

利用高温金属胶在 200 °C 下制备长周期光纤光栅

宋大伟^{1,2} 赵雯¹ 刘艳磊² 张安娜² 张建中^{1,2} 孙伟民^{1,2} 苑立波²

¹哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

²哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 给出了一种新型的制作长周期光纤光栅方法。在 200 °C 高温下, 利用高温金属胶将光纤粘贴到周期性波纹金属状结构上, 当该器件降温到常温时, 长周期光纤光栅形成。测试了该类光栅的温度特性, 发现了光栅光谱谐振峰随温度调节而改变, 并讨论了其机理。该器件可以用于实现可调谐滤波器和衰减器等器件。最后探讨了改变光纤直径易于成栅。

关键词 光纤光学; 长周期光纤光栅; 光纤滤波器; 高温金属胶

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.050603

Long Period Fiber Grating Fabricated at 200 °C Based on High Temperature Metal Glue

Song Dawei^{1,2} Zhao Wen¹ Liu Yanlei² Zhang Anna² Zhang Jianzhong^{1,2}
Sun Weimin^{1,2} Yuan Libo²

¹College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

²Key Laboratory of In-Fibre Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract A novel way to make long period fiber grating is proposed. Attaching fiber on a periodic ripple metal structure by high temperature metal glue at 200 °C, a long period fiber grating is fabricated when the temperature of the combined structure declines to room temperature. The temperature characteristics of this kind of grating are tested, and the change of resonance peak for grating spectrum in different temperatures is discovered and its mechanism is discussed. This kind of grating can be used as optical fiber filter and optical fiber attenuator. At last, the easier grating realization by changing the diameter of optical fiber is also discussed.

Key words fiber optics; long period fiber grating; optical fiber filter; high-temperature metal glue

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2340

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是由 Vengsarkar 等^[1]在氢载硅锗光纤中利用紫外光制成的。不同于短周期光纤光栅, LPFG 是满足相位匹配条件的同向传输的纤芯基模和包层模之间的耦合, 能量从纤芯传递到包层模中, 最终在 LPFG 透射谱中产生谐振损耗峰。长周期光纤光栅有更好的应变、弯曲、温度、折射率灵敏度^[2-3]。在理论方面, Erdogan^[4]利用耦合模理论给出了 LPFG 中模式耦合、模场分布以及透射光谱特性。王目光等^[5]给出了复合型双周期光纤光栅的分析模型, 模拟了频谱响应特性。Shu 等^[6]运用上述理论分析了 LPFG 高阶模模式耦合特性, 为实现更高的参数灵敏度提供了理论分析。随着 LPFG 理论分析研究的逐步深入, 很多学者开始利用研究普通 LPFG 耦合模的方法来分析一些特殊结构的长周期光纤光栅^[7-8]。LPFG 的耦合模理论引导人们尝试各种实现长周期光纤光栅制备的方法, 包括振幅掩模写入法^[1]、CO₂激光脉冲写入法^[9-11]、机械

收稿日期: 2014-05-15; 收到修改稿日期: 2014-06-30; 网络出版日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11178010, 61377096)、黑龙江省青年骨干教师支持计划(1253G018)、哈尔滨市留学基金(2011RFLXG004)、中央高校基础研究基金

作者简介: 宋大伟(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: songdawei@hrbeu.edu.cn

导师简介: 张建中(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

微弯法^[12-13]、电弧放电电极法^[14-15]、声光调制法^[16-17]等。这些方法都各有优势,制备长周期光纤光栅的原理也不相同,因此制备的LPFG特性各不相同。

制备长周期光纤光栅除了上述的常规方法外,很多研究人员在这基础上探寻新方法以满足实际需求。在常规机械微弯形变方法的基础上,Lin等^[18]利用紫外固化胶制作应力实现热调谐长周期光纤光栅,利用紫外胶将腐蚀过包层的光纤粘贴到镀有聚酰亚胺薄膜的周期性刻槽上,不同温度下薄膜、光纤、刻槽的热膨胀系数不同,应力引发的折射率调制不同,透射谱中谐振波长处损耗值也就不同。在此思想下,本文提出了一种更简便的长周期光纤光栅制备方法,即利用高温金属胶和周期性金属波纹在200℃下粘贴、冷却固化。由于金属结构的热膨胀系数与光纤的热膨胀系数相差较大,能够实现很强的折射率调制,更易于实现光纤光栅制备。文中给出了利用该方法制备的长周期光纤光栅的特性,讨论其潜在应用。

2 基于波纹状结构热调谐长周期光纤光栅制作、测试与分析

这里主要讨论一种新型的方法,用高温金属胶将光纤粘贴到周期性波纹状结构上,通过应力作用形成损耗可调谐的长周期光纤光栅。图1是实验中所用的周期性波纹状钢片结构,其结构周期为600 μm,40个周期,刻痕的深度约为1 mm。采用此周期根据计算可以使其满足相位匹配条件,保证在1520~1613 nm范围内出现纤芯基模和包层模的谐振现象。制作LPFG的装置图如图2所示。

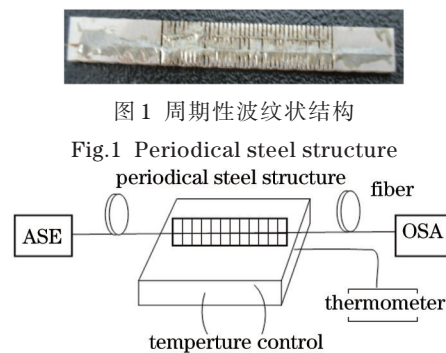


图1 周期性波纹状结构

Fig.1 Periodical steel structure

图2 基于波纹状结构的热调谐长周期光纤光栅制作装置图

Fig.2 Thermal tuning LPFG fabrication setup based on periodical steel structure

具体制作方法如下:取一段单模光纤,将光纤中间部分去掉涂覆层(去掉涂覆层的长度大约等于贴片的长度),光纤两端分别连接宽谱光源(ASE)和光谱分析仪(OSA),固定光谱仪的扫描带宽为1510~1613 nm、扫描精度为0.2 nm,记录一组ASE光谱数据;将加热炉与温度计连接好,将加热炉的功率开关保持在中等位置,保证加热板的温度稳定上升,把周期性结构的钢贴片放置于加热板上,当温度显示为170℃时,利用高温金属胶将去掉涂覆层的光纤部分粘贴到钢片上,在涂胶的过程中要注意按照贴片的周期性结构来点,不要将胶涂成一片,涂成一片将导致较弱的周期调制效果,降低调制的对比度,影响LPFG制作效果;当继续升高温度至200℃左右,保持15 min,此种高温胶固化。固化后逐渐降温,图3显示的是随着温度的缓慢降低产生的长周期光纤光栅效应。温度降低,贴片的收缩程度增大,光纤受到的周期性应力也随之增大,导致耦

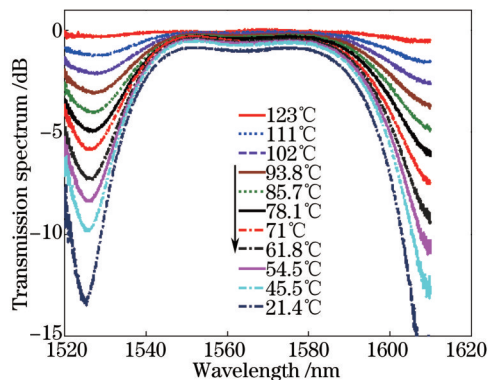


图3 不同温度下的长周期光纤光栅透射谱

Fig.3 LPFG transmission spectra at different temperatures

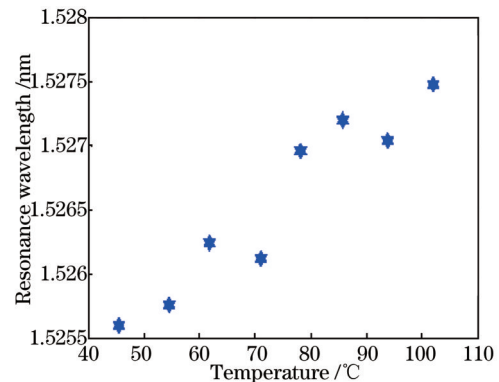


图4 谐振波长随温度的变化

Fig.4 Resonance wavelength versus temperature

合程度增大,谐振峰凹陷也越来越明显。当温度降低到室温时,凹陷最深,损耗峰峰值为 -14 dB。该性质显然可以方便廉价地用于实现可调节衰减器功能。在温度降低的过程中,谐振峰向左漂移,如图4所示,该性质可以用于可调谐滤波器。但谐振波长并不是严格按照线性关系发生蓝移,谐振波长发生左右跳动,这是由于在不同的温度下,钢片、金属胶与光纤应力的释放程度不同,导致折射率调制深度不同。

将其在室温下放置一段时间后,残余应力逐渐得到释放,凹陷会变得较浅,如图5所示。图5为放置24 h后的长周期光纤光栅透射谱。实验过程中还通过缓降至常温和骤降至常温这两种情况,产生长周期光纤光栅效应。图6表示温度缓降和骤降带来的2种不同的长周期光纤光栅效应,从图中可以明显地看出,两种条件下产生的凹陷深度不同,纤芯导模与包层模的耦合强弱变化显著。这是因为温度骤降时,贴片的温度前后相差很大导致其瞬间收缩,对光纤施加的应力不同于缓慢降温。而温度缓慢降至室温的过程中,贴片温度慢慢降低,光纤受到的应力慢慢释放的过程也不同。通过控制降温条件,一定程度上可以实现耦合强度控制。

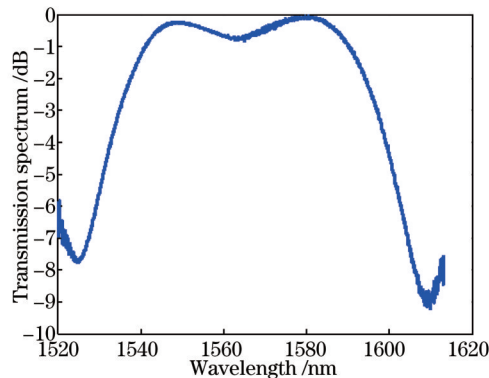


图5 常温放置24 h的透射谱

Fig.5 LPFG transmission spectrum after 24 h

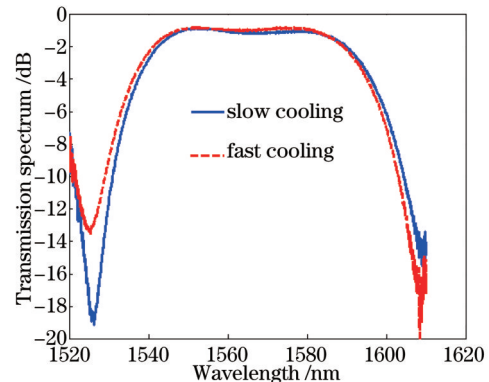


图6 骤降和缓降温度的长周期光纤光栅透射谱对比

Fig.6 LPFG transmission spectral comparison between fast and slow cooling

为了进一步提高光栅写入效率,可以通过减小光纤直径来实现。采用体积浓度为40%的氢氟酸(HF)对单模光纤包层进行腐蚀,以减小包层厚度。将几根光纤中间部分去掉涂覆层,去掉涂覆层部分的长度大约等于贴片的长度,将去掉涂覆层的光纤部分浸泡在HF中进行腐蚀,经实验测定,所用HF的腐蚀速率约为 $-1.5 \mu\text{m}/\text{min}$ 。分别将光纤腐蚀6,9,15 min,腐蚀后包层的半径分别为53.5,49,40 μm 。按照上面描述的制作基于波状结构的热调谐长周期光纤光栅方法,完成上述光纤半径的长周期光纤光栅的制作。图7直观地反映了不同包层半径的长周期光纤光栅效应。

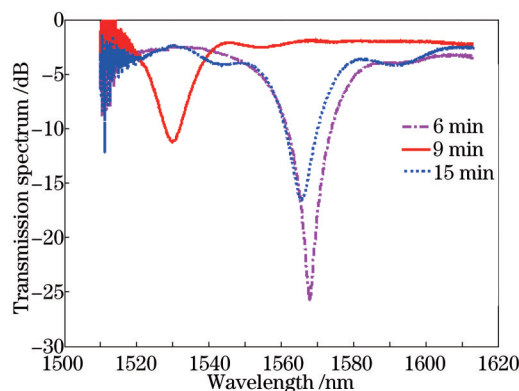


图7 腐蚀后光纤制备的长周期光纤光栅透射谱

Fig.7 LPFG transmission spectra based on the corroded fiber

从图7和实际的操作中发现,随着包层半径的减小,谐振波长并不是总向着长波方向漂移。腐蚀光纤直径对纤芯模式影响较小,但对光栅的包层模式影响较大,相同模式的传输常数将发生改变,这是导致谐振波长变化的主要原因。同时由于用高温胶封装光纤时,每次点胶的力度不同导致对光纤折射率调制的深度不同,耦合系数发生改变,对谐振凹陷强度产生影响。图7中出现的谐振波长漂移是由于包层半径变化和折射率调制深度不同这两个因素共同作用的。显然通过调整光纤直径,可以实现更深透射凹陷。

对腐蚀过包层的光纤制作的 LPFG 进行了温度特性的测试。图 8(a)、(b)为分别腐蚀 9 min 与 15 min 的 LPFG 光谱对比。将高温封装后立即降至室温产生的光谱和降温后放置 24 h 后的光谱进行对比,同未腐蚀结构的现象一样,放置一段时间,凹陷逐渐变浅。24 h 后透射光谱变得长时间稳定。这同没有腐蚀的光纤现象相同,主要是长时间放置导致应力释放的结果。

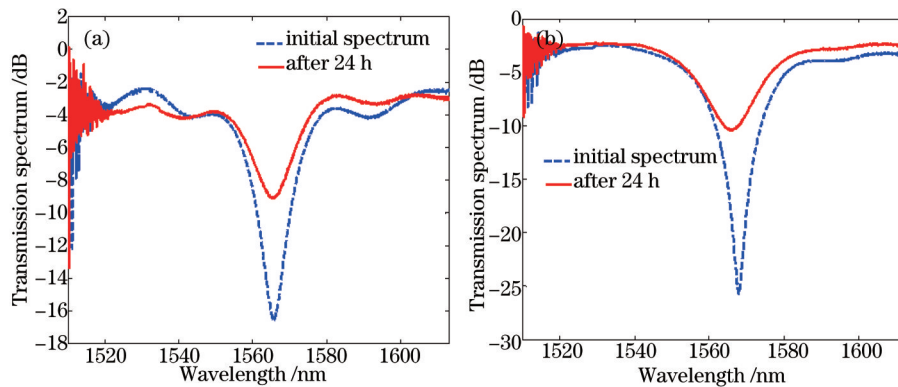


图 8 (a) 腐蚀 9 min 光纤制备的 LPFG 光谱; (b) 腐蚀 15 min 光纤制备的 LPFG 光谱

Fig.8 LPFG transmission spectra based on (a) 9 min-corroded fiber and (b) 15 min-corroded fiber

对于腐蚀过包层的 LPFG 进行了具体的温度特性测试实验,在不同的温度下,测试了这种基于波纹结构的热调谐 LPFG 透射谱特性,如图 9 所示。

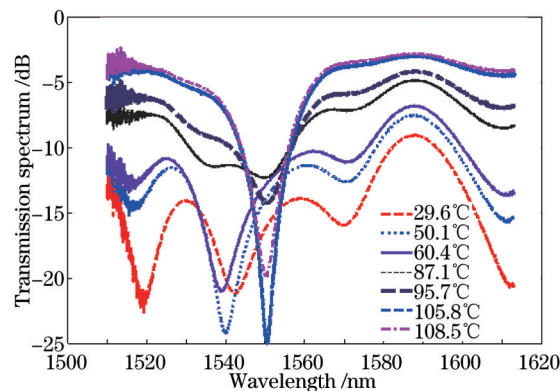


图 9 不同温度下包层半径为 $44.5 \mu\text{m}$ 的 LPFG 透射谱

Fig.9 Transmission spectra of LPFG based on fiber with the radius of $44.5 \mu\text{m}$ in different temperatures

由图 9 可知,温度较低时,光栅透射谱中出现几个凹陷,整个透射谱损耗较大。随着温度的逐渐升高,到达 90°C 左右时,光栅透射谱中主要只有一个凹陷。当到达约 100°C 此凹陷最深。温度继续增加,凹陷再次变浅。产生如此特征的主要原因为:当温度很低时,光纤受到的应力调制最大,同时由于光纤芯径腐蚀较小,光纤的弯曲损耗增加,导致整体透射光谱损耗较大。升温过程光纤微弯损耗降低,同时光栅折射率调制逐渐均匀,透射谱由多个凹陷变为单个较深凹陷。温度进一步升高,光纤周期调制变弱,透射凹陷深度降低。

3 结 论

主要讨论了基于波纹状结构热调谐长周期光纤光栅制作方法与特性分析。利用高温金属胶将去掉涂覆层的光纤部分粘贴到钢片上,随着温度的缓慢降低,产生了长周期光纤光栅效应,从而制成长周期光纤光栅。通过温控发现温度骤降时,更易使应力集中,纤芯导模与包层模的耦合现象更显著,透射谱中产生的凹陷更深。该制备方法选择钢片作为衬底,金属胶和光纤不同的热膨胀系数作为折射率调制引入原因,光纤光栅透射谱的性质在很大程度上取决于这些材料。由于金属胶热膨胀系数在较大范围内可调,且具有高温稳定性,使得该光栅器件在方便廉价的可调谐滤波器、衰减器、传感器等方面有着广泛的应用前景。

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 Xuewen Shu, Lin Zhang, I Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 255-266.
- 3 D D Davis, T K Gaylord, E N Glytsis, *et al.*. Very-high-temperature stable CO₂-laser-induced long-period fiber gratings[J]. *Electron Lett*, 1999, 35(9): 740-742.
- 4 T Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- 5 Wang Muguang, Wei Huai, Jian Shuisheng. Experimental and theoretical study on the compound dual-period fibre grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(3): 609-614.
王目光, 魏淮, 简水生. 复合型双周期光纤光栅的理论及实验研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(3): 609-614.
- 6 X Shu, L Zhang, I Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fibre gratings[J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 255-266.
- 7 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi, *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(3): 326-330.
徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化[J]. *光学学报*, 2006, 26(3): 326-330.
- 8 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. The relation between resonant wavelengths and film optical parameters of triple-clad long-period fiber grating[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 177-182.
徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 三包层长周期光纤光栅谐振波长与薄膜光学参数的关系[J]. *光学技术*, 2006, 32(2): 177-182.
- 9 D D Davis, T K Gaylord, E N Glytsis, *et al.*. Long-period grating fabrication with focused CO₂ laser pulses[J]. *Electron Lett*, 1998, 34(3): 302-303.
- 10 Y J Rao, Y P Wang, Z L Ran, *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(5): 1320-1327.
- 11 YiPing Wang, Limin Xiao, D N Wang, *et al.*. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(23): 3414-3416.
- 12 S Savin, M J F Dignonnet, G S Kino, *et al.*. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(10): 710-712.
- 13 In Kag Hwang, Seok Hyun Yun, Byoung Yoon Kim. Long-period fiber gratings based on periodic microbends[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(18): 1263-1265.
- 14 O V Ivanov, P Caldas, G Rego. Origin of coupling to antisymmetric cladding modes in arc-induced long-period fiber gratings[C]. *SPIE*, 2007, 6619: 66910x.
- 15 Paulo Calds, Gaspar Rego, Oleg V Ivanov, *et al.*. Characterization of the response of a dual resonance of an arc-induced long-period grating to various physical parameters[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): 2994-2999.
- 16 Hyo Sang Kim, Seok Hyun Yun, In Kag Kwang, *et al.*. All-fiber acousto-optic tunable notch filter with electronically controllable spectral profile[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(19): 1476-1478.
- 17 Sun Do Lim, Kyung Jun Park, Sunghoon Eom, *et al.*. Ultrawidely tunable single-mode fiber acousto-optic filter[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(7): 1101-1103.
- 18 ChienHung Lin, Qun Li, Amy A Au, *et al.*. Strain-induced thermally tuned long-period fiber gratings fabricated on a periodically corrugated substrate[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(7): 1818-1827.

栏目编辑: 王晓琰