

引用格式: LIU Ri-zhao, CHEN Ming, ZHENG Jia-jin, *et al.* Study on Preparation and Properties of High Temperature Regenerated Fiber Bragg Gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0706001

刘日照,陈明,郑加金,等. 高温热重生光纤布拉格光栅制备及其性能研究[J]. 光子学报, 2020, 49(7):0706001

# 高温热重生光纤布拉格光栅制备及其性能研究

刘日照<sup>1</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 郑加金<sup>1</sup>, 刘力<sup>1</sup>, 朱永刚<sup>2</sup>, 陈焕权<sup>1</sup>, 韦玮<sup>1</sup>

(1 南京邮电大学 电子与光学工程、微电子学院, 南京 210046)

(2 江苏亨通光电股份有限公司, 江苏 苏州 215234)

**摘要:** 通过高温(850~950 °C)退火方法使光纤布拉格光栅在高温擦除后重新生长形成热重生光纤光栅, 其能够在大于 1 000 °C 以上的高温环境中稳定工作, 但经高温退火处理后的热重生光纤光栅机械强度较一般光纤布拉格光栅显著下降. 本文通过采用单模石英光纤进行实验, 对光纤光栅的轴向应力和光纤光栅中石英分子组分的变化进行研究分析. 结果表明, 经过高温热退火后的热重生光纤光栅与未退火的光纤布拉格光栅相比, 纤芯处压应力减少了 80 MPa, 远离纤芯的包层处拉伸应力由 22 MPa 逐渐减小; 同时, 随着热退火气氛中氧含量的增加, 退火后生成的热重生光纤光栅 SiO<sub>2</sub> 逐渐增加, 占比从 52.99% 上升至 69.92%. 虽然 SiO<sub>2</sub> 具有较高的密度, 其机械强度大于 Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 但热退火后的热重生光纤光栅脆性仍增大, 故推论: 组分变化对热重生光纤光栅脆性增大无明显影响, 脆性增大主要原因为高温导致的应力松弛. 本文研究为提高热重生光纤光栅的机械性能, 解决其脆性问题提供了可靠的理论与实验依据.

**关键词:** 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 退火; 热重生光纤光栅; 应力; 组分

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204907.0706001

## Study on Preparation and Properties of High Temperature Regenerated Fiber Bragg Gratings

LIU Ri-zhao<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, ZHENG Jia-jin<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, ZHU Yong-gang<sup>2</sup>,

CHEN Huan-quan<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>

(1 College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

(2 HengTong Optic-Electric Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215234, China)

**Abstract:** By annealing at high temperature (850~950°C), the fiber Bragg grating can be erased at high temperature and grow again to form a regenerated fiber Bragg grating, which can work stably in a high temperature environment of more than 1 000 °C. However, the mechanical strength of the regenerated fiber Bragg grating after annealing at high temperature is significantly lower than that of common fiber Bragg gratings. In this paper, the axial stress of fiber Bragg grating and the change of quartz molecular components in fiber Bragg grating are studied and analyzed by single mode quartz fiber experiment. The results show that compared with the unannealed fiber Bragg grating, the compressive stress at the fiber core decreases by 80 MPa, and the tensile stress at the cladding far away from the fiber core gradually decreases

**基金项目:** 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室开放基金(No.2019-skllmd-10), 江苏省光通信工程技术研究中心资助项目(No. ZXF201802)

**第一作者:** 刘日照(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: liu\_rizhao@126.com

**导师(通讯作者):** 韦玮(1960-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光电功能材料与器件以及特种光纤材料与应用等. Email: weiwei@njupt.edu.cn

**收稿日期:** 2020-03-09; **录用日期:** 2020-05-07

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

by 22 MPa. At the same time, with the increase of oxygen content in the atmosphere of hot annealing, the regenerated fiber grating  $\text{SiO}_2$  generated after annealing gradually increased, and the proportion increased from 52.99% to 69.92%. Although  $\text{SiO}_2$  has a high density and its mechanical strength is greater than  $\text{Si}_2\text{O}_3$ , the brittleness of the regenerated fiber grating after hot annealing still increases. Therefore, it is inferred that the change of components has no significant effect on the increase of brittleness of regenerated fiber Bragg grating, and the main reason for the increase of brittleness is the stress relaxation caused by high temperature. This paper provides a reliable theoretical and experimental basis for improving the mechanical properties and solving the brittleness problem of thermal regenerated fiber Bragg ratings.

**Key words:** Optical fiber sensing; Fiber Bragg grating; Annealing; Regenerated fiber Bragg grating; Stress; Components

**OCIS Codes:** 060.2300; 060.3735; 060.2370; 060.2270

## 0 引言

普通型光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)温度传感器(工作温度小于 200 °C)作为一种可靠的无源温度传感器,目前已被广泛地应用<sup>[1-2]</sup>.然而,在能源、石油、冶炼和航空航天等领域,很多部件需要在超过 500 °C甚至上千度的高温环境下运行,普通型光纤光栅温度传感器难以满足工程应用的需求<sup>[3]</sup>.热重生光纤光栅(Regenerated Fiber Bragg Grating, RFBG)是指通过高温(850~950°C)退火的方法使FBG高温擦除后重新生长的光纤光栅,除了具有体积小、抗电磁干扰、复用性强等优点,还具有长时间耐高温工作的特点,因此,研究RFBG传感器在冶炼、航空等领域具有重要的意义和广阔的应用前景.

目前对RFBG的形成机理及应用已有诸多的报道.2002年,瑞典科学家 FOKINE M<sup>[4]</sup>采用等幅升温方式退火,利用氟锆共掺光纤制备了耐高温光纤光栅,并认为其形成机理是光纤中氟元素与羟基发生化学反应形成的氟化氢在高温下从纤芯向外扩散形成了周期性的折射率分布,因此将这种耐高温光纤光栅称为化学组分光纤光栅.2008年,悉尼大学 CANNING J<sup>[5]</sup>报道了一种新型的耐高温光纤光栅形成机理,使用 193 nm 激光器在硼锆共掺光纤上制备了I型光纤光栅,经过 900 °C退火处理制备了RFBG,并认为光纤再生机理是发生在光纤包层与纤芯界面的应力松弛.北京交通大学 WANG Tao等<sup>[6]</sup>研究了应力对光纤光栅再生的影响,结果表明施加应力会导致RFBG的波长增加,且施加的应力与光栅波长增加比率基本成正比.西北大学 YANG Hang-zhou等<sup>[7]</sup>研制了一种  $\text{ZrO}_2$  含量为 9% 的新型光敏光纤,所制备的RFBG能够耐温 1 400 °C.以上研究结果表明,目前对RFBG的研究主要集中于光纤的掺杂<sup>[8]</sup>、载氢条件<sup>[9-10]</sup>、初始光栅特性<sup>[11]</sup>,以及再生时的退火方式<sup>[5,12]</sup>和退火温度<sup>[13]</sup>等对RFBG的反射强度和其他光谱性能影响方面.而通过实验发现,石英光纤光栅经高温处理后存在脆性明显增大、极易断裂的问题.但已有文献并未对严重影响RFBG机械性能的现象进行机理解释,而是通过封装<sup>[14-15]</sup>技术和工艺来降低其脆性损伤.

鉴于此,为了研究高温退火使FBG擦除重生出RFBG后,光纤内部发生的变化.本文在制备具有良好测高温效果的RFBG的基础上,研究和分析了不同退火条件下FBG与RFBG的轴向应力变化以及内部组分变化情况;并进一步研究了降温速度,退火环境气氛(真空、惰性气体、空气等)等因素对RFBG轴向应力及内部组分的影响,并给出高温退火后RFBG脆性较大的合理推论.

## 1 实验

### 1.1 FBG的刻写

研究表明,若初始FBG光反射谱强度较低,重生后的RFBG反射谱强度也较低,为了获得性能良好的RFBG,本文首先制备具有较高反射率的初始光栅.对石英单模光纤在 40 °C、13 MPa的条件下载氢 108 h,使光纤具有良好的光敏性.然后,使用相位掩模法对载氢后的光纤进行曝光,激光器波长为 248 nm,重复频率为 40 Hz,曝光单脉冲能量为 10 mJ,曝光 4 000 个脉冲,光纤上总曝光能量 40 J.

石英单模光纤型号为 G652D,来自中国江苏亨通光电股份有限公司,激光器采用美国 Coherent 公司的 COMPexPro205 准分子激光器.

### 1.2 RFBG的制备与表征

FBG的热重生及高温测试实验装置如图 1.主要由宽带光源(BBS, KOHERAS, Super Kuersa)、光谱仪

(OSA, YOKOGAWA, AQ6370D)、高温管式炉组成(Tube furnace, HF-Kejing, OTF-1200X-S). 宽带光源发出的光经过环形器(Circulator)到FBG, 光栅反射回去的光再由环形器进入光谱仪. 高温管式炉通过特定的退火程式对FBG进行退火处理, 通过光谱仪实时扫描光谱观察光栅的擦除与生长情况.

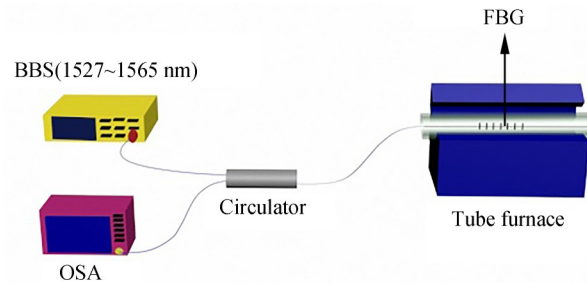


图1 光纤光栅的热重生及高温反射谱实时测试装置

Fig.1 Thermal regeneration of fiber Bragg grating and high temperature reflectance spectrum real-time test device

光纤光栅的轴向应力测试使用美国 INTERFIBER 公司的 IFA-100 多波长光纤分析仪, 利用横向干涉测量法, 将光纤光栅放置于检测夹具上, 相干光经过被测光纤后发生干涉并由 CCD 镜头接收干涉条纹. 经过扫描后, 测量区域所有数据经相位拼接由计算机合成生成分布图, 设备通过光学方法测出其应力分布. 化学组分变化采用 X 射线光电子能谱分析(XPS, KRATOS, Axis Supra)进行分析.

## 2 分析与讨论

为了分析退火过程中反射强度的变化情况, 将 FBG 在空气中以  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  速度升温, 从室温升至  $920^{\circ}\text{C}$ , 并在  $920^{\circ}\text{C}$  保温 120 min; 然后, 自然冷却至室温. RFBG 的热重生过程如图 2, 右 y 轴为管式炉内温度, 直线为光栅的温度随着时间的变化曲线. 点连线为反射强度随着加热时间的变化. 可以看到在  $0\sim 80$  min 左右的时候, 管式炉对初始光栅加热, 初始光栅的反射率并没有太大变化, 到 80 min 左右, 初始光栅的强度急剧下降. 初始光栅被完全消失后, 逐渐出现一个新的光栅, 即为热重生光栅, 随后再生光栅的强度随时间不断变大, 经过约 70 min 的时间, 再生光栅的强度达到饱和.

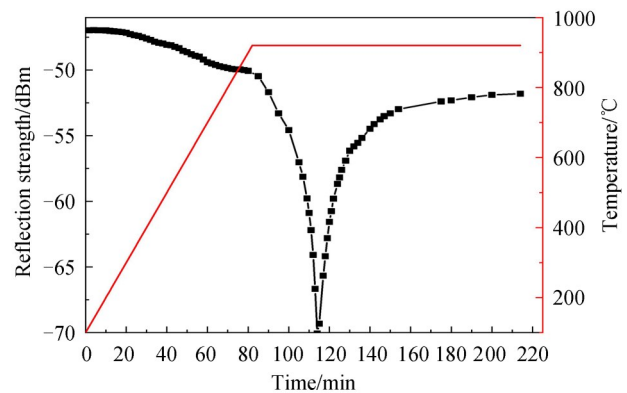


图2 退火过程中反射强度的变化

Fig.2 Variation of reflection intensity during annealing

退火前后 FBG 和 RFBG 的典型光谱如图 3(a). 退火前的透射深度为  $-20.3$  dB, 反射率为  $99.1\%$ , 中心波长  $1548.44$  nm,  $3$  dB 带宽为  $0.26$  nm. 退火后的透射深度为  $-3.1$  dB, 反射率为  $50.6\%$ , 中心波长蓝移至  $1546.70$  nm,  $3$  dB 带宽减少为  $0.15$  nm. 带宽变化是由于光栅反射谱强度降低, 带宽同时减小, 中心波长蓝移是由于降温后栅区之间的光栅周期减小导致. 退火后光谱的强度良好, 且重生后的光谱谱形较好. 按同样的退火程序将 FBG 置于氩气中处理, 观测其光谱, 光谱特性与在空气中的 RFBG 无明显差异, 温度测试与耐高温特性测试均与在空气中处理的 RFBG 的测试结果相同.

将制备好的 RFBG 置于管式炉中进行温度测试, 测试范围为  $100\sim 1000^{\circ}\text{C}$ . 测试结果如图 3(b), 黑点为实际测温点, 经线性拟合后可得波长与温度的漂移关系. 可以看出, 制备好的 RFBG 具有良好的线性测温性能. 其中拟合直线的斜率代表该 RFBG 的测温灵敏度, 为  $15.6$  pm/ $^{\circ}\text{C}$ , 拟合直线的判定系数  $R^2$  为  $0.99931$ .

为了研究退火重生后 RFBG 的耐高温特性, 将 RFBG 在  $100\sim 1000^{\circ}\text{C}$  之间测试, 检测其反射光谱, 测试结果如图 4. 由图可知, RFBG 反射光谱的强度基本保持不变, 制备好的 RFBG 重生达到饱和且具有较好的耐高温特性.

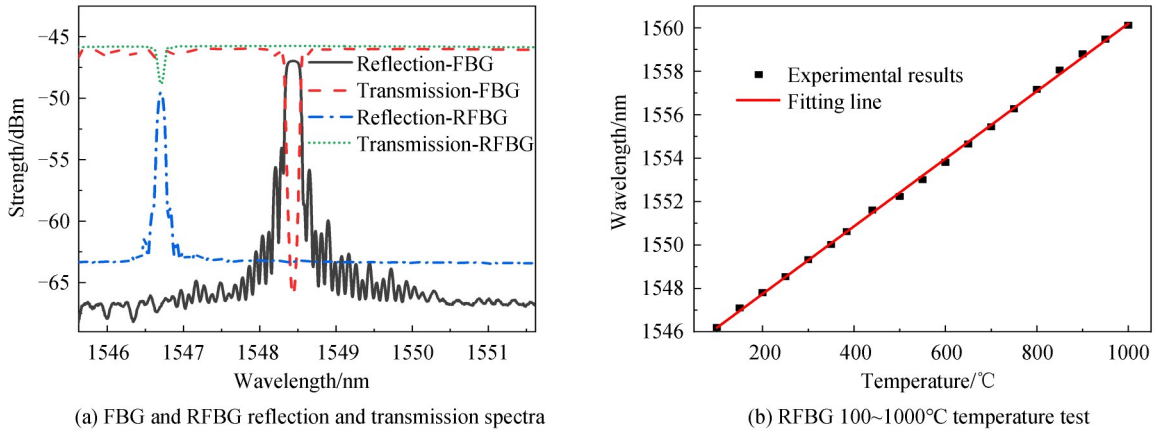


图3 空气中920°C、2 h退火后RFBG光谱特性与耐高温性能  
Fig. 3 RFBG (920°C in air 2 h) spectral characteristics and high temperature resistance

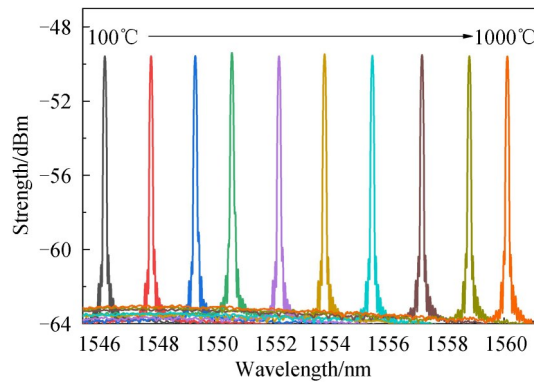


图4 耐高温特性测试  
Fig.4 High temperature resistance test

### 2.1 不同退火温度对RFBG轴向应力的影响

将FBG在空气环境中按10°C/min的速度升温,从20°C分别升至800°C、900°C、950°C.并在800°C、900°C、950°C保温120 min,然后自然冷却至室温,制备出三个RFBG试样.而未经高温处理的FBG作为标准样对照.

使用光纤轴向应力分析仪对FBG与RFBG轴向应力进行测试,结果如图5.其中x轴表示光纤的径向位置,y轴表示的是应力大小,正值表示的为光纤径向所在位置受到的拉伸应力大小,力的方向是轴向的,故称

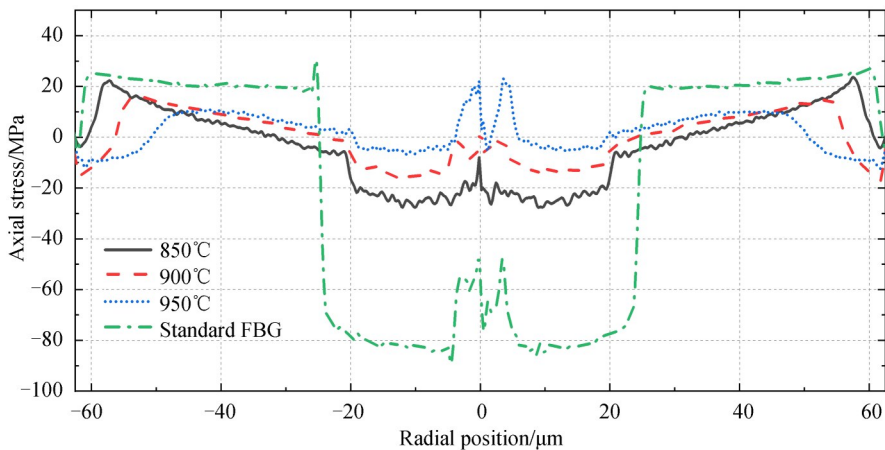


图5 不同退火温度对RFBG轴向应力的影响  
Fig. 5 Effects of different annealing temperatures on the axial stress of RFBG

为轴向应力,负值为压应力.由图可以看出,未经高温处理的FBG轴向应力主要呈现以下特征:纤芯处存在 $-60$  MPa左右的压应力,在靠近纤芯的包层处( $4\ \mu\text{m} < r < 23\ \mu\text{m}$ )存在 $-80$  MPa左右的压应力.在远离纤芯的包层处( $23\ \mu\text{m} < r < 62.5\ \mu\text{m}$ )存在 $20$  MPa左右的拉伸应力.

与未处理的FBG标准样对比,经过高温处理后的RFBG轴向应力呈现出如下的趋势:RFBG的纤芯及靠近纤芯的包层处( $0 < r < 23\ \mu\text{m}$ ),其压应力不断减少,且随着退火温度的提高,其压应力减小至 $0$ .在远离纤芯的包层处( $23\ \mu\text{m} < r < 62.5\ \mu\text{m}$ ),其轴向拉伸应力从 $22$  MPa逐渐减小,且越远离纤芯的位置减少的量越小.由此可知:FBG经过高温处理后,其内部拉伸应力和压应力都会逐渐减小,即发生“应力松弛”现象.实际使用普通型FBG温度传感器时,工作温度仅在 $150\ ^\circ\text{C}$ 以下,其具有良好的机械强度,而高温退火后的RFBG机械性能较差,因此,高温退火后导致的应力松弛可能是RFBG脆性增大的一个因素.

## 2.2 不同降温速度对RFBG轴向应力的影响

将FBG在空气环境中按升温速度 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 从 $20\ ^\circ\text{C}$ 升至 $900\ ^\circ\text{C}$ ,并在 $900\ ^\circ\text{C}$ 保温 $120\ \text{min}$ ,再分别以 $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 、自然冷却(关闭管式炉加热,降温速度先较快,到 $200\ ^\circ\text{C}$ 时较慢)、急速冷却(直接将RFBG从炉膛取出,大约 $1\ \text{min}$ 降至 $20\ ^\circ\text{C}$ ),降温至 $20\ ^\circ\text{C}$ 制备四个RFBG试样,未经高温处理的FBG作为标准样对照,结果如图6.

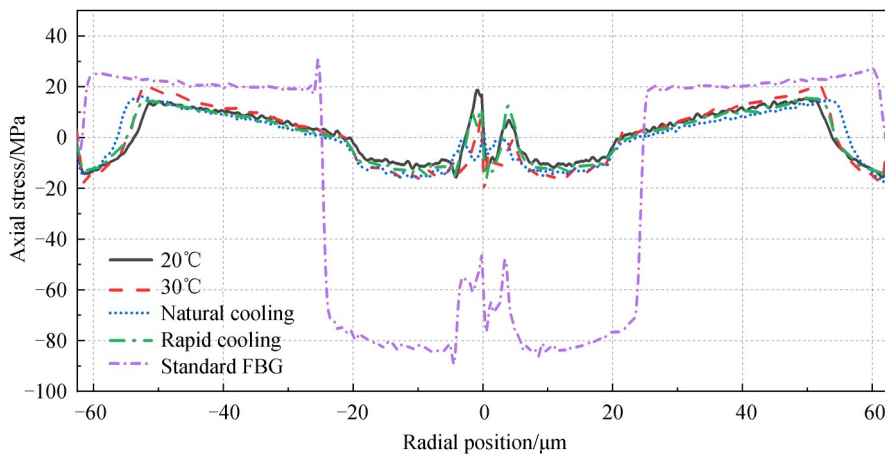


图6 不同降温速度对RFBG轴向应力的影响

Fig. 6 Effects of different cooling rates on the axial stress of RFBG

由图6可以看出,高温热退火使得FBG应力松弛,光纤的压应力与拉伸应力均减小.其次,在不同降温速度的条件下四条曲线基本重合,可知不同的降温速度对于RFBG轴向应力并无影响.

## 2.3 不同退火环境气氛对RFBG轴向应力的影响

将FBG分别在真空环境(压强 $4\ \text{Pa}$ )、空气环境(相对湿度 $50\%$ )、Ar气环境(气体流量 $30\ \text{sccm}$ )中按升温速度 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 从 $20\ ^\circ\text{C}$ 升至 $900\ ^\circ\text{C}$ ,并在 $900\ ^\circ\text{C}$ 保温 $120\ \text{min}$ ,再自然冷却降温至 $20\ ^\circ\text{C}$ .未经高温处理的FBG作为标准样对照.

由于常规制作RFBG时都将光纤置于空气中退火,空气中存在 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等,故探究是否光纤内部的组分与空气中这些发生了反应,使得光纤内部应力发生变化.对三种样品进行测试,测试结果如图7.由图可知,在空气中高温处理的RFBG的应力分布不同于在真空中和在Ar气中处理的RFBG.空气中高温处理的RFBG纤芯处的应力相对小于真空和Ar气环境下处理的RFBG,且真空和Ar气环境下的光纤包层 $23\ \mu\text{m}$ 到 $62.5\ \mu\text{m}$ 处的应力为 $0$ ,而空气中高温处理的RFBG在此处有残余应力.真空和Ar气环境的共同特点是 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等含量极低.由此可知,空气中的某些成分在高温下与RFBG反应,具体反应情况可对RFBG做组分分析.

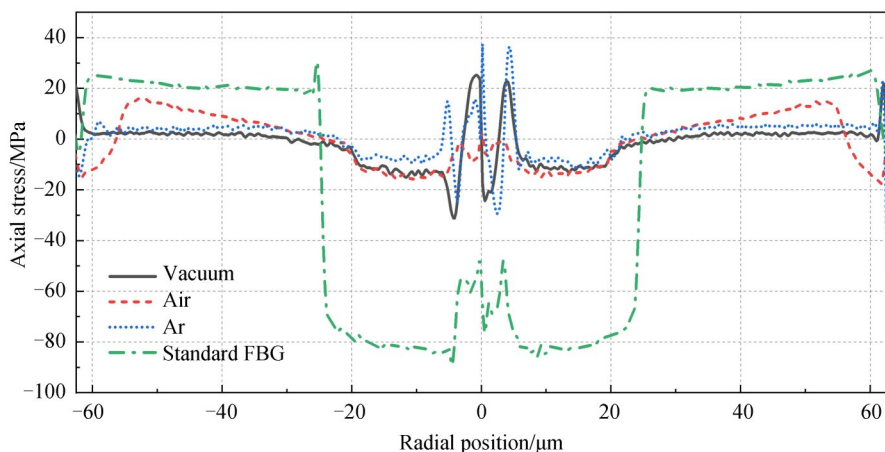


图7 不同的退火气氛对RFBG轴向应力的影响

Fig. 7 Effects of different annealing atmospheres on the axial stress of RFBG

#### 2.4 不同热退火环境气氛 RFBG 内部组分的变化

制备如下两个 RFBG, 将 FBG 分别在 Ar 气环境(气体流量 30 sccm)、空气环境(相对湿度 50%)中按升温速度  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  升至  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 并在  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  保温 120 min, 再自然冷却降温至  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 以未经处理的 FBG 作为标准样对照. 对这三个样品进行 XPS 分析.

图 8(a) 为光纤光栅的全谱图, 可见其主要成分为 Si 与 O. 图 8(b) 为 Si 2p 峰, 对比三个样品, 可看出在结合能为  $103.5\text{ eV}$  附近处, 峰强有明显增强. 文献[16]中报道,  $103.47\text{ eV}$  为  $\text{SiO}_2$  的特征峰, 小于  $\text{SiO}_2$  处的峰为 Si 的亚氧化态 ( $\text{Si}_2\text{O}_3$   $102.1\text{ eV}$ 、 $\text{SiO}$   $101.37\text{ eV}$ 、 $\text{Si}_2\text{O}$   $100.57\text{ eV}$  等). 由图 8(b) 可知, 标准样中存在着 Si 的亚氧化态  $\text{Si}_2\text{O}_3$ , 经过高温处理,  $\text{Si}_2\text{O}_3$  被氧化生成  $\text{SiO}_2$ , 且由于空气为富氧环境, 在空气中高温处理的 FBG 的  $\text{SiO}_2$  组分最大.

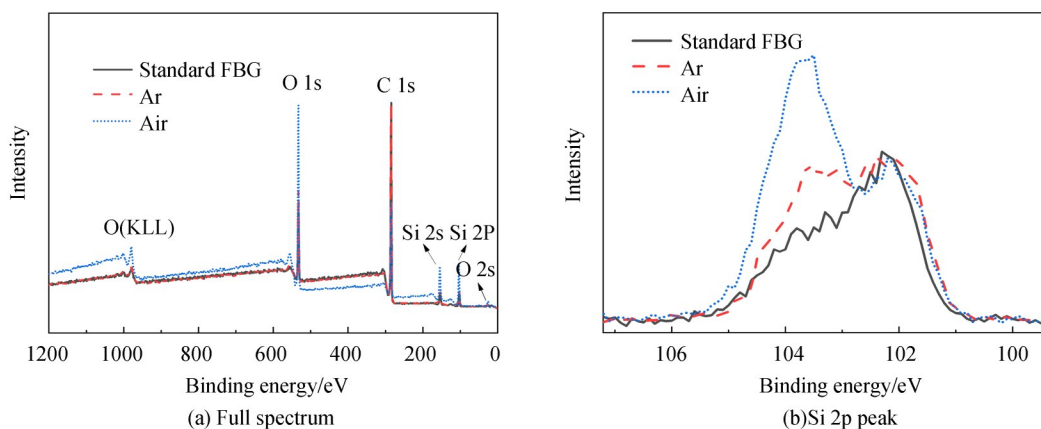


图8 三个样品的 XPS 光谱

Fig. 8 XPS spectra of three samples

对三个样品的 Si 2p 峰分峰处理, 分峰图如图 9.  $103.47\text{ eV}$  为  $\text{SiO}_2$  的特征峰,  $102.1\text{ eV}$  为  $\text{Si}_2\text{O}_3$  的特征峰. 特征峰下所包络的面积占总面积的百分比即为该成分在样品中的含量. 文献[17]中报道, 硅的氧化物含氧量越高, 密度越大, 机械强度越高. 结合表 1 可知, 高温处理会将标准 FBG 中的  $\text{Si}_2\text{O}_3$  氧化.

考虑到  $\text{SiO}_2$  为更稳定的氧化态, 而高温退火后的 RFBG 脆性反而增大了. 故可推论: 高温退火使 FBG 内  $\text{Si}_2\text{O}_3$  氧化成  $\text{SiO}_2$  并非导致光纤脆性增大的主要原因. 结合之前的应力分析认为, 光纤经过高温处理其脆性主要原因为物理结构的改变, 即光纤的应力松弛. 高温使得光纤内部的取向变小, 内部压应力与拉伸应力都减小, 导致结构不如原始光纤紧密, 使得机械性能降低, 脆性增大. 光纤内部存在  $\text{Si}_2\text{O}_3$  成因有: 1) 光纤从预制棒拉制成光纤时, 预制棒首先在  $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$  下被熔融, 拉制过程是在石墨炉中进行, 石墨炉内部充斥惰性保

护气体.由于 $\text{SiO}_2$ 是原子晶体,熔融后共价键被破坏,且光纤内部为无氧环境,部分Si-O键形成了 $\text{Si}_2\text{O}_3$ .2)由于光纤在1383 nm处的水峰处有较大衰减,工业化生产中会对光纤氧化处理以减少水峰的生成.氩具有还原性,将 $\text{SiO}_2$ 还原成 $\text{Si}_2\text{O}_3$ .

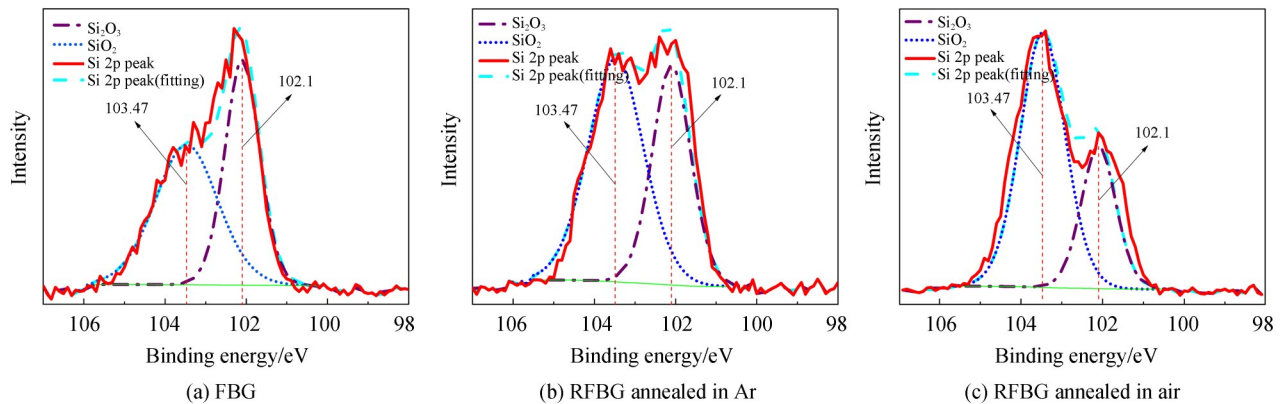


图9 三个样品Si 2p的分峰图  
Fig. 9 Si 2p peak of three samples

表1 高温退火后样品中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_2\text{O}_3$ 含量

Table 1 The content of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_3$  in the sample after high temperature annealing

Sample	$\text{SiO}_2$ / %	$\text{Si}_2\text{O}_3$ / %
FBG	52.99	47.01
RFBG annealed in Ar	59.42	40.58
RFBG annealed in air	69.92	30.08

### 3 结论

本文采用单模石英光纤,通过改变RFBG的制备条件来探究退火前后FBG与RFBG的变化,并推测FBG退火后机械强度变差的原因.当改变热退火温度时,发现高温会导致RFBG内部应力松弛,且热退火温度越高,RFBG的应力松弛程度越大.其次,研究发现降温速度对RFBG应力分布无明显影响.最后,研究了高温退火环境气氛对RFBG轴向应力的影响,发现高温退火使FBG中的 $\text{Si}_2\text{O}_3$ 氧化成 $\text{SiO}_2$ ,尽管 $\text{SiO}_2$ 的机械强度强于 $\text{Si}_2\text{O}_3$ ,但是高温退火后RFBG的机械强度反而降低.由此推测,影响高温退火后RFBG的机械性能下降的主要原因可能是应力松弛.该研究结果可在光纤拉制过程以及后续退火过程中减少脆性提供理论和实验依据.为进一步增加光纤机械强度,本文有两点设想:1)考虑到光纤拉丝时,从预制棒到光纤经受高温的时间很短(几秒量级),而FBG重生过程中通常需要200 min.由此推测:通过快速升温及减少FBG的热退火重生时间,可以增大其机械强度.2)光纤拉丝中,拉丝速度、拉丝温度等参量均会对光纤的损耗有影响,但是鲜有关于这些参量对光纤机械强度的影响的研究报道.因此,改变光纤拉制过程中的某些参量,探索其对光纤机械性能影响,具有重要的理论意义和实用价值.

**致谢** 感谢江苏亨通光电股份有限公司提供的光纤和轴向应力的测试,以及光纤拉丝过程的技术讨论.

#### 参考文献

- [1] JIANG De-sheng, 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.
- [2] JIANG De-sheng, LI Jian-zhi, MEI Jia-chun. Temperature sensing properties of multimode fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 32-35.  
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): 32-35.
- [3] MIHAILOV, STEPHEN J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. *Sensors*, 2012, **12**(12): 1898-1918.
- [4] FOKINE M. Thermal stability of chemical composition gratings in fluorine-germanium-doped silica fibers [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(12): 1016-1018.
- [5] BANDYOPADHYAY S, CANNING J, STEVENSON M, et al. Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-

- codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm.[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16): 1917-1919.
- [6] WANG Tao, SHAO Li-yang, CANNING J, *et al.* Regeneration of fiber Bragg gratings under strain[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(10): 2080-2085
- [7] YANG Hang-zhou, QIAO Xue-guang, 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
- [8] LINDNER E, CHOJETZKI C, BRÜCKNER S, *et al.* Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12523-12531.
- [9] COOK K, SHAO Li-yang, CANNING J. Regeneration and helium: regenerating Bragg gratings in helium-loaded germanosilicate optical fibre[J]. *Optical Materials Express*, **2**(12): 1733-1742
- [10] CANNING J, COOK K, LANCRY M, *et al.* Regenerated femtosecond fibre Bragg gratings[C]. SPIE 2012, **8351**(9): 36-41.
- [11] CELIKIN M, BARBA D, TAGZIRIA K, *et al.* Enhanced stability of higher UV-densified Fiber Bragg Gratings after thermal regeneration[J]. *Optics Communications*, 2019, **435**: 345-349.
- [12] 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.
- [13] CELIKIN M, BARBA D, BASTOLA B, *et al.* Development of regenerated fiber Bragg grating sensors with long-term stability[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(19): 21897.
- [14] TU Yun, YE Lin, ZHOU Shao-ping, *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): 431-449.
- [15] ZHANG Yu-min, MENG Fan-yong, SONG Yan-ming, *et al.* Characterization of metallic-packaging fiber Bragg grating sensors with coated and bare fibers[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(6): 1426-1432.
- [16] BASHOUTI M Y, PIETSCH M, SARDASHTI K, *et al.* Nanowires-recent advances || hybrid silicon nanowires: from basic research to applied nanotechnology[M]. America: Intech, 2012: 178-210
- [17] WU Wen-fa, CHIOU B S. Optical and mechanical properties of reactively sputtered silicon dioxide films [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1996, **11**(9): 1317-1321.