

文章编号: 0258-7025(2008)06-0889-04

基于侧边抛磨与覆盖材料的光纤光栅 温度补偿新方法

陈哲^{1,2} 刘林和^{1,2}

(¹ 重大工程灾害与控制教育部重点实验室, 广东 广州 510632; ² 暨南大学光电工程系, 广东 广州 610632)

摘要 提出并演示验证了将负热光系数的聚合物材料覆盖在侧边抛磨光纤光栅的抛磨区实现光纤光栅温度补偿的新方法。实验结果表明,这种新方法的温度补偿效果良好,封装后的光纤光栅处在 63~79 °C 的环境温度时,可使其温度敏感度降低为未补偿时的 1/16;当处在 58~101 °C 的环境温度时,其温度敏感度降低为未补偿时的 1/4。温度补偿封装后的光纤光栅器件直径只有 2 mm,长度为 20 mm。

关键词 光纤光栅;侧边抛磨光纤;温度补偿;热光材料;覆盖材料

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

Temperature Compensation of Fiber Bragg Grating Based on Side Polishing and Overlay

Chen Zhe^{1,2} Liu Linhe^{1,2}

¹Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering,
Ministry of Education of the People's Republic of China, Guangzhou, Guangdong 510632, China
²Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract A new temperature compensation method of fiber Bragg grating was put forward and experimentally demonstrated based on side polished fiber Bragg grating overlaid with polymer with negative thermo-optic coefficient. Experimental results show that the new method provides a good temperature compensation for fiber Bragg grating. Temperature sensitivity of the fiber Bragg grating packaged by polymer with negative thermo-optic coefficient is reduced to 1/16 of that of fiber Bragg grating without compensation in the range of 63 °C to 79 °C; and to 1/4 in the range of 58 °C to 101 °C. The new device of fiber Bragg grating packaged for the temperature compensation has a diameter of 2mm and length of 20 mm.

Key words fiber grating; side polished fiber; temperature compensation; thermo-optic material; overlay material

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)的布拉格波长会随环境温度的改变而发生漂移^[1~3],这种对温度的敏感性已成为光纤光栅器件在光纤通信和光纤传感领域实用化的主要困扰之一。国内外的多家研究机构对这一问题已经提出了多种补偿方案,较常用的无源补偿方案^[1,4]是选择适当的外封装结构或外封装材料对光纤光栅进行封装,当环境温度改变时,通过封装材料的长度变化改变光纤布拉格光栅所受应力而使

之抵消由温度变化产生的布拉格波长的变化影响,从而达到温度补偿的效果。已有的光纤光栅温度补偿封装方法可以对光纤光栅起到较好的温度补偿作用,但是通常封装工艺比较复杂,而且封装后的器件尺寸比较大。本文根据侧边抛磨光纤光栅的折射率响应特性^[5],提出了一种工艺简单、封装后的器件尺寸较小、具有良好的温度补偿效果的温度补偿新方法,并得到了演示实验的验证。

收稿日期:2007-11-05;收到修改稿日期:2007-11-30

基金项目:国家自然科学基金(10776009),广东省科技攻关重大专项(2004A10602001)和广州市科技计划(2007Z2-D0091)资助项目。

作者简介:陈哲(1957—),男,广东人,教授,博士,主要从事新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计、光学及光电系统计算机仿真等方面的研究。Email:thzhechen@jnu.edu.cn

2 对侧边抛磨光纤光栅进行温度补偿的原理

侧边抛磨光纤光栅是将制备好的光纤光栅的光栅区一侧包层抛磨掉一部分所制成^[5]。图1为侧边抛磨光纤光栅结构示意图。对于普通的光纤光栅,足够厚度的光纤包层保证了其布拉格波长不会因纤芯、包层以外物质的折射率改变而改变。但是,对于侧边抛磨光纤光栅,其一侧的包层厚度由于抛磨已经接近为零,在这个抛磨区再次覆盖的材料折射率的变化,就会引起光纤布拉格波长的改变^[5]。

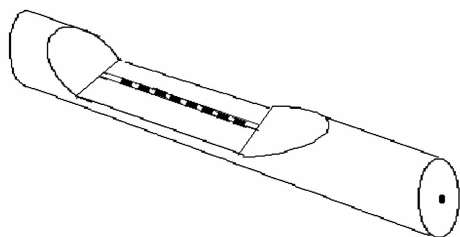


图1 侧边抛磨光纤光栅示意图

Fig. 1 Sketch of the side polished fiber Bragg grating

依据光纤布拉格光栅的模耦合方程,光纤光栅的布拉格反射波长 λ_B 表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为传导模的有效折射率,其数值与光纤光栅区域的几何结构、纤芯材料折射率及包层材料折射率等相关; Δ 为光栅周期。 n_{eff} 和 Δ 受外界环境温度影响而改变:当温度升高时,由于光纤材料自身的热光效应,其有效折射率 n_{eff} 会增加,与此同时,由于热胀冷缩效应,光栅周期 Δ 也会增长,从而使布拉格反射波长 λ_B 向长波长方向漂移,即所谓红移。光栅波长漂移量与温度的改变量成线性关系,可表示为^[6]

$$\Delta\lambda_T = (\alpha_f + \xi)\lambda_B \cdot \Delta T, \quad (2)$$

式中 α_f 为光纤材料的热胀系数, ξ 为光纤的有效热光系数, T 为温度。

对于普通光纤布拉格光栅,(2)式中的 α_f 及 ξ 都为正,二者随温度的变化都导致光栅的布拉格波长红移。而对于一侧的包层厚度被抛磨成只剩 $1 \mu\text{m}$ 左右的侧边抛磨光纤光栅,当在抛磨区再次覆盖其他与原来包层材料不同的材料时,侧边抛磨光纤光栅的热光系数 ξ 就不仅与光纤原有材料的特性有关,而且还与侧边抛磨区再次覆盖的材料特性有关。如果覆盖材料为负热光系数的聚合物材料,则(2)式中的有效热光系数 ξ 就有可能为负值,从而影响布拉格反射波长 λ_B 向短波长方向漂移,即所谓蓝

移。此时,依据(2)式, α_f 的红移作用与 ξ 的蓝移作用相互抵消,就可达到光纤光栅的温度补偿效果。

3 用于温度补偿的器件结构与实验结果

3.1 侧边抛磨光纤光栅的制作

实现覆盖热光材料进行光纤光栅温度补偿的关键是制作侧边抛磨光纤光栅。用弧型槽玻璃基块法制作侧边抛磨光纤时,较难保证整个抛磨区抛磨深度一致^[5],所制作侧边抛磨光纤光栅就会使光栅附近的侧边抛磨区的抛磨深度不一致,容易引起啁啾效应^[7]。由于轮式光纤侧边抛磨法^[8,9]可较好地保证在整个侧边抛磨光纤区域内抛磨深度的一致性,所以采用轮式光纤侧边抛磨法进行侧边抛磨实验。经过大量的工艺研究,采用自主研发的轮式光纤侧边抛磨机对光纤布拉格光栅进行加工,将光纤布拉格光栅的一侧包层抛磨掉长 16 mm ,深 $57.4 \mu\text{m}$ 的一部分,制作成功满足实验要求的侧边抛磨光纤光栅^[5]。

实验中被抛磨的光纤光栅是利用相位掩模法制作的,其参数如表1所示。用放大自发辐射(ASE)光源及光纤光谱仪对光纤光栅侧边抛磨前后的反射谱进行测量。结果显示,侧边抛磨前后相比,抛磨后的光纤光栅的布拉格波长向短波长方向偏移了 0.28 nm 。这表明,由于侧边抛磨后的光纤光栅的外包层的几何结构发生了改变,引起了光栅区的有效折射率发生改变,从而使布拉格波长发生偏移。

表1 用于侧边抛磨的光纤光栅的参数

Table 1 Parameters of FBG used for side polishing experiments

Fiber type	Grating length /mm	λ_B /nm	R at 3 dB /nm
SMF-28e	10	1545.661	0.207

3.2 侧边抛磨光纤光栅对抛磨区折射率的波长响应特性

利用双向光束传播法(Bi-direction BPM),对侧边抛磨光纤光栅的抛磨区覆盖材料的折射率对布拉格波长影响的计算机模拟结果表明^[5],当光纤光栅抛磨区覆盖材料的折射率小于 1.42 时,布拉格波长不随覆盖材料的折射率的改变而变化。当该折射率大于 1.42 后,布拉格波长随着折射率的增大,向长波长方向漂移。当覆盖材料的折射率从 1.42 变化至 1.452 时,布拉格波长的红移约为 1.3 nm 。

用来做温度补偿封装实验的光纤光栅的参数如表2,侧边抛磨前测得其温度敏感度为 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,

是正温度系数,即温度上升,布拉格波长产生红移。

用轮式光纤侧边抛磨法将此光纤光栅一侧的包层抛磨至侧边抛磨面离纤芯外表面只有 $1.2\ \mu\text{m}$,分别用不同折射率值(对应波长为 $1.55\ \mu\text{m}$)的折射率液覆盖在所制成的侧边抛磨光纤光栅的整个抛磨区,测得侧边抛磨光纤光栅的布拉格波长对这几种折射率的响应特性,如图 2 所示。

表 2 用于温度补偿实验的光纤光栅的参数

Table 2 Parameters of FBG used for the experiments of temperature compensation

Fiber type	Grating length /mm	λ_B /nm	R at 3 dB /nm
SMF-28e	10	1545.737	0.206

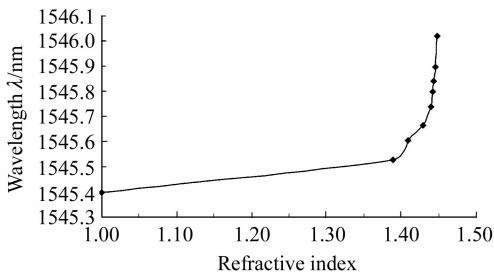


图 2 侧边抛磨光纤光栅的布拉格波长随覆盖在侧边抛磨区的材料不同折射率的变化

Fig. 2 Changes of Bragg wavelength of side polished FBG as the material with different refractive indexes overlaid on the side polished area

从图 2 可以看出,随着光纤光栅抛磨区覆盖材料折射率的增大,布拉格波长向长波长方向漂移。布拉格波长与抛磨区材料的折射率的对应关系是非线性的。在抛磨区材料的折射率值由 1.3897 变化至 1.4298 时,对布拉格波长的影响较小,而且波长调谐灵敏度也较小。当折射率值为 $1.4298\sim 1.4479$ 时,折射率变化对布拉格波长的影响较大,而且波长调谐灵敏度也较大。

理论计算和实验都表明,侧边抛磨光纤光栅的布拉格波长会随着覆盖材料折射率的增大而增大。如果在侧边抛磨区覆盖负热光系数的材料,就会使布拉格波长产生随着温度升高而减小的效果。这样就可以补偿光纤光栅自身具有的温度红移。

3.3 温度补偿封装实验

将侧边抛磨光纤光栅放置在 V 型玻璃槽中,二端用环氧树脂胶固定。胶固化后,选用 Dow Corning 公司的 OE4110 聚合物材料,其热光系数为 $-0.00033/\text{℃}$,将此负热光系数聚合物材料注入 V 型玻璃槽中,使得整个光纤光栅的抛磨区都浸没在负热光聚合物材料中。聚合物经加温固化后,将此

V 型玻璃槽穿入金属套管中用环氧树脂胶固定好,至此,整个封装步骤就已完成。封装后的器件直径只有 2mm ,长度为 20mm ,如图 3 所示。

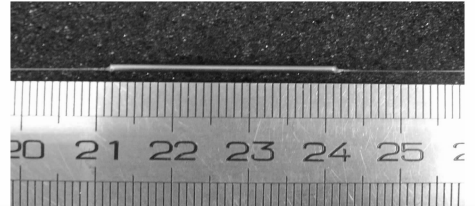


图 3 封装用于温度补偿的光纤光栅器件的照片

Fig. 3 Photograph of the device of fiber Bragg grating packaged for temperature compensation

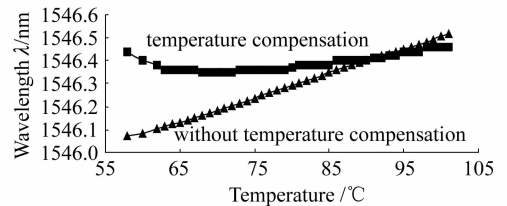


图 4 光纤光栅器件的光波长-温度响应

Fig. 4 Wavelength-temperature responses of the fiber Bragg grating

将封装后的光纤光栅放入温度控制精度为 $0.1\ \text{℃}$ 的微电脑恒温恒湿试验机中进行波长温度响应的测试,测试结果如图 4 所示。

图 4 给出了温度补偿前后光纤光栅的波长随温度的变化曲线。由图 4 可以看出,对光纤光栅进行侧边抛磨并覆盖负热光系数材料封装可以起到较好的温度补偿作用。对于 $73\sim 79\ \text{℃}$ 的温区内的 $6\ \text{℃}$ 温度变化,封装后的光纤光栅布拉格波长都几乎稳定在同一个值下;在环境温度从 $63\sim 79\ \text{℃}$ 的范围内,环境温度改变了 $16\ \text{℃}$,而此封装后的光纤光栅的中心波长只改变了 $0.01\ \text{nm}$,平均温度敏感度为 $0.000625\ \text{nm}/\text{℃}$,与未补偿的光纤光栅相比(温度敏感度为 $0.01\ \text{nm}/\text{℃}$),其温度敏感度降低为原值的 $1/16$;在环境温度从 $58\ \text{℃}$ 增大至 $101\ \text{℃}$ 时(变化 $43\ \text{℃}$),其中心波长只改变了 $0.11\ \text{nm}$,平均温度敏感度为 $0.002558\ \text{nm}/\text{℃}$,可见在 $58\sim 101\ \text{℃}$ 温度区域内,新的温度补偿方法使其温度敏感度降低为原值的约 $1/4$ 。这表明这种温度补偿方法的补偿效果很好。

由于实验中所采用的负热光系数的材料在环境温度小于 $55\ \text{℃}$ 时,其折射率已经大于光纤光栅芯层折射率,因此,光纤光栅中大部分光会从侧边抛磨区泄漏出去,已经测不到反射波峰了。这表明,所选择的负热光系数的聚合物材料还不能够在更大温度范

围内实现温度补偿,但实验已经验证了这种温度补偿方法的可行性。如果选择折射率更合适的负热光系数聚合物材料,将可在更大温度范围内进行补偿。

4 结 论

普通光纤光栅的布拉格波长 λ_B 随温度升高向长波长方向漂移(红移)。提出了一种对光纤光栅进行侧边抛磨并覆盖负热光系数聚合物材料的温度补偿新方法,并进行了实验演示验证。将普通布拉格光纤光栅的一侧包层抛磨掉长 16 mm,深 57.4 μm 的一部分,加工成侧边抛磨光纤光栅。理论仿真及实验得出,侧边抛磨光纤光栅的布拉格波长会随抛磨区材料的折射率的增大向长波长方向变化,基于这一原理采用负热光系数的聚合物材料对侧边抛磨区进行封装可以补偿布拉格波长温度漂移。虽然在此封装演示实验中所采用的负热光系数材料的温度补偿范围还不够大,但封装实验已经验证了这种新方法的可行性。为了使这种新方法应用于更大的温度范围,需要寻找一种折射率值更合适的负热光系数材料。

参 考 文 献

- 1 G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette *et al.*. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30):6859~6861
- 2 Li Zhizhong, Luo Hong, Yang Huayong *et al.*. Side-hole fiber

- grating sensing characteristics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1081~1086
- 李智忠,罗 洪,杨华勇 等. 边孔光纤光栅的传感特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1081~1086
- 3 Li Zhizhong, Zhu Hai, Tang Zhihong *et al.*. Research on fiber Bragg grating side-hole package technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):993~998
- 李智忠,朱 海,汤志宏 等. 光纤光栅边孔封装技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):993~998
- 4 Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun *et al.*. Temperature compensation for fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6):677~678
- 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):677~678
- 5 Liu Linhe, Chen Zhe, Bai Chunhe *et al.*. The effect of refractive index of material overlaid side polished area of FBG on Bragg wavelength [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5):865~868
- 刘林和,陈 哲,白春河 等. 侧边抛磨区材料折射率对光纤光栅波长的影响[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5):865~868
- 6 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 7 Sang-Shin Lee, Ho-Dong Chae, Do-Hwan Kim *et al.*. Continuous photonic microwave true-time delay using a side polished fiber Bragg grating with heating electrode [J]. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 2005, **44**(1):35~37
- 8 Jiang Peifan, Chen Zhe, Zeng Yixin *et al.*. Optical propagation characters of side-polished fibers [J]. *Semiconductor Opto-Electronic*, 2006, **27**(5):578~581
- 江沛凡,陈 哲,曾应新 等. 侧边抛磨光纤的光传输特性研究[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5):578~581
- 9 Bai Chunhe, Chen Zhe, Li Fengli *et al.*. Experimental investigations of transmitting optical power in side-polished fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):1068~1071
- 白春河,陈 哲,李丰丽 等. 侧边抛磨光纤中传输光功率变化的实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):1068~1071