

文章编号: 0253-2239(2010)08-2214-05

高频 CO₂ 激光脉冲写入光子晶体光纤长周期光栅的高温退火特性研究

段德稳¹ 饶云江^{1,2} 柯涛¹ 徐敏¹

¹ 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

² 电子科技大学通信与信息工程学院宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 报道了高频 CO₂ 激光脉冲在无限截止单模光子晶体光纤上写入的长周期光纤光栅的高温快速退火特性。实验发现以大约 600 °C 为转折点, 在退火温度低于 600 °C 时, 退火后的光栅谐振峰在低于退火温度的高温环境中的温度响应和应变响应都不稳定, 线性度和重复性都较差; 而在退火温度高于 600 °C 而低于 700 °C 时, 退火后的光栅谐振峰在低于退火温度的高温环境中的温度响应和应变响应都很稳定, 线性度和重复性也很好。如果将光栅加热到更高温度时, 光栅会被慢慢部分擦除掉。通过对 CO₂ 激光脉冲在光纤上写入光栅过程引入光纤轴向不均匀的应力在不同高温下释放效率和程度的分析, 对该现象进行了解释。

关键词 光子晶体光纤; 长周期光纤光栅; CO₂ 激光

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2214

Study on High-Temperature Annealing Behavior of CO₂ Laser Pulse-Induced Long-Period Fiber Grating in a Photonic Crystal Fiber

Duan Dewen¹ Rao Yunjiang^{1,2} Ke Tao¹ Xu Min¹

¹ Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

² Key Laboratory for Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract High temperature fast annealing behavior of CO₂ laser pulse induced long-period fiber grating (LPFG) in an endless single-mode photonic crystal fiber (ESM-PCF) was studied. The experiment shows that the turning temperature is about 600 °C. When the annealing temperature is lower than 600 °C, the annealed ESM-PCF LPFG's temperature response and tensile strain response are both unstable when the ambient temperature is lower than the annealing temperature. And both the linearity and the repeatability of the responses are poor. When the annealing temperature is between 600 °C and 700 °C, the annealed ESM-PCF LPFG's temperature response and tensile strain response are both stable with good linearity and repeatability when the ambient temperature is lower than the annealing temperature. When the temperature goes higher, the grating will be gradually and partly erased. This can be explained by the releasing stress induced in the grating writing process and fused silica structure change when heated.

Key words photonic crystal fiber(PCF); long-period fiber gratings; CO₂ laser

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(60537040)、重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)“211 工程”三期建设项目(S-09112)资助课题。

作者简介: 段德稳(1981—)男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤器件方面研究。E-mail: ddw@cqu.edu.cn

导师简介: 饶云江(1962—)男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信及传感等方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu.edu.cn(中国光学学会会员号: 4009074)

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)^[1~5],作为能将特定波长的基模耦合到包层的通信器件和传感器件,已被广泛研究。光子晶体光纤(PCF)^[6,7],因其结构设计灵活,可实现光学特性的剪裁可控而成为国内外研究热点。在PCF上写入的LPFG,与在传统标准单模光纤上写入的LPFG相比,具有一些新的特性,如温度不敏感、负的应变系数等,为解决通信和传感问题提供了新的契机。C. Zhao等^[9]用其作为温度的FBG解调核心器件,Y. Wang等^[10]用其作为低温度交叉敏感应变传感器。在PCF上LPFG的写入方法,主要有CO₂激光、电弧放电、飞秒激光、紫外照射、机械及声波诱导等。其中,以CO₂激光^[11]写入最为灵活方便,研究最多。然而国内外对用CO₂激光在PCF上写入LPFG的研究多为写入方法以及低温温度、应变和折射率特性等研究,对其高温退火特性研究尚未见报道。通过对用CO₂激光在无限截止单模PCF上写入的LPFG(ESM-PCF LPFG)的高温快速退火实验研究,发现退火温度在特定温度范围可以大大提高LPFG在低于退火温度的稳定性,如高温温度、应变

响应的线性度和重复性。这对该类LPFG在高温环境中的应用具有很大的参考价值 and 实际意义。

2 ESM-PCF LPFG 制作

光栅制作采用的PCF为商用去涂敷层的PCF裸纤(ESM-12-0-1, Crystal Fibre)。采用的高频CO₂激光写入方法与在普通标准单模光纤上写入LPFG的方法^[4,11]基本相同,只在写入能量上做了微调。用高频CO₂激光制作了两类ESM-PCF LPFG用于退火实验测试。一类是通过低能量多次激光脉冲扫描写入。所用CO₂激光参数为:频率为6 kHz、平均能量约为5 W、能量密度约为5 J/mm²。写制的光栅没有观察到对PCF光纤结构的破坏,类似K. Morishita等^[8]用电弧放电在PCF上制作的LPFG。另一类是通过高能量激光脉冲一次扫描写成的,所用CO₂激光参数:频率为6 kHz、平均能量约为8 W、能量密度约为8 J/mm²。PCF光纤的结构破坏很严重,类似Y. Wang等^[10]在PCF上制作的LPFG。制作的两类ESM-PCF LPFG显微照片和透射谱如图1所示。

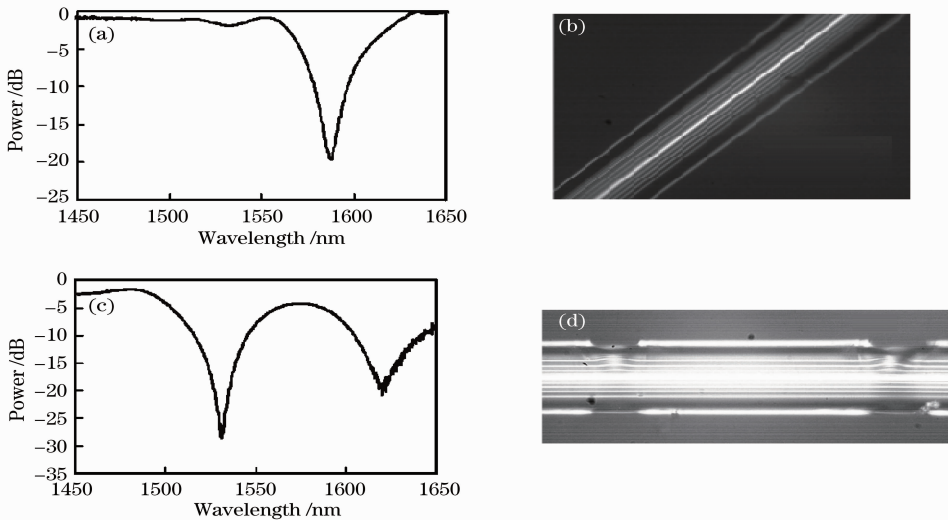


图1 CO₂激光写制的ESM-PCF LPFG。低能量60次扫描写制的LPFG(a)透射谱图及(b)显微照片;

高能激光一次扫描写成的LPFG(c)透射谱图和(d)显微照片

Fig.1 ESM-PCF LPFG induced by CO₂ laser. (a) Transmission spectrum of LPFG by lower intensity laser pulses with 60 scanning cycles (b) and its microscope image; (c) transmission spectrum of LPFG by high intensity laser pulses with 1 scanning cycle and (d) its microscope image

3 ESM-PCF LPFG 高温退火实验

高频CO₂激光写制的ESM-PCF LPFG退火特性实验装置如图2所示,将光栅穿过高温炉拉直后一端固定在光学平台上,另一端固定在微动台上,并通过微动台施加一定预应力保持整个光栅呈水平

拉直状态。实验中,通过改变高温炉的温度,同时以宽带光源为输入,用光谱分析仪监测光谱变化。

首先进行高温退火特性测试的是低能量多次激光脉冲扫描写制的LPFG。将周期为500 μm,45周期的LPFG放入高温退火测试装置。将温度从

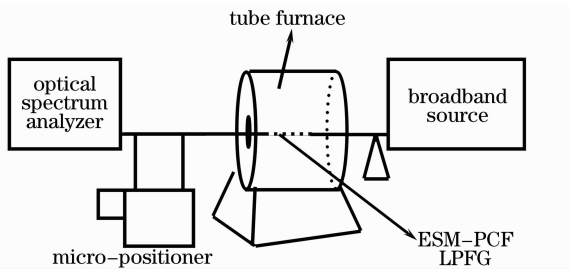


图 2 ESM-PCF LPGA 高温退火特性测试系统

Fig. 2 ESM-PCF LPGA high-temperature annealing behavior test system

100 °C 以每步 50 °C 升至 450 °C, 待温度稳定后再将其以每步 50 °C 降到 100 °C 以后再回升到 450 °C。在每个温度点上, 都保持一定时间待高温炉温度稳定后再由光谱仪采集光栅透射谱。温度升降过程中光栅谐振峰对温度的响应如图 3 所示。同样, 将另一根 LPGA (周期为 500 μm , 45 周期) 从 100 °C 以每步 50 °C 升温至 600 °C, 待温度稳定后再以每步 50 °C 将其降到 100 °C, 再在室温下保持一天, 第二天进行同样的过程。温度升降过程中光栅谐振峰对温度的响应如图 4 所示。从图 3 和 4 可以看出后者退火后高温温度响应线性度和可重复性明显好于前者。

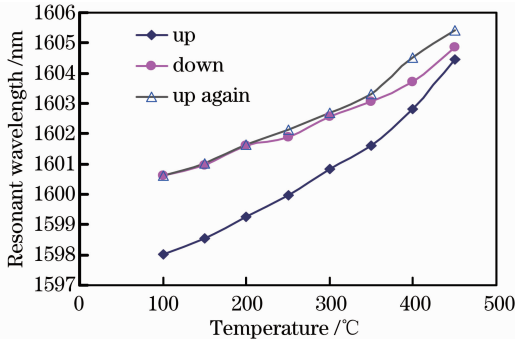


图 3 LPGA 高温退火过程中和退火后谐振峰对温度的响应, 退火温度为 450 °C

Fig. 3 LPGA resonant wavelength shift versus the temperature in high temperature annealing process and after it while annealing temperature is 450 °C

同时, 还用图 2 所示装置对该类光栅做了退火前后高温应变测试。测试过程中, 按前述放置好光栅后通过旋转微动台对光纤引入和释放轴向应力。一根周期为 550 μm , 45 周期的 LPGA 的实验结果如图 5 和 6 所示。其中, 图 5 为该根光栅在进行退火处理前在 500 °C, 550 °C, 600 °C 和 700 °C 四个温度点应变响应。图 6 为该光栅被加热到 700 °C 后冷却到室温后再升到 600 °C 点应变响应。从图 5 和 6 可以看出谐振峰随应变的增加而向短波方向移动, 这与其他研究者对该类光栅在低温时的应变响应得

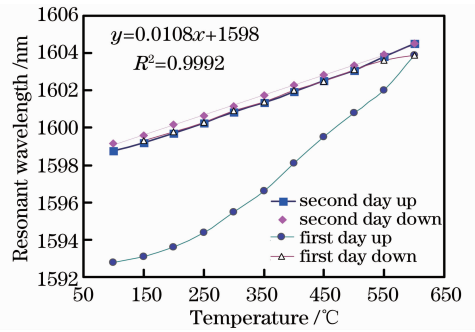


图 4 LPGA 高温退火过程中和退火后谐振峰对温度的响应, 退火温度为 600 °C

Fig. 4 LPGA resonant wavelength shift in high temperature annealing process and after it while annealing temperature is 600 °C

出趋势相同^[9,10]。退火后其高温应变响应线性度和重复性比在传统标准单模光纤上写的 LPGA^[2] 好。退火后高温下应变响应线性度和可重复性明显好于退火前。

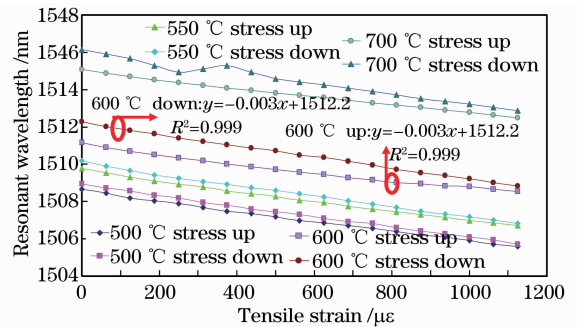


图 5 ESM-PCF LPGA 退火前谐振峰的应变响应

Fig. 5 ESM-PCF LPGA LPGA resonant wavelength versus tensile strain before annealing

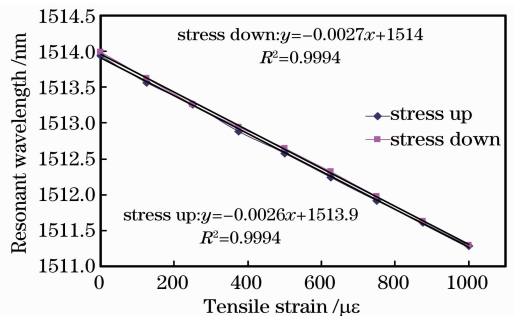


图 6 ESM-PCF LPGA 700 °C 退火后在 600 °C 时谐振峰的应变响应

Fig. 6 ESM-PCF LPGA resonant wavelength versus tensile strain at 600 °C after annealing temperature goes up to 700 °C

4 讨 论

我们对多根光栅, 包括用高能量激光脉冲一次

扫描写入光纤结构破坏严重的 ESM-PCF LPFG 进行了快速退火实验,得到的结果趋势相同:在退火温度低于 600 °C 时,退火后光栅谐振峰在低于退火温度时高温温度和应变响应线性度差,重复性也很差;当退火温度高于 600 °C 时,退火后光栅在低于退火温度环境中谐振峰高温温度和应变响应线性度及重复性变好。可见,经过不低于 600 °C 退火可以极大提高光栅的稳定性,以及光栅谐振峰高温温度和应变响应的线性度及可重复性。

为探明其原因,将未经 500 °C 退火的光栅置于 500 °C 中保持 3 h,冷却到室温后再升温至 500 °C,发现其温度漂移仍比较大,如图 7 所示。对应右边轴的漂移曲线是经过左边曲线过程(在 500 °C 保持 3 h 后冷却到室温)后再置于 500 °C 时的反应。而经退火温度 600 °C 退火后的光栅放于 500 °C 没有观察到谐振峰随时间的漂移。

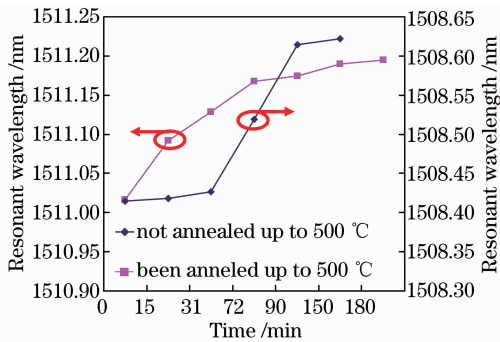


图 7 ESM-PCF LPFG 谐振峰在 500 °C 点随时间的漂移

Fig. 7 ESM-PCF LPFG resonant wavelength shift with time at the temperature of 500 °C

对该实验结果,我们认为主要由光栅写入过程熔融硅结构改变引入的应力在各温度的释放效率和程度不同导致的。在 ESM-PCF LPFG 写入过程中,CO₂ 激光脉冲对光纤进行局部迅速加热再冷却^[11],会导致光栅写入点熔融二氧化硅密度下降^[8],引起折射率在光纤轴向扰动而形成光栅。这个过程在光子晶体光纤中引入了光纤轴向不均匀的应力,在高温加热时,伴随着熔融硅黏稠度改变,该应力会缓慢释放,从而导致光栅谱线不稳定。而熔融硅中的微晶结构在 573 °C 时将从 α -石英转化成 β -石英,此过程石英的密度、Si-O 键角度和距离都会改变^[12],从而在高于 573 °C 时光栅写入过程中引入的应力释放加速、程度加大。图 5 也证明了这一点:在应变往复持续时间基本相等情况下,当应变恢复到 0 时,500 °C,550 °C 谐振峰的漂移比 600 °C,700 °C 时要小得多,也就是在基本相同时间内,光栅

在 500 °C,550 °C 应力释放比在 600 °C,700 °C 时释放得少得多。

同时对制作的光栅直接从室温加热到 1000 °C,发现在高于 650 °C 后光栅谱线开始不稳定,漂移方向混乱,而高于 700 °C 后光栅被慢慢部分擦除,在 1000 °C 光栅谱线已经很弱而凌乱。

5 结 论

对用高频 CO₂ 激光脉冲在 ESM-PCF 上写入的 LPFG 高温快速退火实验表明,退火温度为 600 °C 左右是一个转折温度,低于该温度退火后 LPFG 稳定性较差,高温温度和应变性能提高不大,而高于该温度经较短时间退火能极大提高 LPFG 在低于退火温度时高温环境中谐振峰温度响应和应变响应的线性度及可重复性。在高于 650 °C 后 LPFG 谱线开始不稳定,并被慢慢擦除。应用石英晶型在 600 °C 左右转变引起 LPFG 写入过程的应力释放的效率和程度变化分析了该退火过程,这将有利于掌握该 LPFG 在高温环境的特性,为其通信和传感应用提供坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 2 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 389~392
王久玲,饶云江,朱涛. 截面折变非对称型长周期光纤光栅高温应变特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 389~392
- 3 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjing *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1129~1133
宋韵,朱涛,饶云江等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1129~1133
- 4 Y. J. Rao, T. Zhu, Z. L. Ran *et al.*. Novel long-period fibre gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fibre communication[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1): 209~221
- 5 Wang Ruokun, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Polarization-dependent loss of long-period fiber grating fabricated by dual-side exposure method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1409~1413
王若崑,饶云江,朱涛等. 双面曝光长周期光纤光栅偏振相关损耗[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1409~1413
- 6 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 7 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Cui Li. Analysis of mode properties of photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1379~1383
张晓娟,赵建林,崔莉. 一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1379~1383

- 8 K. Morishita, Y. Miyake. Fabrication and resonance wavelengths of long period grating written in a pure silica photonic crystal fiber by the glass structure change [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 625~630
- 9 C. Zhao, M. Demokana, W. Jin *et al.*. A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276** (2): 242~245
- 10 Y. Wang, L. Xiao, D. Wang, W. Jin. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(23): 3414~3416
- 11 H. Lee, K. Chiang. CO₂ laser writing of long-period fiber grating in photonic crystal fiber under tension [J]. *Opt. Express.*, 2009, **17**(6): 4533~4539
- 12 A. Earnshaw, N. Greenwood. Chemistry of the Elements (2nd edition)[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 343~345