

光纤布拉格光栅再生过程及模型研究

王巧妮¹ 杨远洪^{1,2} 何 俊³ 王义平³

¹北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

²北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

³深圳大学光电工程学院, 深圳市物联网光子器件与传感系统重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 分别采用800 nm飞秒激光、244 nm氩离子激光, 基于相位掩模板法在载氢和非载氢光纤上制备了飞秒载氢、非载氢布拉格光栅及紫外载氢光纤布拉格光栅。对制作的3种光栅进行高温热处理实验, 均观察到光栅再生现象。对比了不同热处理温度下的光栅再生时间, 建立了光栅再生过程模型以及处理温度-再生时间模型, 并定义了光栅再生处理温度阈值。实验和模型研究表明, 刻写的飞秒非载氢光栅、飞秒载氢光栅及紫外载氢光栅的再生处理温度阈值分别为888 ℃、780 ℃和770 ℃。载氢再生光栅在高温下有衰退现象, 飞秒非载氢再生光栅具有良好的温度稳定性。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 再生光栅; 再生过程模型

中文分类号 TP253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0306001

Study of Fiber Bragg Grating Regeneration Process and Regeneration Model

Wang Qiaoni¹ Yang Yuanhong^{1,2} He Jun³ Wang Yiping³

¹Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing, 100191, China

²National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing, 100191, China

³Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Fiber Bragg gratings (FBGs) are inscribed in both H₂-loaded and H₂-free fiber using 800 nm femtosecond laser, 244 nm Ar⁺ laser and a phase mask. The regeneration of three kinds of FBGs is observed in different processing temperatures. The models of regeneration process as well as regeneration temperature versus time are established. The FBGs regeneration temperature thresholds are defined. Experimental results and model analysis show that the regeneration temperature thresholds of femtosecond FBG written in H₂-free fiber, femtosecond FBG written in H₂-free fiber and ultraviolet (UV) FBG in H₂-loaded fiber are around 888 ℃, 780 ℃ and 770 ℃, respectively. The regenerated FBGs in H₂-loaded fiber decay in case of high temperature, while regenerated femtosecond FBG in H₂-free fiber has well temperature stability.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; regenerated grating; regeneration model

OCIS codes 060.3735; 220.4610; 220.4880

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBGs)具有体积小、抗电磁干扰、适合在极端恶劣环境下传感使用等优点^[1-4]。航空航天、石油电力、发动机等领域对超高温环境的传感器有着迫切的需求。适合高温环境的传感研究主要有II

收稿日期: 2015-9-2; 收到修改稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 王巧妮(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: sy1317123@buaa.edu.cn

导师简介: 杨远洪(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn (通信联系人)

型光栅^[1,5]、蓝宝石光栅^[6]、再生光栅等^[7]。再生光栅可通过对I型光纤布拉格光栅进行高温热处理获得,所得的再生光栅最高能耐受1400℃的高温^[8],制作过程简单、成本低,是一种可实用化的技术。

国内外研究者对再生光栅及其形成机理开展了大量研究^[9-16]。2002年,Fokine等^[10]做出了第1只再生光栅。2009年,Canning等^[17]在高掺锗细芯载氢光纤上制作出了透射深度为18 dB的再生强光栅,其选用的处理温度为950℃。同年,Lindner等^[18]将高掺锗紫外非载氢光纤光栅置于700℃恒温下热处理150 min,获得了74%反射率的紫外非载氢再生光栅。2010年,Bandyopadhyay等^[13]在载氢标准通信光纤上制作出了反射率约为35%的紫外载氢再生光栅,热处理温度为935℃。2012年,Cook等^[19]对飞秒载氢光纤光栅进行1000℃高温退火,得到了反射率为8%的飞秒载氢再生光栅。不同研究者对光栅的热处理温度不同,温度在500℃~1000℃之间,热处理时间也有所不同^[20]。再生光栅的反射率与I型布拉格光栅的反射率、光纤的数值孔径、载氢增敏情况以及热处理过程有关,I型布拉格光栅的反射率越大,再生所得光栅越强^[15]。再生现象可以发生在载氢或非载氢的光纤上,载氢可以显著提高光栅再生效率^[21]。

本文在Corning SMF-28光纤上制备了I型飞秒载氢光栅(fs-H₂ FBG)、飞秒非载氢光栅(fs FBG)及紫外载氢光栅(UV-H₂ FBG)。对3种光栅进行高温热处理实验,对比研究了光栅的再生时间与处理温度之间的关系,建立了不同光栅的再生过程模型,确定了光栅再生处理温度阈值,并分析了不同类型的再生光栅的热稳定性,为高温光纤光栅的实用化提供了理论和应用依据。

2 I型光纤布拉格光栅的制备过程

图1为基于相位掩模板法的光纤光栅制备系统装置图,激光经过半波片及起偏器调节功率后经过柱透镜到达相位掩模板,产生+1和-1级的衍射光,两束衍射光在重叠区域发生干涉,作用于光纤纤芯,形成光纤布拉格光栅。所用的红外飞秒激光器的激光波长为800 nm,脉宽为100 fs,重复率为1 kHz;紫外(UV)氩离子激光器的工作波长为244 nm。光栅光纤为Corning SMF-28型,部分光纤被载氢处理,即将光纤放入10 MPa、80℃的氢气反应釜中保存7天,使氢气渗入光纤中,起到增加光敏性的作用。用飞秒激光制备I型光栅时所用的激光功率密度为 1.5×10^{12} W/cm²,小于光纤损伤阈值,紫外载氢光栅采用通用参数刻写。图2为刻写的3种光栅样品的典型透射和反射光谱,用飞秒激光刻写的光栅反射率高,谱宽较宽;紫外载氢光栅技术指标与大部分商用光栅指标一致。

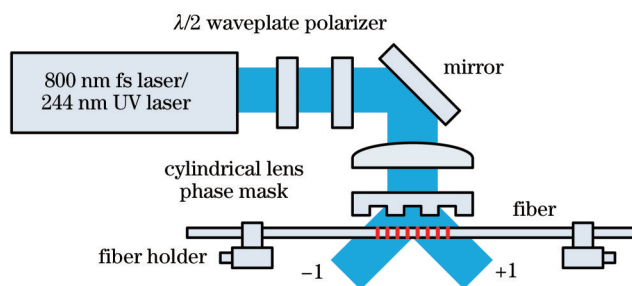


图1 光纤布拉格光栅刻写系统
Fig.1 Schematic diagram of FBG fabrication system

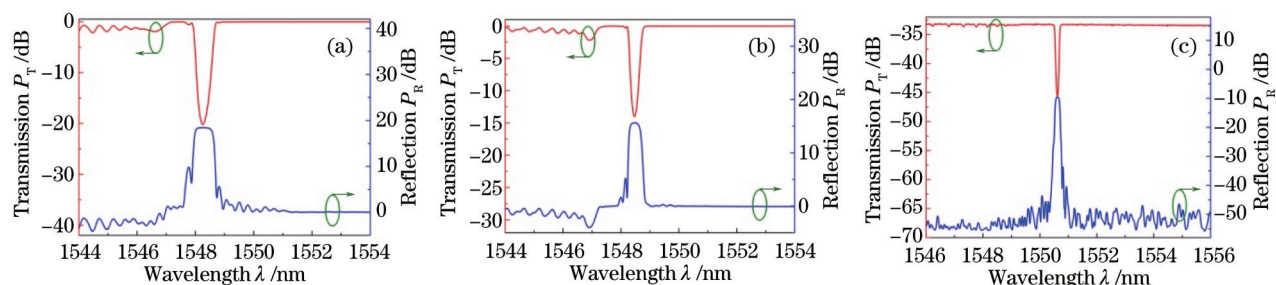


图2 典型的光纤光栅反射光谱及透射光谱。(a) 飞秒非载氢光栅;(b) 飞秒载氢光栅;(c) 紫外载氢光栅
Fig.2 Reflection and transmission spectra of typical FBG.(a) fs FBG;(b) fs-H₂ FBG;(c) UV-H₂ FB

3 光纤布拉格光栅高温再生特性实验研究

为了研究光纤布拉格光栅的再生特性,对刻写的3种光栅进行了高温处理实验。实验装置如图3所示,由卧式高温炉、光栅解调仪组成。卧式管式高温炉的最高工作温度为1200℃,高温炉中间嵌入一个K型热电偶来监测炉内实际温度。光栅水平松弛地放入管式高温炉中,光栅区域置于中间恒温段。采用Micron Optics sm125光栅解调仪来实时测量光纤光栅的反射、透射光谱及中心波长数据,波长测试范围为1510~1590 nm,精度为1 pm。光纤光栅的反射率采用透射谱法进行计算^[22]。实验时,对每一种光栅,选取4根样品分别在4个处理温度点进行实验,实验温度范围为700℃~1000℃。光纤光栅样品的基本参数如表1所示。

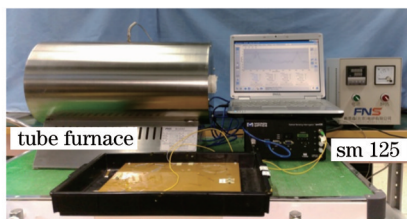


图3 实验装置

Fig.3 Experimental setup for FBG anneal process

表1 光纤光栅样品参数

Table 1 Parameters of fiber Bragg grating sample

| FBG type | No. | Resonance wavelength λ /nm | Reflectivity R /% |
|-----------------------|-----|------------------------------------|---------------------|
| fs-H ₂ FBG | 1-1 | 1548.775 | 99.11 |
| | 1-2 | 1548.133 | 93.83 |
| | 1-3 | 1548.315 | 93.07 |
| | 1-4 | 1548.383 | 96.44 |
| fs FBG | 2-1 | 1548.390 | 99.11 |
| | 2-2 | 1547.940 | 99.36 |
| | 2-3 | 1548.122 | 99.71 |
| | 2-4 | 1547.905 | 98.88 |
| UV-H ₂ FBG | 3-1 | 1550.620 | 93.69 |
| | 3-2 | 1552.010 | 87.61 |
| | 3-3 | 1550.315 | 89.84 |
| | 3-4 | 1550.670 | 92.47 |

3.1 飞秒载氢光栅再生特性研究

分别将4根飞秒载氢光栅置于管式高温炉中,分别在700℃、800℃、850℃和950℃进行高温处理实验。每次实验时,炉温直接升到设定温度,然后保持温度恒定,在升温和恒温过程中,连续测量光栅光谱。实验结果如图4所示,图中第1条竖直的虚线为恒温起始的时刻,第2条竖直的虚线为光栅再生转换的时刻 t_0 ,第3条代表再生光栅反射峰值功率达到饱和或最大值的时刻 t_1 。如图4(a)所示,光栅在700℃恒温保持2520.0 min,反射峰值功率一直缓慢减小,但无再生现象产生。可能是700℃并未到达红外飞秒载氢光栅的再生处理温度阈值。如图4(b)所示,飞秒载氢光栅在800℃恒温300.0 min时被擦除,随后出现再生现象,光栅逐渐生长并趋于饱和,在1440.0 min后达到光栅反射峰值的饱和值并趋于稳定。图4(c)为飞秒载氢光栅在850℃热处理的结果,光栅在23.4 min时被完全擦除,167.8 min时再生光栅反射峰值功率达到最大值,反射率为3.5%,然后缓慢衰退。飞秒载氢光栅在950℃恒温下,完成光栅再生的时间更短,如图4(d)所示,在3.4 min时光栅被擦除,26.5 min时完成光栅再生,随之光栅缓慢衰退。可见,当温度不小于800℃时,飞秒载氢光栅能够发生再生现象,温度越高,光栅产生再生现象所需的时间越短。飞秒载氢再生光栅的热稳定性一般,光栅再生后有衰退现象,图4(c)和(d)所示情况,反射率分别减少了0.7%和0.9%,波长变化量分别为0.08 nm和0.09 nm。

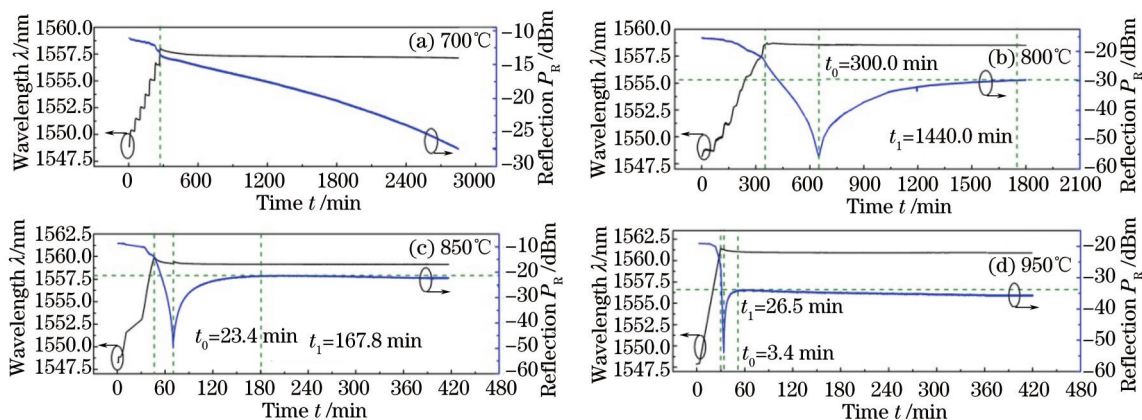


图4 飞秒载氢光栅在不同处理温度下的中心波长及反射峰值功率变化曲线。(a)700 °C; (b) 800 °C; (c) 850 °C; (d) 950 °C
Fig.4 Changing curves of the center wavelength and reflected peak power of fs-H₂ FBG at different processing temperatures. (a) 700 °C; (b) 800 °C; (c) 850 °C; (d) 950 °C

3.2 飞秒非载氢光栅再生特性研究

取4根飞秒非载氢光栅分别在800 °C、900 °C、950 °C及1000 °C高温环境下进行热处理实验,实验结果如图5所示。

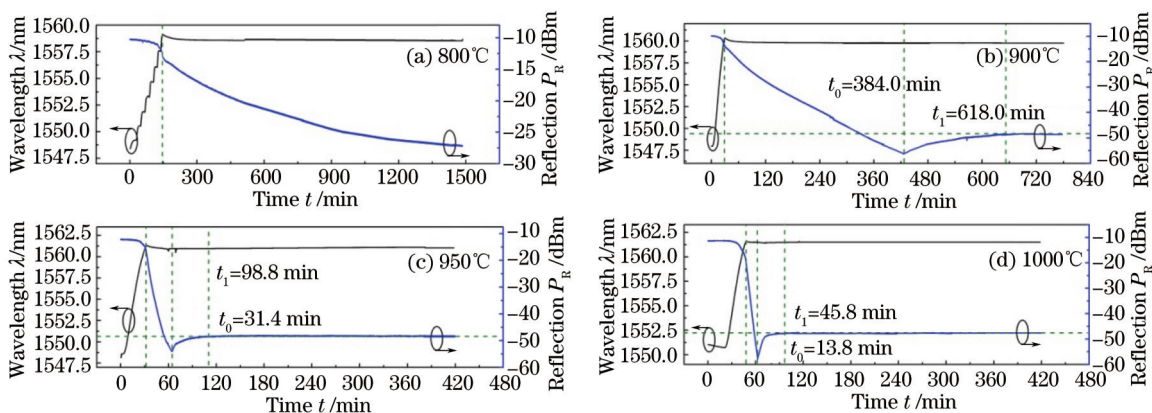


图5 飞秒非载氢光栅在不同处理温度下的中心波长及反射峰值功率变化曲线。(a)800 °C; (b)900 °C; (c)950 °C; (d)1000 °C
Fig. 5 Changing curves of the center wavelength and reflected peak power of fs FBG at different processing temperatures. (a) 800 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

如图5(a)所示,800 °C,1320.0 min的恒温处理过程中,飞秒非载氢光栅的反射峰值功率一直减小并趋于稳定,表明800 °C未达到飞秒非载氢光栅的再生处理温度阈值。如图5(b)所示,飞秒非载氢光栅在900 °C恒温384.0 min后光栅被擦除,即达到光栅再生转换点,随之出现再生现象。当热处理温度为950 °C时,如图5(c)所示,光栅完成再生需94.8 min,光栅再生后,其反射峰值功率和反射波长基本不变。如图5(d)所示,热处

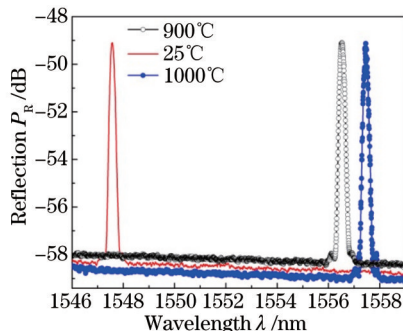


图6 飞秒非载氢光栅再生后、冷却至室温及再次加热至1000 °C的反射光谱图

Fig.6 Reflection spectra of regenerated fs FBG at 900 °C, cooling down to room temperature and reheating at 1000 °C

理温度为 1000 ℃时,光栅完成再生只需 45.8 min。飞秒非载氢光栅再生后基本无衰退现象,热稳定性好。将在 900 ℃热处理温度下制成的飞秒非载氢再生光栅自然冷却至室温后,再次加热至 1000 ℃保持 10 min。如图 6 所示,飞秒非载氢再生光栅再生后、冷却至室温以及再次加热至 1000 ℃下的反射光谱基本没有变化,具有良好的温度特性。

3.3 紫外载氢光栅再生特性研究

取 4 根紫外载氢光栅分别在 800 ℃、850 ℃、900 ℃及 1000 ℃高温环境下进行热处理实验,实验结果如图 7 所示。如图 7(a)所示,光栅在 800 ℃,324.0 min 时到达光栅再生转换点,随之发生光栅再生现象,在 1398.0 min 时达到再生光栅反射峰值功率的饱和点。如图 7(b)所示,光栅在 850 ℃,87.0 min 时淹没于光栅反射背景噪声中,在 373.0 min 时完成光栅再生。如图 7(c)所示,光栅在 900 ℃,22 min 时被完全擦除,110.4 min 时再生光栅反射峰值功率达到最大值,随后,紫外载氢再生光栅逐渐衰减。如图 7(d)所示,光栅在 1000 ℃,0.2 min 时被擦除,随之发生光栅再生现象,2.9 min 时光栅再生完毕。紫外载氢再生光栅在 1000 ℃环境下缓慢衰减。4 种处理温度下,紫外载氢光栅均能发生再生现象,且热处理温度越高,光栅完成再生的时间越短。紫外载氢光栅再生后有衰退现象,图 7(c)和(d)所示情况,反射率分别减小了 4.8%和 12.7%,波长变化量分别为 0.05nm 和 0.10 nm。

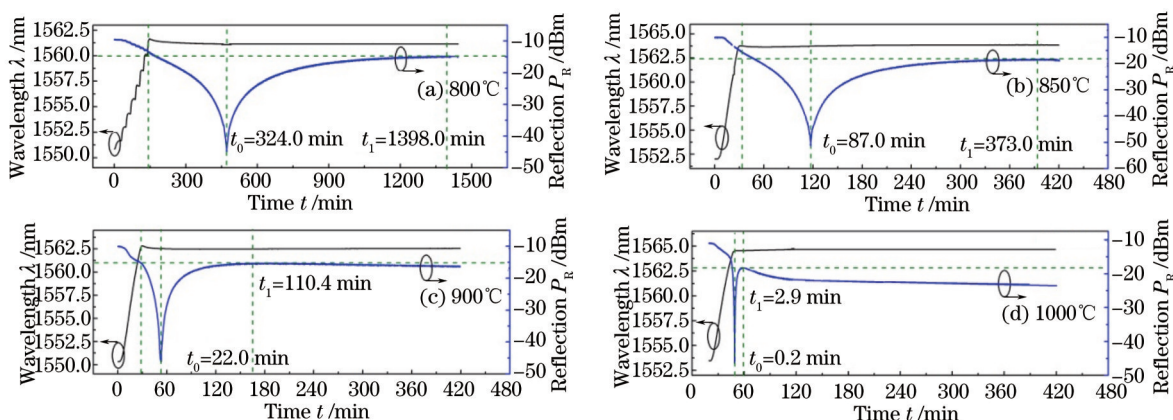


图 7 紫外载氢光栅在不同处理温度下的中心波长及反射峰值功率变化曲线。(a) 800 ℃; (b) 850 ℃; (c) 900 ℃; (d) 1000 ℃

Fig.7 Changing curves of the center wavelength and reflected peak power of UV- H₂ FBG at different processing temperatures.

(a) 800 ℃; (b) 850 ℃; (c) 900 ℃; (d) 1000 ℃

4 光纤布拉格光栅再生模型研究

4.1 光纤布拉格光栅再生过程模型研究

光栅高温衰退是折射率调制深度 Δn 衰退的表现, Δn 符合幂定律单指数衰减模型^[22-23]:

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 \cdot [\exp(t/\tau_0 + a_0)], 0 \leq t < t_0, \quad (1)$$

式中 Δn_0 为初始折射率调制深度, τ_0 为衰减系数, a_0 为模型参数。光栅到达再生转换点 t_0 时刻后迅速再生, 在 t_1 时光栅完成再生。光栅再生前后的反射峰值功率-时间曲线类型趋势相似, 因此, 可以认为再生过程光栅的 Δn 也符合指数模型, 得到

$$\Delta n(t) = \Delta n_1 \cdot \{1 - \exp[-(t - t_0)/\tau_1] + a_1\}, t_0 \leq t < t_1, \quad (2)$$

式中 Δn_1 为光栅完成再生后的折射率调制深度, τ_1 为再生系数, a_1 为模型参数。光栅反射率 R 的理论公式为^[24]:

$$R = \tanh^2\left(\frac{\pi L}{\lambda_B} \Delta n\right). \quad (3)$$

可计算得到光栅反射峰值功率 P_r , 单位为 dBm:

$$P_r = 10 \log(RP_0), \quad (4)$$

式中 P_0 为光栅的输入功率, 单位为 mW。联立(1)~(4)式, 可得到高温恒温过程中光栅再生过程的反射峰值功率 $P_r(t)$ 随时间变化的模型:

$$P_R(t) = \begin{cases} 10 \log \left\{ P_0 \tanh^2 \left\{ \frac{\pi L}{\lambda_B} \Delta n_0 [\exp(-t/\tau_0) + a_0] \right\} \right\}, & 0 \leq t < t_0 \\ 10 \log \left\{ P_0 \tanh^2 \left\{ \frac{\pi L}{\lambda_B} \Delta n_1 \{1 - \exp[-(-t - t_0)/\tau_1] + a_1\} \right\} \right\}, & t_0 \leq t \leq t_1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 L 为光栅栅区长度, λ_B 为光栅中心波长。基于 Matlab 平台编写程序分别对 3 种光栅的再生过程数据进行拟合, 可获得再生过程模型的参数, 如表 2 所列, 曲线拟合结果如图 8 所示。图中实线为光栅反射峰值功率随时间变化的实测曲线, 虚线为根据再生过程模型拟合的曲线。拟合结果表明, (5) 式模型能很好地描述不同类型光栅的再生过程。

表 2 光栅再生过程模型拟合参数表

Table 2 Regeneration process models parameters of FBGs

| FBG type | Anneal temperature T_r (°C) | τ_0 | a_0 | τ_1 | a_1 |
|-----------------------|-------------------------------|----------|-------|----------|-------|
| fs-H ₂ FBG | 850 | 12.06 | 0.09 | 37.65 | 0.04 |
| fs FBG | 950 | 4.54 | -0.01 | 14.78 | 1.34 |
| UV-H ₂ FBG | 850 | 73.85 | 0.26 | 131.61 | 0.02 |

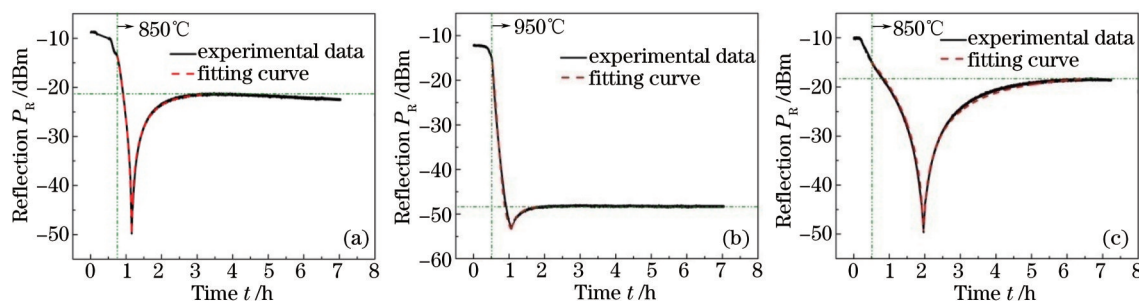


图 8 3 种光栅的反射峰值功率变化曲线及再生过程模型拟合曲线。(a) 飞秒载氢光栅; (b) 飞秒非载氢光栅; (c) 紫外载氢光栅

Fig.8 Output responses and fitting curve of the regeneration of three types of FBG. (a) fs-H₂ FBG; (b) fs FBG; (c) UV-H₂ FBG

4.2 光纤布拉格光栅再生时间与处理温度关系模型研究

为了进行光栅再生模型建立分析研究, 对 3 种类型光栅的实验结果进行统计, 如表 3 所列, 表中包含不同类型光栅的处理温度、再生时间。表中数据表明, 光栅的热处理温度越高, 光栅再生所需要的时间越短。

表 3 再生光栅实验结果汇总表

Table 3 Results of regenerated FBGs

| FBG type | Anneal temperature T_r /°C | No. | Erased time t_1 /min | Regeneration complete time t_2 /min |
|-----------------------|------------------------------|-----|----------------------------|---------------------------------------|
| fs-H ₂ FBG | 700 | 1-1 | No regeneration phenomenon | |
| | 800 | 1-2 | 300.0 | 1440.0 |
| | 850 | 1-3 | 23.4 | 167.8 |
| | 950 | 1-4 | 3.4 | 26.5 |
| fs FBG | 800 | 2-1 | No regeneration phenomenon | |
| | 900 | 2-2 | 384.0 | 618.0 |
| | 950 | 2-3 | 31.4 | 94.8 |
| | 1000 | 2-4 | 10.8 | 45.8 |
| UV-H ₂ FBG | 800 | 3-1 | 324.0 | 1398.0 |
| | 850 | 3-2 | 87.0 | 373.0 |
| | 900 | 3-3 | 22.0 | 110.4 |
| | 1000 | 3-4 | 0.2 | 2.9 |

设温度 T_r (单位: °C) 为光栅处理温度, 光栅再生转换时间以及光栅完成再生的时间 t_i ($i=0, 1$; 分别表示光栅再生转换时间以及光栅完成再生的时间, 单位: min), t_i 与 T_r 之间的关系可以用指数衰减模型来表示, 同时也符合光栅寿命规律, 处理温度-光栅再生时间模型表达式为:

$$t_i = A \exp(-T_p/B) + C. \quad (6)$$

显然 T_p 越小, t_i 越大, 再生所需的时间呈指数增大; B 为再生系数, 代表了光栅再生的快慢程度; A 、 C 为模型系数。

以(6)式为目标函数对3种光栅的再生过程进行拟合, 拟合结果如表4所列。图9描述了 T_p 与 t_0 的关系。为定量描述再生特性和工程应用需要, 定义了 T_p - t_0 曲线上, $t_0=12$ h 时所需的 T_p 为光栅再生处理阈值温度 T_c 。从图9模型曲线可以判断, 飞秒非载氢光栅的再生温度阈值大于红外飞秒载氢光栅的, 飞秒载氢光栅的再生温度阈值大于紫外载氢光栅的。从图9中可以得到, 飞秒非载氢光栅、飞秒载氢光栅及紫外载氢光栅的再生阈值温度 T_c 分别为 888 °C、780 °C 和 770 °C。在实际制备再生光栅时, 可根据光栅的处理温度-再生时间模型公式计算热处理温度及其对应的热处理时间。

表4 拟合参数表

Table 4 Regeneration models parameters of FBGs

| FBG type | A | B | C |
|-----------------------|-----------------------|-------|------|
| fs-H ₂ FBG | 7.12×10^{17} | 22.57 | 3.01 |
| fs FBG | 1.72×10^{23} | 18.93 | 4.38 |
| UV-H ₂ FBG | 3.58×10^{11} | 38.44 | 0.00 |

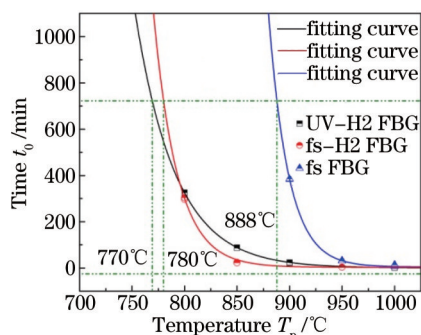


图9 不同类型光栅的再生模型曲线

Fig.9 Regeneration model curves of different types of FBGs

为了进一步验证光栅再生模型的可重复性, 分别在 900 °C、950 °C 和 1000 °C 各取 2 个飞秒非载氢光栅样品进行热处理实验, 光栅基本参数如表5所列, 实验过程与3.2节相同。实验结果如表5所列, 飞秒非载氢光栅的再生温度及光栅再生转换时间与表4及图9所列模型吻合, 光栅擦除时间误差在 5 min 以内, 光栅再生模型适应性很好。

表5 飞秒非载氢光栅参数及再生实验数据表

Table 5 Parameters and results of fs FBG regeneration experiments

| FBG type | No. | Resonance wavelength λ /nm | Reflectivity R /% | Anneal temperature T_p /°C | Erased time t_i /min |
|----------|------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------|
| fs FBG | 2-5 | 1548.150 | 99.21 | 900 | 384.9 |
| | 2-6 | 1547.938 | 99.33 | | 385.1 |
| | 2-7 | 1548.222 | 99.64 | 950 | 31.6 |
| | 2-8 | 1547.965 | 98.87 | | 30.4 |
| | 2-9 | 1548.028 | 99.71 | 1000 | 11.3 |
| | 2-10 | 1548.005 | 98.28 | | 11.0 |

5 结 论

对飞秒载氢光栅、飞秒非载氢光栅及紫外载氢光栅进了不同处理温度下的光栅再生实验。根据光栅高温衰退及再生生长现象建立了光栅再生过程的模型, 该模型与3种光栅的光栅再生过程的反射峰值功率-时间曲线吻合。统计了不同类型光栅的再生温度、再生时间参数, 并建立了3种类型光栅的处理温度-再生时间模型, 验证了模型的适应性, 为实际制备再生光栅提供理论依据。给出了再生处理温度阈值定义, 飞秒非

载氢光栅、飞秒载氢光栅及紫外载氢光栅的再生温度阈值分别是 888 ℃、780 ℃和 770 ℃。研究结果表明:载氢能加速光栅再生过程,再生温度阈值低。但载氢再生光栅的热稳定较差,而飞秒非载氢再生光栅的热稳定性好。

参 考 文 献

- 1 Stephen J Mihailov. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. *Sensors*, 2012, 12: 1898–1918.
- 2 Yue Yin, Wang Yuan, Duan Jianli, *et al.*. Experimental study on fiber Bragg grating monitoring the crack of CFRP concrete composite arch[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0805004.
岳 音, 王 源, 段建立, 等. 光纤光栅 CFRP 混凝土复合拱裂缝检测实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805004.
- 3 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.*. High Precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0605003.
何少灵, 赫凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605003.
- 4 Qiaoni Wang, Yuanhong Yang, Jun He, *et al.*. Femtosecond laser inscribed Bragg gratings in gold-coated fiber for space application[C]. *SPIE*, 2015, 9634: 963460.
- 5 Yuhua Li, Minwei Yang, D N Wang, *et al.*. Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19785–19790.
- 6 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.
- 7 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. 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.
- 8 Yang Huangzhou, Xue Guangqiao, S Das, *et al.*. Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 ℃ using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6438–6441.
- 9 Wang Tao, He Dawei, Wang Yongsheng, *et al.*. Spectral repeatability of regenerated fiber gratings prepared by high temperature annealing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1411–1414.
王 涛, 何大伟, 王永生, 等. 高温制备再生光纤光栅的光谱重复性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1411–1414.
- 10 Fokine M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers[J]. *JOSA B*, 2002, 19(8): 1759–1765.
- 11 S Bandyopadhyay, J Canning, M Stevenson, *et al.*. Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1917–1919.
- 12 J Canning, M Stevenson, S Bandyopadhyay, *et al.*. Extreme silica optical fibre gratings[J]. *Sensors*, 2008, 8(10): 6448–6452.
- 13 S Bandyopadhyay, J Canning, P Biswas, *et al.*. A study of regenerated gratings produced on germanosilicate fibers by high temperature annealing[J]. *Optics Express*, 2010, 19(2): 1198–1206.
- 14 J Canning, E Lindner, K Cook, *et al.*. Regeneration of gratings by post-H₂ loading[C]. *Proceedings of the Quantum Electronics Conference & Lasers and Electro-Optics*, 2011: 142–144.
- 15 J Canning. Regenerated gratings for optical sensing in harsh environments[C]. *Optical Society of America*, 2013: Btu3E.3.
- 16 J Canning, S Bandyopadhyay, P Biswas, *et al.*. Regenerated Fiber Bragg Gratings[M]. Rijeka: *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, 2010: 363–383.
- 17 J Canning, M Stevenson, J Fentona, *et al.*. Strong regenerated gratings[C]. *SPIE*, 2009, 7503: 750326.
- 18 Eric Lindner, Christoph Chojetzki, Sven Brueckner, *et al.*. Regenerated fiber Bragg gratings in Non-Hydrogen-Loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks[J]. *SPIE*, 2010, 7677: 76770H.
- 19 K Cook, C Smelser, J Canning, *et al.*. Regenerated femtosecond fiber Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2012, 8351: 835111.
- 20 Antonio Bueno, Damien Kinet, Patrice Megret, *et al.*. Fast thermal regeneration of fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4178–4181.
- 21 K Cook, Li-Yang Shao, J Canning. Regeneration and helium: regenerating Bragg gratings in helium-loaded germanosilicate optical fibre [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(12): 1733–1742.
- 22 Stephen RBaker, Howard N Rourke, Vernon Baker, *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.
- 23 T Erdogan, V Mizrahi, PJ Lemaire, *et al.*. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(1): 73–80.
- 24 T Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277–1294.

栏目编辑: 刘丰瑞