

# 耐高温再生光纤光栅的生长规律

聂 铭<sup>1</sup>, 张东生<sup>2</sup>, 吴梦绮<sup>2</sup>, 张春峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>武汉理工大学光纤传感与信号处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup>武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

**摘要** 擦除温度和再生温度相同时,在 800~950 °C 温度区间内,光纤光栅的擦除时间和再生完成时间均随处理温度呈指数衰减。利用再生完成时间拟合函数,得到紫外载氢标准通信光纤光栅的再生阈值温度为 805 °C,并且当处理温度在 855~905 °C 之间时,不同温度下制得的再生光纤光栅的反射率大小服从高斯分布,定量描述了光纤光栅再生的整个过程。提出了一种制作高反射率再生光纤光栅的方法,当擦除温度和再生温度不同时,该方法可将紫外载氢标准通信光纤上的再生光纤光栅的反射率从 20% 提高到 43%。

**关键词** 光纤光学; 再生光纤光栅; 再生过程; 擦除时间; 再生完成时间

**中图分类号** TP253      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.050601

## Growth Law of High Temperature Resistance Regenerated Fiber Grating

Nie Ming<sup>1</sup>, Zhang Dongsheng<sup>2</sup>, Wu Mengqi<sup>2</sup>, Zhang Chunfeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Ministry of Education for Optic Fiber Sensing Technology and Information Processing,  
Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup>State Engineering Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology,  
Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** The erasing time and the regeneration complete time of fiber grating exponentially decay with temperature in the temperature interval of 800-950 °C when the erasing temperature and the regeneration temperature are the same. According to the fitting function of regeneration complete time, the regeneration threshold temperature of ultraviolet hydrogen loading standard communication fiber grating is 805 °C. The reflectivity of regenerated fiber grating obeys Gaussian distribution when the treatment temperature is set between 855-905 °C, which describes the whole regeneration process of fiber grating quantitatively. When the erasing temperature and the regeneration temperature are different, a new method to create a regenerated fiber grating with high reflectivity is obtained, and the method can improve the reflectivity of regenerated fiber grating used in ultraviolet hydrogen loading standard communication fiber from 20% to 43%.

**Key words** fiber optics; regenerated fiber grating; regeneration process; erasing time; regeneration complete time

**OCIS codes** 060.3735; 220.4610; 220.4880

## 1 引言

在能源、石油、化工和航空航天领域,基于生产工艺的需要,许多工业部件要在高温等极端条件下长时间工作,因此对设备的安全性具有很高的要求。目前,光纤光栅(FBG)测量主要应用于常温测量,在测量高温

**收稿日期:** 2016-12-20; **收到修改稿日期:** 2017-01-17

**基金项目:** 国家 863 计划(2012AA041203)

**作者简介:** 聂 铭(1994—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术及其工程应用方面的研究。

E-mail: niemingwhut@163.com

**导师简介:** 张东生(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术及其工程应用方面的研究。

E-mail: 1929673933@qq.com

时,普通光纤光栅由于耐高温性能差,长时间工作在高温环境下会逐渐衰退直至完全擦除,极大地限制了光纤光栅在高温环境中的应用,因而研究耐高温光纤光栅成为一个亟待解决的问题。再生光纤光栅(RFBG)可以工作在 1100 °C 以上的高温环境下且性质稳定,同时再生光纤光栅的制备工艺简单,因此研究再生光纤光栅传感技术的意义重大<sup>[1-6]</sup>。

国内外已对再生光纤光栅进行了大量的形成机理和实际应用方面的研究。2002 年,Fokine<sup>[7]</sup>在外包层掺杂氟的光纤上刻写 I 型光纤光栅,经过等幅升温擦除了光纤光栅,在其消失的温度点上恒温保持一段时间,被擦除的光纤光栅可以重新生长出来,这是关于光纤光栅再生的研究雏形。2008 年,Canning 等<sup>[8-10]</sup>报道了一种新型的耐高温光纤光栅,命名为再生光纤光栅,他们使用 193 nm 激光器在预载氢的硼锗共掺的光敏光纤上刻写光纤光栅,并使用一定的热处理方法使再生后的光纤光栅可耐 1100 °C 高温,最高工作温度可达 1295 °C;基于该实验结果提出了如下假设:光纤光栅的再生可能发生在光纤包层区域内或在纤芯-包层的界面。2012 年,Shao 等<sup>[11]</sup>研究了再生光纤光栅的重复再现性质,提出了一种可以实现再生光纤光栅大批量生产的工艺,这一成果使再生光纤光栅距离实际应用又近了一步。2013 年,Wang 等<sup>[12]</sup>研究了再生光纤光栅的温度和应变特性。在提高再生比率的研究方面,Zhu 等<sup>[13]</sup>研究发现优化掺杂浓度可以使再生光纤光栅的反射率从 20% 提高到 40%(估算再生比率从 2.71% 提高到 6.67%),可耐 1000 °C 高温,并且温度灵敏度为 15 pm/°C。

基于以上研究,对再生光纤光栅的生长规律进行了研究。研究内容分为两部分,当擦除温度和再生温度相同时,通过对光纤光栅再生过程中擦除时间、再生完成时间和反射率的测量,研究了再生光纤光栅的生长规律;当擦除温度和再生温度不同时,通过改变擦除温度和再生温度,探究了提高再生光纤光栅反射率的实验方法。

## 2 实 验

实验装置如图 1 所示,由管式高温炉、光源和光谱仪组成,宽带光源(BBS)发出的宽带光经过 3 dB 耦合器进入光纤光栅,光纤光栅反射回来的窄带光再次经过 3 dB 耦合器后进入光谱仪(OSA)。管式高温炉的最高工作温度为 1200 °C,高温炉内有一个热电偶用于监测炉内实际温度。光纤光栅水平自由地放入管式高温炉中,光纤光栅区域置于中间恒温段。使用工作波长为 248 nm 的紫外氩离子激光器,通过紫外曝光在普通单模通信光纤上刻写光栅,并将光纤光栅进行载氢处理。对每一根光纤光栅在各个温度点进行再生实验,通过光谱仪来实时测量光纤光栅的反射率,实验温度范围为 800~950 °C。

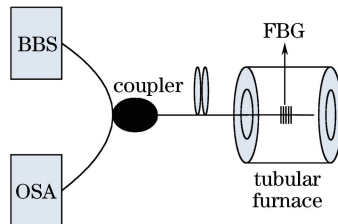


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experiment device

### 2.1 擦除温度和再生温度相同时光纤光栅的再生

分别在 800, 850, 855, 870, 880, 890, 900, 905, 920, 950 °C 下对中心波长为 1580 nm 左右的光纤光栅进行高温处理,并记录擦除光纤光栅所需的时间、再生光纤光栅强度达到饱和所需的时间、中心波长以及反射率大小,从而研究整个再生过程,光纤光栅在不同温度下的反射率变化曲线如图 2 所示。黑色线代表温度变化曲线,蓝色线代表光纤光栅反射率的变化曲线。

高温处理时,第一阶段为升温阶段,用时 1 h 将炉内温度从 18 °C 升高至设定温度,之后在该温度下保温。第二阶段为保温阶段,保持炉温在设定温度下不变。可以观察到在升温和保温阶段,初始光纤光栅的反射强度在不断下降,直至初始光纤光栅被完全擦除,并且当初始光纤光栅被完全擦除后,会在此基础上形成一个新的光纤光栅,即为再生光纤光栅。此外,再生光纤光栅的强度会随着保温时间的延长逐渐增大,直到再生光纤光栅的强度达到饱和。

经过实验研究发现,不同温度下,光纤光栅的擦除时间、再生完成时间和再生光纤光栅的反射率大小不同。

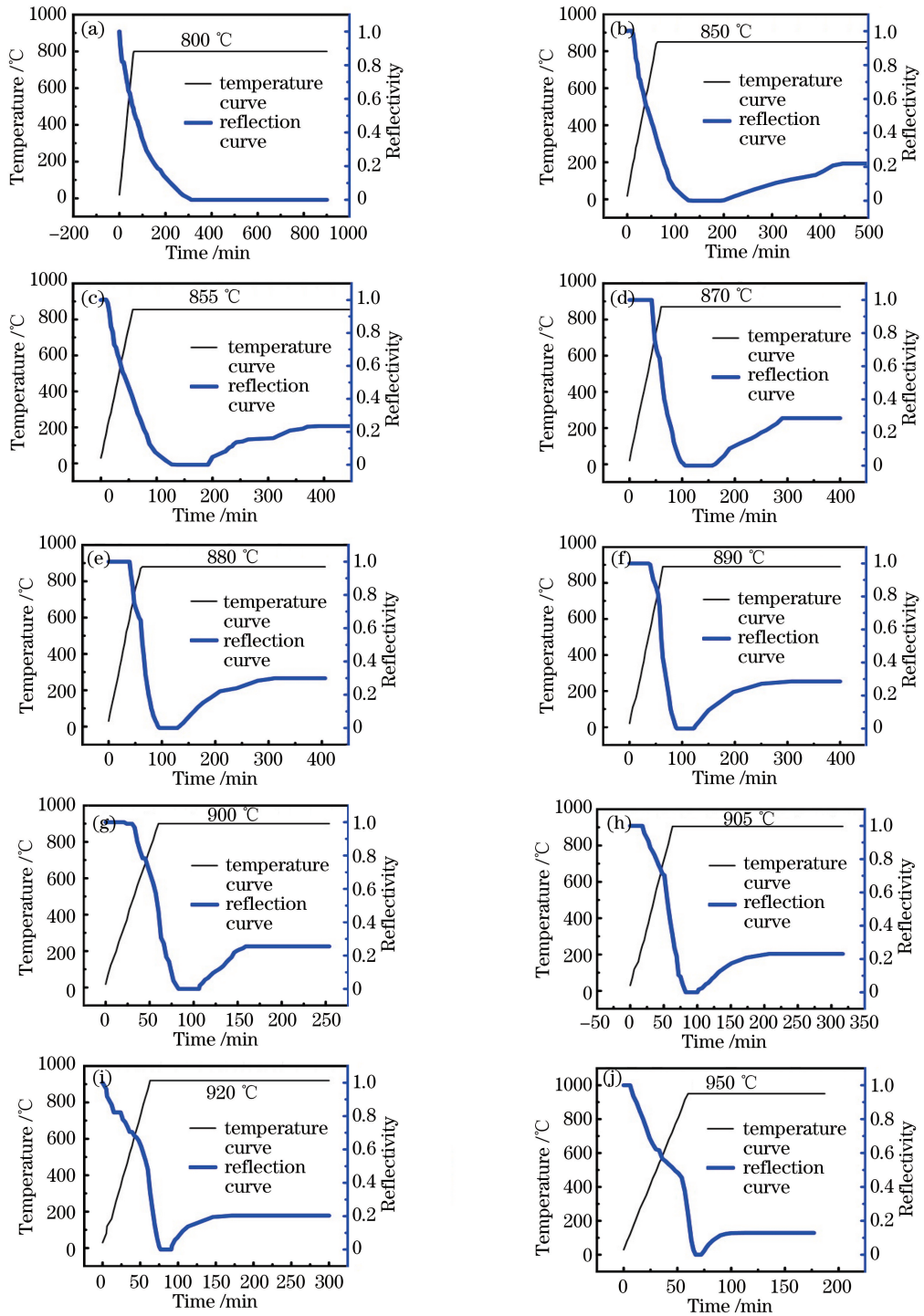


图2 光纤光栅在不同温度下的反射率变化曲线。(a) 800 °C;(b) 850 °C;(c) 855 °C;(d) 870 °C;  
(e) 880 °C;(f) 890 °C;(g) 900 °C;(h) 905 °C;(i) 920 °C;(j) 950 °C

Fig. 2 Reflectivity curves of fiber grating under different temperatures. (a) 800 °C; (b) 850 °C; (c) 855 °C; (d) 870 °C;  
(e) 880 °C; (f) 890 °C; (g) 900 °C; (h) 905 °C; (i) 920 °C; (j) 950 °C

温度为 880 °C 时的再生过程得到的再生光纤光栅的最大反射率为 29.232%，温度为 950 °C 时光纤光栅的擦除时间和再生时间最短，且温度越高，擦除和再生时间越短。不同恒温下 RFBG 的实验结果如表 1 所示。

表 1 中数据表明，温度范围为 850~950 °C 时，光纤光栅均有再生现象发生。温度为 800 °C 时，擦除光纤光栅用时 338 min，擦除后又在 800 °C 保温 270 min 后，光纤光栅无再生现象，说明 800 °C 未达到这种光纤光栅的再生阈值温度。

表1 不同恒温下 RFBG 的实验结果

Table 1 Experimental results of RFBG under different constant temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Erasing time /min	Regeneration complete time /min	Reflectivity /%
800	312	No regeneration	No regeneration
850	137	225	23.12
855	128	200	23.47
870	106	139	28.64
880	96	111	29.32
890	88	90	28.51
900	82	67	24.54
905	80	62	23.12
920	77	55	20.36
950	67	30	12.88

## 2.2 擦除温度和再生温度不同时光纤光栅的再生

在光纤光栅的再生实验中,擦除温度和再生温度不同时<sup>[6]</sup>,光纤光栅在不同温度下的反射率变化曲线如图 3(a)所示。在 800  $^{\circ}\text{C}$  恒温环境下擦除光纤光栅,用时 338 min,擦除后又在 800  $^{\circ}\text{C}$  保温 270 min,但无再生现象产生。之后,温度在 10 min 后从 800  $^{\circ}\text{C}$  升至 900  $^{\circ}\text{C}$ ,并在 900  $^{\circ}\text{C}$  保温,温度保持 14 min 后,出现再生光纤光栅。经过 144 min,再生光纤光栅强度达到饱和,再生完成,此时再生光纤光栅的反射率为 43.95%。由图 3(b)可见,在 800  $^{\circ}\text{C}$  恒温环境下擦除光纤光栅,用时 339 min,擦除后又在 800  $^{\circ}\text{C}$  保温 60 min,无再生现象产生。之后,用时 10 min 将温度由 800  $^{\circ}\text{C}$  升至 880  $^{\circ}\text{C}$ ,并在 880  $^{\circ}\text{C}$  保温,在保持 24 min 后,出现再生光纤光栅。经过 240 min,再生光纤光栅强度达到饱和,再生完成,此时再生光纤光栅的反射率为 31.33%。由图 3(c)可见,在 850  $^{\circ}\text{C}$  恒温环境下擦除光纤光栅,用时 139 min,擦除后用时 10 min 将温度从 850  $^{\circ}\text{C}$  升至 900  $^{\circ}\text{C}$ ,并在 900  $^{\circ}\text{C}$  保温,温度保持 31 min 后,出现再生光纤光栅。经过 91 min,再生光纤光栅强度达到饱和,再生完成。再生光纤光栅的光强约为初始光纤光栅的 26.85%。由图 3(d)可见,在 800  $^{\circ}\text{C}$  恒温环境下擦除光纤光栅,用时 338 min,擦除后又在 800  $^{\circ}\text{C}$  保温 270 min,但无再生现象产生。之后温度又在 180 min 内降至 18  $^{\circ}\text{C}$ ,并在 18  $^{\circ}\text{C}$  保温 300 min,此后用时 60 min 将温度从 18  $^{\circ}\text{C}$  升至 900  $^{\circ}\text{C}$ ,并在 900  $^{\circ}\text{C}$  保温 2 h,未出现再生光纤光栅。由图 3(e)可见,在 800  $^{\circ}\text{C}$  恒温环境下擦除光纤光栅,用时 338 min,擦除后用时 10 min 将温度从 800  $^{\circ}\text{C}$  升至 950  $^{\circ}\text{C}$ ,并在 950  $^{\circ}\text{C}$  保温,保持 17 min 后,出现再生光纤光栅。经过 84 min,再生光纤光栅强度达到饱和,再生完成。再生光纤光栅的光强约为初始光纤光栅的 26.42%。非恒温下 RFBG 的实验结果如表 2 所示。

表2 非恒温下 RFBG 的实验结果

Table 2 Experiment results of RFBG under inconstant temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	18 $^{\circ}\text{C}$ initial reflection wavelength /nm	18 $^{\circ}\text{C}$ regeneration reflection wavelength /nm	Amount of wavelength drift /nm	Maintain temperature time after saturation /min	Erasing time /min	Regeneration complete time /min	Reflectivity / %
18 $\rightarrow$ 800 $\rightarrow$ 900	1580.79	1580.39	0.40	270	338	144	43.95
18 $\rightarrow$ 800 $\rightarrow$ 880	1583.28	1582.63	0.65	60	339	240	31.33
18 $\rightarrow$ 850 $\rightarrow$ 900	1580.82	1580.41	0.41	0	139	91	26.85
18 $\rightarrow$ 800 $\rightarrow$ 950	1583.25	1583.02	0.23	270	338	84	26.42
18 $\rightarrow$ 800 $\rightarrow$ 18 $\rightarrow$ 900	—	—	—	—	—	—	—

当擦除温度和再生温度不同时,在 800  $^{\circ}\text{C}$  进行初始光纤光栅的擦除,在 900  $^{\circ}\text{C}$  进行光纤光栅的再生,使得普通单模通信光纤上刻写光纤光栅的再生反射率可以达到 43.95%。此外,在 900  $^{\circ}\text{C}$  基础上提高再生温度至 950  $^{\circ}\text{C}$ ,再生光纤光栅的反射率反而下降。根据表 3 中数据,光纤光栅的擦除时间主要与擦除光纤光栅时的温度有关,并发现该方案在 800  $^{\circ}\text{C}$  和 850  $^{\circ}\text{C}$  下的擦除时间与恒温实验中 800  $^{\circ}\text{C}$  和 850  $^{\circ}\text{C}$  下的擦除时间一致,而在 880,900,950  $^{\circ}\text{C}$  的再生完成时间不与恒温实验中 880,900,950  $^{\circ}\text{C}$  的再生完成时间一致。



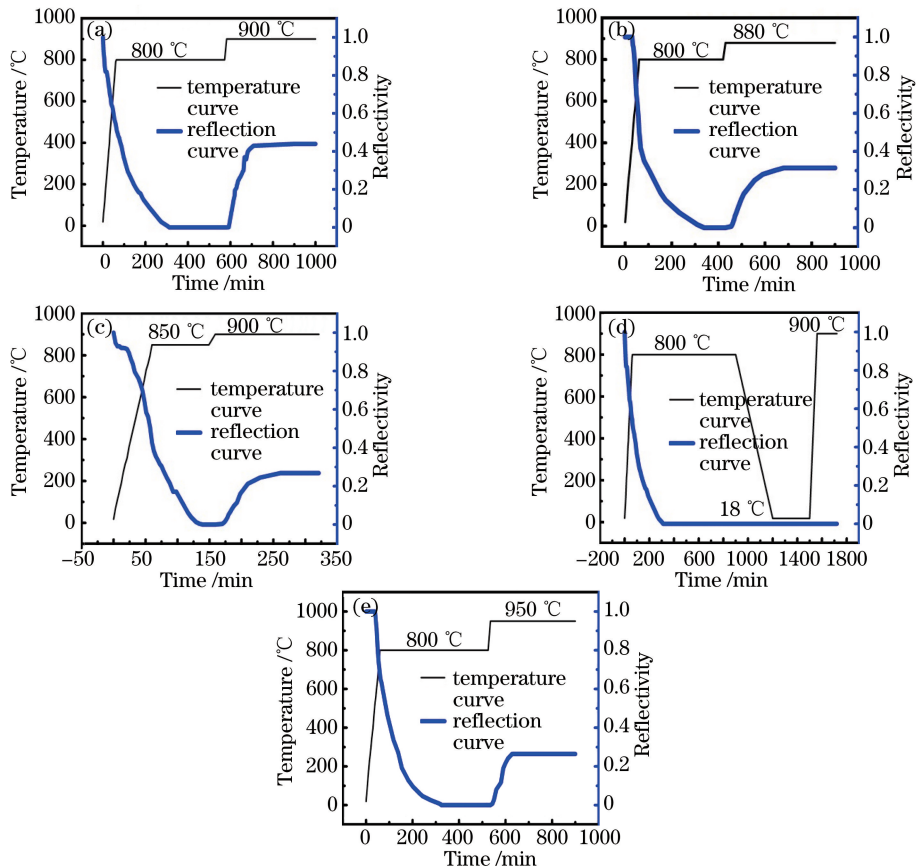


图3 光纤光栅在不同温度下的反射率变化曲线。(a) 18 °C→800 °C→900 °C;(b) 18 °C→800 °C→880 °C;  
(c) 18 °C→850 °C→900 °C;(d) 18 °C→800 °C→18 °C→900 °C;(e) 18 °C→800 °C→950 °C

Fig. 3 Reflectivity curves of fiber grating under different temperatures. (a) 18 °C→800 °C→900 °C;

(b) 18 °C→800 °C→880 °C; (c) 18 °C→850 °C→900 °C; (d) 18 °C→800 °C→18 °C→900 °C; (e) 18 °C→800 °C→950 °C

### 3 实验数据处理及分析

#### 3.1 擦除和再生温度相同时光纤光栅的再生实验分析

分别统计了 800, 850, 855, 870, 880, 890, 900, 905, 920, 950 °C 的擦除时间和再生完成时间。

光纤光栅擦除和再生过程所需的时间与处理温度之间的关系均可用指数衰减函数描述为

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + y_0, \quad (1)$$

式中  $y$  为所需时间, 单位为 min;  $x$  为处理温度, 单位为 °C;  $t_1$  为擦除或者再生系数;  $A_1$  和  $y_0$  为函数系数。显然  $x$  越大,  $y$  越小, 即随着处理温度的增大, 光纤光栅擦除时间和再生完成时间呈指数减小, 其拟合曲线如图 4 所示。

表3 RFBG 的擦除时间和再生完成时间

Table 3 Erasing time and regeneration complete time of RFBG

Temperature / °C	Erasing time / min	Regeneration complete time / min
800	312	—
850	137	225
855	128	200
870	106	139
880	96	111
890	88	90
900	82	67
905	80	62
920	77	55
950	67	30

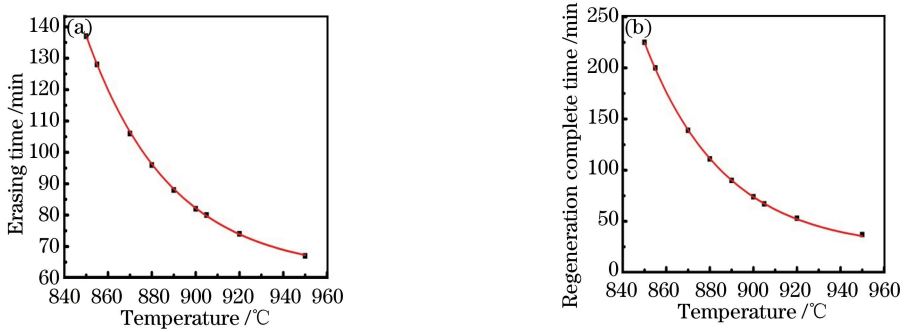


图4 拟合曲线。(a)擦除时间;(b)再生完成时间

Fig. 4 Fitting curves. (a) Erasing time; (b) regeneration completion time

擦除时间与处理温度关系的拟合曲线是通过850, 855, 870, 880, 890, 900, 905, 920, 950 °C 9个点进行拟合得到的, 拟合系数为0.999时, 擦除时间的拟合方程为

$$y = 2.98 \times 10^{11} \exp(-x/38.5) + 61.7. \quad (2)$$

再生完成时间与处理温度的拟合曲线是通过850, 855, 870, 880, 890, 900, 905, 920, 950 °C 9个点进行拟合得到的, 拟合系数为0.999时, 再生完成时间的拟合方程为

$$y = 2.67 \times 10^{12} \exp(-x/36.5) + 22.5. \quad (3)$$

根据文献[14-16], 当再生完成时间为12 h时, 所需要的处理温度为再生阈值温度, 通过再生完成时间拟合函数计算可知, 当 $y = 12$  h时,  $x = 805$ , 即该种光纤光栅的再生阈值温度为805 °C。

随后, 在790~820 °C范围内, 每隔5 °C对光纤光栅进行再生实验。用时1 h将炉温从18 °C升高至设定温度, 之后在设定温度下保温, 在升温 and 保温过程中, 连续记录光谱, 发现当温度低于800 °C时未能擦除初始光纤光栅, 而在805 °C附近擦除了初始光纤光栅并产生了再生现象。统计得到805 °C下光纤光栅的擦除时间为305 min, 再生完成时间为717 min, 与曲线拟合得到的在阈值温度下的再生时间为12 h较吻合。实验现象证明, 当处理温度高于805 °C时均可产生光纤光栅的再生现象。因此, 该实验验证了这种光纤光栅的再生阈值为805 °C。

通过对2.1节实验数据分析可知, 在855~905 °C温度区间内再生光纤光栅的反射率满足高斯分布, 对其进行曲线拟合, 可得

$$r = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} \exp\{-2 [(x - x_c) / w]^2\}, \quad (4)$$

式中 $r$ 为反射率,  $w$ ,  $x_c$ 和 $A$ 为函数系数, 拟合系数为0.99。处理温度与再生光纤光栅的反射率的拟合曲线如图5所示。由图可见, 当处理温度在855~905 °C之间时, 得到的再生光纤光栅的反射率随温度的变化是服从高斯分布的。

根据应力松弛理论<sup>[11]</sup>, 光纤内部显著的机械结构上的应力松弛是再生光纤光栅形成的主要原因。高温处理使得初始光纤光栅的纤芯-包层界面上较高的内应力发生了松弛, 在曝光区和未曝光区域中形成了应力差异, 从而产生了周期性的应力变化, 并可能令玻璃的结构发生变形, 形成周期性的折射率变化, 从而形成再生光纤光栅。

作为光纤纤芯的主要材料, 玻璃态二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )存在一个特殊的温度点: 应力消除温度, 在该温度下玻璃内应力会被退火逐渐消除掉, 光纤材料的实际应力消除温度与掺杂浓度以及光纤预制棒的制作过程有关系, 典型的玻璃态 $\text{SiO}_2$ 的应力消除温度 $T_{\text{SR}} = 1120$  °C。根据对再生光纤光栅反射率的研究可以发现, 当处理温度在855~905 °C之间时, 得到的再生光纤光栅的反射率大小随温度的变化是服从高斯分布的, 在880 °C下得到的再生光纤光栅的反射率最大, 而在更高的处理温度下得到的再生光纤光栅的反射率反而会降低, 并且呈递减趋势。产生这种现象的原因为: 高于880 °C的处理温度接近该种光纤的应力消除温度, 光纤材料表现出了负热膨胀特性, 不利于纤芯和包层的应力松弛, 使两者之间的应力差异变小, 因而得到的再生光纤光栅的反射强度变弱。

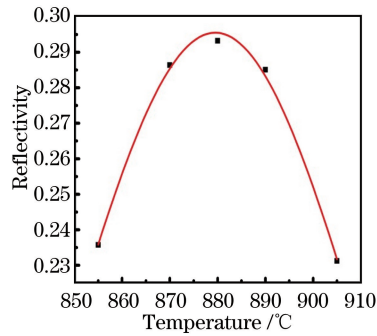


图5 处理温度与再生光纤光栅反射率的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of processing temperature and reflectivity of regeneration fiber grating

### 3.2 擦除和再生温度不同时光纤光栅的再生实验分析

实验数据表明,在 800 °C 下进行初始光纤光栅的擦除,在 900 °C 下进行光纤光栅的再生,得到的普通单模通信光纤上刻写的光纤光栅的再生反射率可以达到 43.95%。此外,在 900 °C 基础上提高再生温度至 950 °C,再生光纤光栅的反射率反而下降了。提高擦除初始光纤光栅的温度,也会导致再生光纤光栅反射率的下降。当擦除温度相同时,再生温度越高,再生完成时间越短;当再生温度相同时,擦除温度越高,再生完成时间越短。

根据应力松弛理论,适当地增加擦除温度与再生温度之间的差异有利于纤芯和包层的应力松弛,可以提高再生光纤光栅的反射率;但当再生温度高于 900 °C 后,此温度接近于光纤的应力消除温度,反而会导致再生光纤光栅反射率下降。

## 4 结 论

光纤光栅的擦除温度和再生温度相同时,在 855~905 °C 温度区间内制得的再生光纤光栅的反射率大小服从高斯分布。在 800~950 °C 温度区间内,验证了擦除时间和再生完成时间与处理温度的关系均符合单指数衰减函数。此外,提出了一种提高再生光纤光栅反射率的实验方案,该方案在 800 °C 时经过 338 min 可擦除光纤光栅,在 900 °C 时经过 144 min 后光纤光栅完成再生,且该方案能使紫外载氢标准通信光纤上刻写的光纤光栅的再生反射率达到 43.95%。研究表明,光纤光栅的再生过程是可控的,为再生光纤光栅的实用化提供了实验基础。下一步工作可研究再生光纤光栅与初始光纤光栅中心波长的漂移量与再生过程的关系,以完善再生光纤光栅的生长规律。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y H, Yang M W, Wang D N, *et al.* Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19785-19790.
- [2] Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun, *et al.* Temperature compensation for fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 677-679.  
黄勇林, 李 杰, 开桂云, 等. 光纤光栅的温度补偿[J]. *光学学报*, 2003, 23(6): 677-679.
- [3] Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, 13(4): 420-430.  
姜德生, 何 伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子 • 激光*, 2002, 13(4): 420-430.
- [4] Jiang Desheng, Li Jianzhi, Mei Jiachun. Temperature sensing properties of multimode fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 175-178.  
姜德生, 李剑芝, 梅家纯. 多模光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(2): 175-178.
- [5] Rathje J, Kristensen M, Pedersen J E. Continuous anneal method for characterizing the thermal stability of ultraviolet Bragg gratings[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(2): 1050-1055.
- [6] 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.
- [7] Fokine M. Growth dynamics of chemical composition gratings in fluorine-doped silica optical fibers[J]. Optics Letters, 2002, 27(22): 1974-1976.
- [8] Canning J, Stevenson M, Bandyopadhyay S, *et al.* Extreme silica optical fibre gratings[J]. Sensors, 2008, 8(10): 6448-6452.
- [9] Wang T, Shao L Y, Canning J, *et al.* Regeneration of fiber Bragg gratings under strain[J]. Applied Optics, 2013, 52(10): 2080-2085.
- [10] Canning J, Stevenson M, Fenton J, *et al.* Strong regenerated gratings[C]. SPIE, 2009, 7503: 750326.
- [11] Shao L Y, Wang T, Canning J, *et al.* Bulk regeneration of optical fiber Bragg gratings[J]. Applied Optics, 2012, 51(30): 7165-7169.
- [12] Wang T, Shao L Y, Canning J, *et al.* Temperature and strain characterization of regenerated gratings[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 247-249.
- [13] Zhu J J, Zhang A P, Zhou B, *et al.* Effects of doping concentrations on the regeneration of Bragg gratings in hydrogen loaded optical fibers[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 2808-2811.
- [14] 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.
- [15] Erdogan T, Mizrahi V, Lemaire P J, *et al.* Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(1): 73-80.
- [16] Wang Qiaoni, Yang Hongyuan, He Jun, *et al.* Study of fiber Bragg grating regeneration process and regeneration model[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0306001.
- 王巧妮, 杨远洪, 何俊, 等. 光纤布拉格光栅再生过程及模型研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0306001.