

3 实验结果与分析

实验中所使用种子光栅的光谱图如图 3 所示, 光栅的栅区长度为 10 mm, 透射谱深度为 30.25 dB, 中心波长为 1555.452 nm。

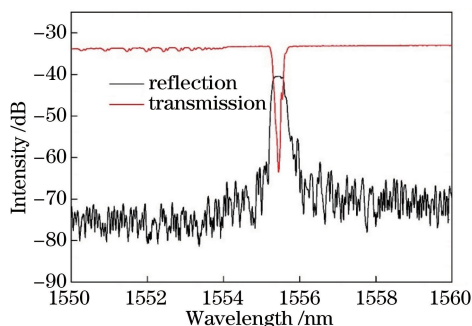
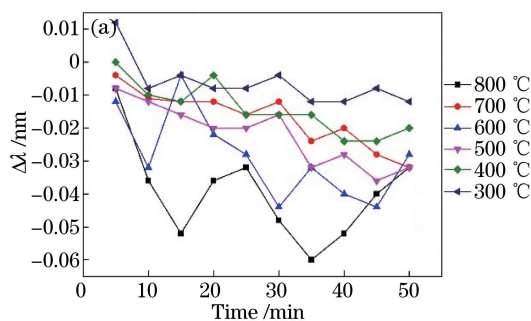


图 3 实验所用种子光栅反射谱和透射谱

Fig. 3 Reflection and transmission spectra of seed grating used in the experiment



900 °C 高温再生光栅的透射谱如图 4 所示, 透射谱深度为 1.3 dB, 反射率为 25.87%, 3dB 带宽约为 0.324 nm, 由图 4 可见, 高温退火后的再生光栅反射率较低。

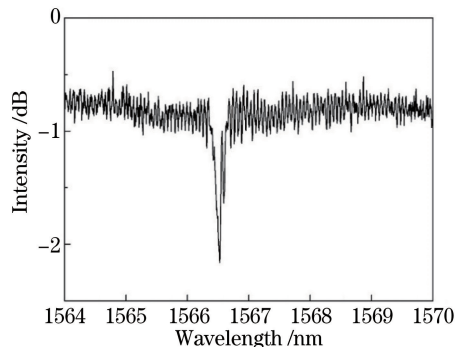


图 4 900 °C 高温下再生光栅的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of regenerated grating at 900 °C

为测试输出激光在 300~800 °C 温度范围内中心波长的稳定性, 在每个温度点测试的 10 组数据中, 以温度改变的初始点为参考, 计算每个温度点的波长改变值, 结果如图 5 所示。

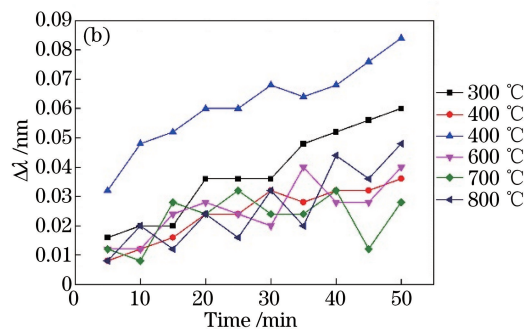


图 5 升降温过程中中心波长的变化量。(a)降温;(b)升温

Fig. 5 Variation of central wavelength during the temperature rising and falling processes. (a) Cooling; (b) heating

实验结果表明, 升降温过程中, 在 50 min 的测试时间内, 每组数据的中心波长变化量在降温过程中最大为 0.060 nm; 在升温过程中最大为 0.084 nm。在不同温度下, 中心波长的变化量浮动很小, 表明输出激光具有良好的波长稳定性。

为得到输出波长与温度变化之间的对应关系, 并求得相应的温度灵敏度系数, 在实验过程中, 忽略光栅在温度变化时所受应力。由于温度变化时, 热膨胀系数以及热光系数都会对光栅的中心波长产生影响。材料一定时, 可认为整个光栅部分在实验过程中, 所受的温度分布是均匀的, 因此热膨胀系数几乎不变, 而热光系数随温度变化而不同, 热光系数越大, 波长变化越大, 温度灵敏度越高。由于普通裸光

栅一般不适用于高温环境中, 而再生光纤光栅可用在 300 °C 以上的高温区域, 因此该高温区域的热光系数高于 300 °C 以下的温度区域^[17]。由于本文将再生光栅用于 300~800 °C 的高温环境中进行测量, 因此高温条件下得到光栅的温度灵敏度系数较高。

对各温度下所采集的 10 组数据的中心波长取平均值并与温度进行线性拟合, 由实验数据所得温度灵敏度系数符合上述对高温条件下再生光栅灵敏度较高的理论分析。且输出波长与温度呈良好的线性关系, 如图 6 所示。从图 6 可看出, 降温过程中波长的拟合直线为 $y = 0.01536x + 1552.523$, 温度灵敏度为 15.36 pm/°C; 升温过程拟合直线为 $y = 0.01546x + 1552.399$, 温度灵敏度为 15.46 pm/°C。

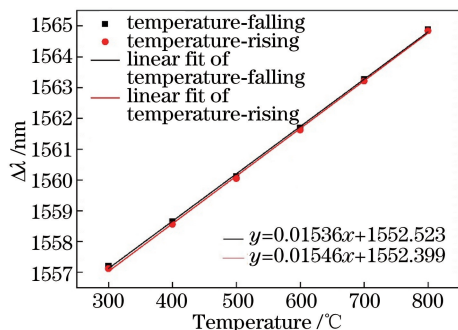


图6 平均中心波长随温度的变化

Fig. 6 Average central wavelength versus temperature

升降温过程中,其相关系数均为0.99974。可见激光器输出波长与温度具有良好的线性关系。且由图6可知,升温 and 降温过程中未观察到迟滞现象。

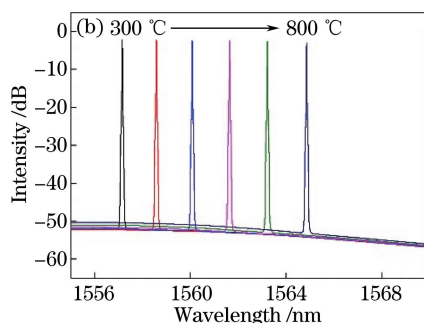
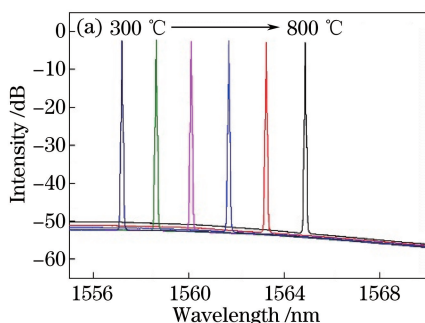
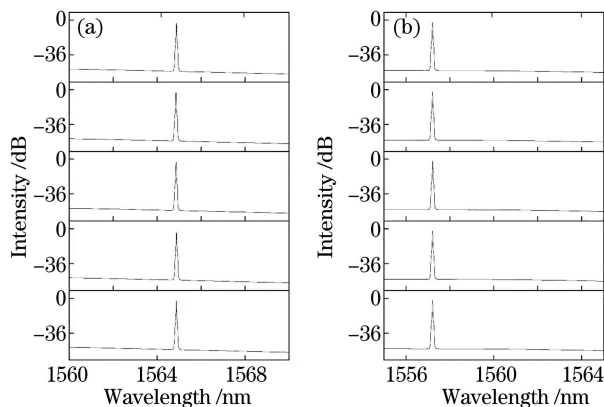


图7 输出激光强度随中心波长的变化。(a)降温过程;(b)升温过程

Fig. 7 Change of output laser intensity with central wavelength. (a) Cooling process; (b) heating process

从图7(a)可知,随着温度的降低,输出激光的中心波长往短波方向漂移。从图7(b)可以看出,随着温度的升高,输出激光的中心波长往长波方向移动。升降温过程中,输出激光强度随温度变化基本保持稳定,在整个测温范围内信噪比均大于50 dB,输出激光稳定,且无跳模现象。

分别选取升降温过程中的300°C和800°C采集



的数据,绘制LD在输入电流为150 mA下,输出激光的中心波长随时间的变化,如图8所示。

从图8可以看出,在同一个温度下,激光强度和中心波长随时间变化极小,具有良好的强度稳定性。从图8(a)和8(b)中可以看出,随温度的降低,中心波长蓝移,而强度稳定性良好。由图8(c)和8(d)可以看出,升温过程中,激光强度稳定性良好,中心波

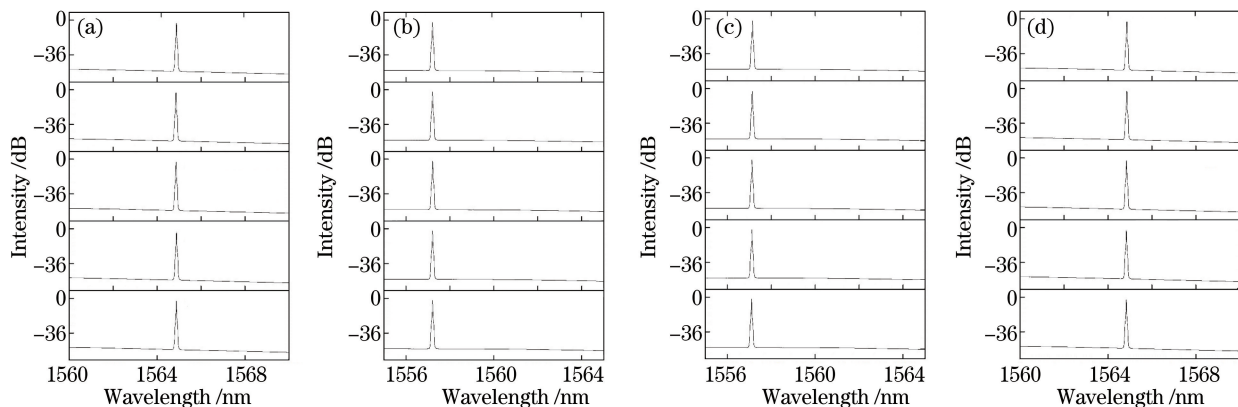


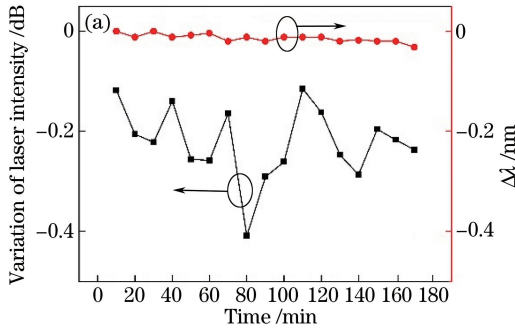
图8 输入电流为150 mA时升降温过程中强度随波长的变化。(a)降温800°C;(b)降温300°C;(c)升温300°C;(d)升温800°C

Fig. 8 Evolution of intensity with wavelength in temperature rising and falling processes under input current of 150 mA.

(a) Cooling to 800 °C ; (b) cooling to 800 °C ; (c) heating to 300 °C ; (d) heating to 800 °C

长红移,输出激光稳定。分别对比图 8(a)和图 8(d)以及图 8(b)和图 8(c)可见,在升温 and 降温过程中的同一个温度下,激光的中心波长和强度几乎不变,该实验具有良好的重复性。

为验证在长时间高温环境下输出激光的稳定特性,将高温炉设定为 700 °C,待温度稳定后进行 3 h 的数据采集,以初始强度的峰值作为参考,将之后采集数据中的强度峰值与之作差,得到在高温 700 °C



下,3 h 的稳定性测试中,输出激光强度和中心波长的变化,如图 9 所示。其中图 9(a)表明,在 700 °C 长时间测试下,输出激光强度的最大变化量为 0.409 dB,而中心波长的最大变化量为 0.032 nm。从图 9(b)可以看出,随着时间的变化,输出激光强度与波长具有良好的稳定性,且无模式跳变现象发生。实验表明在 700 °C 的高温环境下,基于饱和吸收体的掺铒光纤激光器具有良好的稳定性。

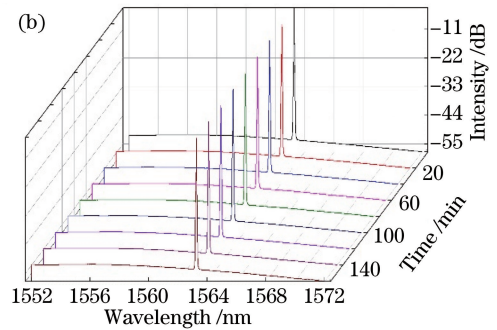


图 9 700 °C 长时间测试下,激光强度与中心波长的变化。(a)激光强度与中心波长变化量;(b)不同时间下激光输出光谱图

Fig. 9 Change of laser intensity and central wavelength tested for a long time under 700 °C.

(a) Variation of laser intensity and central wavelength; (b) output spectra of laser under different time

图 9 显示了激光强度与中心波长随时间的变化量曲线,文献[9]虽然得到了强度约 50 dB 的激光输出,但其对于输出激光中心波长随时间变化的规律并未给出具体数值;相比于文献[10],本文测温范围高于文献[10]所提及的 500 °C 稳定工作温度。

4 结 论

采用线形腔结构,结合低反射率再生光栅和饱和吸收体的共同作用,通过对再生 FBG 进行升降温实验,观察由于温度改变而导致的光栅光谱的变化对输出激光的影响,用于分析本激光传感器的性能。实验结果表明,在 300~800 °C 的温度范围内,升降温过程中的相关系数均为 0.99974,平均温度灵敏度为 15.41 pm/°C。且随温度的升高,输出激光的中心波长表现为红移;温度降低,中心波长蓝移。在 700 °C 的长时间稳定性测试中,得到高信噪比,无模式跳变且强度稳定的激光输出。实验表明,该激光型传感器具有良好的传感性能,可在 700 °C 温度范围内作为性能良好的温度传感器使用。不足之处在于输出激光的信噪比还可以进一步提高,后续可通过改善腔体结构以及优化两段 EDF 长度等方法来提高输出激光信噪比。

参 考 文 献

[1] Wang J Y, Tong Z R, Cao Y, *et al.* The current

research and application for optical fiber grating laser sensor [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(4): 19-21.

王洁玉, 童峥嵘, 曹晔, 等. 光纤光栅激光传感器的研究现状及其应用[J]. *光通信技术*, 2012, 36(4): 19-21.

[2] Xia J J, Li F. Fabrication of high-temperature-resistant fiber grating sensor by femtosecond laser [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2016, 38(2): 200-203.

夏巨江, 李芳. 飞秒激光耐高温光纤光栅传感器的制备[J]. *武汉工程大学学报*, 2016, 38(2): 200-203.

[3] Nie M, Zhang D S, Wu M Q, *et al.* Growth law of high temperature resistance regenerated fiber grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050601.

聂铭, 张东生, 吴梦绮, 等. 耐高温再生光纤光栅的生长规律[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050601.

[4] Fan L J, Li Y Q, Yao G Z. Optical fiber grating laser sensor and its research progress [J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(1): 37-40.

范利净, 李永倩, 姚国珍. 光纤光栅激光传感器与其研究进展[J]. *光通信技术*, 2017, 41(1): 37-40.

[5] 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.
- [6] Gunawardena D S, Mat-Sharif K A, Lai M, *et al.* Thermal activation of regenerated grating in hydrogenated gallosilicate fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(6): 1659-1664.
- [7] Tu Y, Ye L, Zhou S P, *et al.* An improved metal-packaged strain sensor based on a regenerated fiber Bragg grating in hydrogen-loaded boron-germanium Co-doped photosensitive fiber for high-temperature applications[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 431.
- [8] Pei L, Weng S J, Wu L Y, *et al.* Progress in optical fiber laser sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0700001.
裴丽, 翁思俊, 吴良英, 等. 光纤激光传感系统的研究进展[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0700001.
- [9] Chen R, Yan A, Li M, *et al.* High-temperature-resistant distributed Bragg reflector fiber laser based on thermally regenerated gratings [C] // *CLEO: Science and Innovations*. 2013: 14393549.
- [10] Rodriguez-Cobo L, Lopez-Higuera J M. SLM fiber laser stabilized at high temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 693-696.
- [11] Yang Z C, Xu H F, Dong X Y. Research development of high-temperature resistant fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050003.
杨樟成, 徐汉锋, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050003.
- [12] Zhang Y M, Zhu L Q. Study on frequency stabilization of low threshold fiber laser[J] *Laser and Infrared*, 2014, 44(8): 884-887.
张荫民, 祝连庆. 低阈值光纤激光器稳频特性研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(8): 884-887.
- [13] Yang R T, Zhu L Q, Zhang Y M, *et al.* Strain sensing characteristics of fiber laser based on saturable absorption frequency stabilization technology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(3): 201-205.
杨润涛, 祝连庆, 张钰民, 等. 基于可饱和吸收稳频技术的光纤激光应变传感特性研究[J]. *纳米技术与精密工程*, 2016, 14(3): 201-205.
- [14] He X, Fang X, Liao C, *et al.* A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser with a simple linear cavity [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21773-21781.
- [15] Jiao M X, King J H, Tong C W, *et al.* Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode Erbium-doped fiber ring lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602013.
- [16] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.
- [17] Wang T. Research on fabrication and property of high temperature regenerated grating [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
王涛. 高温再生光纤光栅的制作与性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [18] Zhang J, Sun H, Rong Q Z, *et al.* High-temperature sensor using a Fabry-Perot interferometer based on solid-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(7): 070607.
- [19] Chen R, Yan A, Li M, *et al.* Regenerated distributed Bragg reflector fiber lasers for high-temperature operation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2490-2492.
- [20] Yang H Z, Qiao X G, Das S, *et al.* Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 °C using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6438-6441.
- [21] Alqarni S A, Bernier M, Smelser C W. Annealing of high-temperature stable hydrogen loaded fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 939-942.
- [22] Richter A. Modeling and design of DBR fiber lasers for sensor applications [C]. *SPIE*, 2017, 10098: 100980W.
- [23] Tsuda H. Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2349-2351.
- [24] Barrera D, Finazzi V, Villatoro J, *et al.* Performance of a high-temperature sensor based on regenerated fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2011, 7753: 775381.
- [25] Yang X X, Zhan L, Shen Q S, *et al.* High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-Perot resonator and a saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(11): 879-881.
- [26] Canning J, Cook K, Shao L Y. Regeneration and helium: regenerating Bragg gratings in helium-loaded

- germanosilicate optical fibre [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(12): 1733-1742.
- [27] Foster S, Cranch G, Harrison J, *et al.* Distributed feedback fiber laser strain sensor technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3514-3530.
- [28] Khaleel W A, Aljanabi A H M. High-sensitivity sucrose erbium-doped fiber ring laser sensor [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 026116.
- [29] Li F, He J, Xu T W, *et al.* Fiber laser sensing technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1025-1032.
李芳, 何俊, 徐团伟, 等. 光纤激光传感技术及其应用 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1025-1032.
- [30] 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.
- [31] Guan B O, Zhang Y, Wang H J, *et al.* High-temperature-resistant distributed Bragg reflector fiber laser written in Er/Yb co-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 2958-2964.
- [32] 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.
- [33] Zhan Y G, Xiang S Q, He H, *et al.* Study on high temperature optical fiber grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1235-1238.
詹亚歌, 向世清, 何红, 等. 光纤光栅高温传感器的研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1235-1238.