

# 飞秒激光刻写高阶倾斜光纤 Bragg 光栅

陈超<sup>1</sup> 杨先辉<sup>2</sup> 王闯<sup>3</sup> 于永森<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012  
<sup>2</sup> 中国石油集团渤海钻探工程有限公司博士后科研工作站, 天津 300457  
<sup>3</sup> 空军第 62 团, 黑龙江 齐齐哈尔 161000

**摘要** 报道了一种利用飞秒激光微纳加工技术在非敏化单模光纤中制备的高阶倾斜光纤 Bragg 光栅 (HO-TFBG)。倾斜折射率调制是将聚焦的飞秒激光穿过高阶相位掩模板, 并扫描曝光倾斜放置的光纤实现的, 其覆盖了全部纤芯和部分包层。该单一 HO-TFBG 在 1200~1700 nm 波长范围内可形成三组与高阶 Bragg 谐振相对应的“包层模式谐振系列”。因此, 其携带的信息量远高于紫外倾斜光纤 Bragg 光栅 (UV-TFBG), 其功能性更佳, 尤其适用于多传感参数的监控。研究了 HO-TFBG 的折射率、轴向应变和温度等传感特性。此外, 该器件兼具飞秒激光诱导光栅结构的高温稳定性, 其在苛刻环境中的化学和物理传感具有潜力。

**关键词** 光纤光学; 倾斜光纤 Bragg 光栅; 飞秒激光; 相位掩模法; 光纤传感

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0506001

## High-Order Tilted Fiber Bragg Gratings Carved with Femtosecond Laser

Chen Chao<sup>1</sup> Yang Xianhui<sup>2</sup> Wang Chuang<sup>3</sup> Yu Yongsen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China  
<sup>2</sup> Post-Doctoral Research Center of China National Petroleum Corporation Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300457, China  
<sup>3</sup> 62nd Regiment of Air Force, Qiqihaer, Heilongjiang 161000, China

**Abstract** High-order tilted fiber Bragg gratings (HO-TFBG) in non-photosensitized single mode fiber are demonstrated with femtosecond laser micro-nano machining technique. To realize the tilted refractive index modulation in fiber core and partial cladding, a high order phase mask is used to generate periodic light intensity which is focused on to the tilted fiber with a lateral scanning. Using this method, three groups of cladding mode resonances in relation with high order Bragg resonance are detected in the wavelength range from 1200 nm to 1700 nm. Thus it carries more informations compared with ultraviolet tilted fiber Bragg gratings (UV-TFBG), especially in multi-parameters monitoring. The refractive index, axial strain and temperature sensing characteristics of the HO-TFBG are also studied. Besides, due to the femtosecond laser material modification, this device shows a good ability in high temperature stability, which has potentation in chemical and physical sensing in harsh circumstances.

**Key words** fiber optics; tilted fiber Bragg gratings; femtosecond laser; phase mask method; fiber sensing

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 140.7090; 230.4000

## 1 引言

倾斜光纤 Bragg 光栅 (TFBG) 因其光栅平面相

对光纤轴向倾斜, 不仅可以导致纤芯模式之间的耦合, 更能有效地将纤芯模式耦合到包层模式乃至辐

**收稿日期**: 2013-11-13; **收到修改稿日期**: 2013-12-31

**基金项目**: 国家自然科学基金 (91123027)、中国石油集团科研与技术开发项目 (2013E-38-06)、天津市企业博士后创新项目择优资助 (2012-04)

**作者简介**: 陈超 (1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤光栅及激光微纳加工方面的研究。

E-mail: chao.chen61@gmail.com

**导师简介**: 于永森 (1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感、光纤光栅等方面的研究。E-mail: yuys@jlu.edu.cn

射模式中<sup>[1-5]</sup>,这使其兼具均匀光纤 Bragg 光栅 (UFBG) 和长周期光纤光栅 (LPFG) 的双重特性<sup>[2,6-10]</sup>,因此其作为新型光纤传感和光纤通信系统中的重要部件备受关注<sup>[1-5,8,11-12]</sup>,例如灵敏度显著增加的表面等离子体谐振 TFBG 传感器<sup>[13]</sup>和基于 45°TFBG 的宽带可调谐全光纤偏振滤波器<sup>[14]</sup>。TFBG 传统制作方法主要是紫外 (UV) 受激准分子激光技术<sup>[1-6,8-10]</sup>,其光致诱导色心结构产生的折射率变化强烈依赖于光纤光敏性,在高温环境中极易被擦除,并且折射率的正弦调制(最大折变量小于  $10^{-4}$ )受限于饱和效应<sup>[15]</sup>。新兴的超快激光微纳加工技术可以有效地解决这些弊端<sup>[16-22]</sup>,此外,高非线性效应产生的介质击穿将诱导更大的折射率调制(达到  $10^{-3}$  数量级)<sup>[19]</sup>,并呈现非正弦特性,这将易于产生一系列高阶 Bragg 谐振。Grobnic 等<sup>[20]</sup>已经对飞秒激光刻写高阶 UFBG 做了相关研究,其在 1000~1800 nm 波长范围内获得了 6 个高阶 Bragg 谐振,对各阶谐振的温度和应力系数亦进行了估算。而高阶 TFBG (HO-TFBG) 的研究却鲜有报道,仅在文献<sup>[8]</sup>中对飞秒激光刻写 TFBG 做了报道,并基于飞秒 TFBG (fs-TFBG) 实现了苛刻环境中的高温和应变同时测量。但对于 HO-TFBG 的高阶光谱特性和各阶“包层模式谐振系列”的传感特性却尚无系统研究。

本文研制了一种在非敏化单模光纤中利用红外飞秒激光结合高阶相位掩模板(周期为  $3.33 \mu\text{m}$ )制备的 HO-TFBG。倾斜的光栅平面是将光纤相对掩模板倾斜放置,并通过光束扫描曝光技术实现的,形成的光栅结构具有飞秒激光诱导折射率变化的典型高温稳定性。单一 HO-TFBG 器件在 1200~1700 nm 波长范围内,可以观察到三组与高阶 Bragg 谐振相对应的一系列包层模式谐振,并对其折射率、轴向应变和温度等传感特性进行了深入研究。其呈现的多阶“包层模式谐振系列”所携带的信息量远高于 UV-TFBG,可以用于多参数传感领域。

## 2 结构与原理

### 2.1 HO-TFBG 的飞秒激光制备

利用飞秒激光制备 HO-TFBG 的实验装置示意图如图 1 所示,一个钛:蓝宝石再生放大激光系统 (Spectra Physics) 被用于刻写光栅结构,其工作波长  $\lambda_m = 800 \text{ nm}$ ,脉冲宽度为 100 fs。在 100 Hz 重复频率时,具有 0.45 mJ 脉冲能量的激光光束(半径  $\omega_0 = 2.5 \text{ mm}$ )通过柱面透镜(焦距  $f = 40 \text{ mm}$ )聚焦

后,经过高阶相位掩模板(周期  $\Lambda_{\text{PM}} = 3.33 \mu\text{m}$ )形成干涉条纹,并曝光单模光纤 (Corning SMF-28e),光纤未经过增敏处理,焦线处的平均功率密度约为  $7.3 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ <sup>[11,14-15]</sup>。为了获得纯正的  $\pm 1$  级衍射光束干涉,光纤放置在距离相位掩模板约 3.0 mm 处<sup>[8,16-17]</sup>。在倾斜光栅结构制备过程中,光纤相对“柱面透镜-相位掩模板系统”旋转一定角度,即与焦线构成  $\theta_{\text{ext}}$  倾角,如图 1 所示。由于焦斑尺寸仅为  $\omega \approx \lambda_m f / \pi \omega_0 \approx 4 \mu\text{m}$ ,小于光纤纤芯直径  $8.3 \mu\text{m}$ ,因此采用光束扫描曝光技术,即激光光束以  $v = 1 \mu\text{m/s}$  速度沿着干涉条纹方向 ( $x$  轴)移动,以获得倾斜的折射率调制。扫描曝光的有效范围  $h$

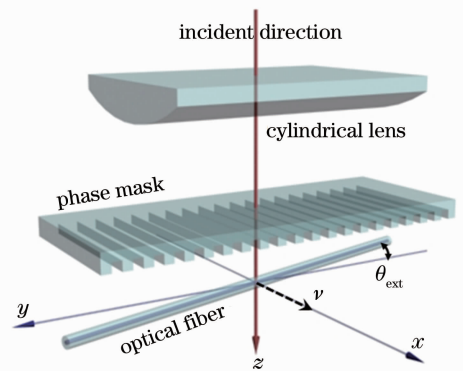


图 1 飞秒激光制备 HO-TFBG 的实验装置示意图  
Fig. 1 Experimental layout for the femtosecond laser fabrication of HO-TFBG

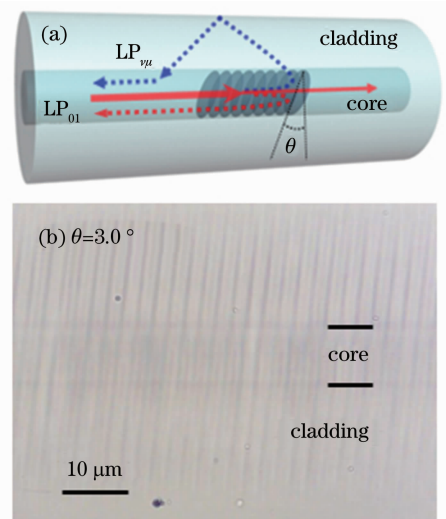


图 2 (a) TFBG 结构及模式耦合理论示意图; (b)  $3^\circ$  倾角 HO-TFBG 的光栅结构显微图像  
Fig. 2 (a) Schematic diagram of TFBG configuration and mode coupling theory; (b) microscopic images of the grating structures of the HO-TFBG with tilt angle of  $3^\circ$

可以通过焦线长度  $2\omega_0$  和倾角  $\theta_{\text{ext}}$  确定, 即  $h = 2\omega_0 \tan \theta_{\text{ext}}$ 。由于飞秒激光加工与材料光敏性无关, 以及高非线性吸收引起的自聚焦效应, 使焦线扫描过的区域均发生折射率变化, 而不会局限在纤芯范围<sup>[16-17, 21]</sup>。在 HO-TFBG 刻写过程中, 光谱特性是通过一个宽带光源 (Superk Compact, NKT Photonics) 和一个分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪 (OSA, AQ6370B, Yokogawa) 进行实时监控的。

通过相位掩模法刻写的光栅周期为掩模板周期的一半, 即  $\Lambda = \Lambda_{\text{PM}}/2 = 1.665 \mu\text{m}$ 。在图 2 中, 图 2(a) 表示 TFBG 的结构示意图, 图 2(b) 表示具有  $3^\circ$  倾角 HO-TFBG 的光栅结构图像, 它是通过普通光学显微镜表征的。正如前文分析, 飞秒激光诱导的折射率调制覆盖了全部纤芯和部分包层区域。

## 2.2 HO-TFBG 理论和传感机制

### 2.2.1 TFBG 的耦合模理论

在 TFBG 中, 倾斜折射率调制为前向传输的纤芯模式与反向传输的纤芯模式/包层模式之间的耦合提供了可能<sup>[1-5, 8]</sup>, 其谐振可以在透射谱中观察到。通过图 2(a) 所示的模式耦合理论示意图分析

可知, 模式之间的有效耦合需要满足两个条件。一个是决定谐振波长位置的相位匹配条件, 即<sup>[1, 6-7]</sup>

$$m\lambda_B = 2n_{\text{eff, core}}(\lambda_B)\Lambda_g, \quad (1)$$

$$m\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}} = [n_{\text{eff, core}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}}) + n_{\text{eff, clad}}^{\text{eff}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}})]\Lambda_g, \quad (2)$$

式中  $\Lambda_g = \Lambda/\cos \theta$  为光栅周期在光纤轴向上的投影,  $n_{\text{eff, core}}(\lambda_B)$  表示在 Bragg 谐振波长  $\lambda_B$  处纤芯模式的有效折射率,  $n_{\text{eff, core}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}})$  和  $n_{\text{eff, clad}}^{\text{eff}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}})$  分别表示在包层模式  $LP_{\nu}$  谐振波长  $\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}}$  处纤芯模式和包层模式的有效折射率。 $m$  表示 Bragg 衍射阶数, 在飞秒激光诱导的具有非正弦折射率调制的光栅结构中, 高阶 Bragg 谐振 ( $m > 1$ ) 可以较容易地观察到, 这在 Grobnic 等<sup>[20]</sup> 的研究中已有报道。此外, 理论分析中考虑色散关系是很重要的。另一个是模场交叠需要足够大, 以便获得显著的耦合系数<sup>[1, 6-7]</sup>, 这决定着模式之间耦合的强度, 即谐振峰的振幅。因此, TFBG 的光谱和传感特性由(1)式和(2)式两个条件所决定。

### 2.2.2 HO-TFBG 的传感机理

基于 TFBG 传感器的传感机制可以通过(1)式和(2)式对环境参数  $p$  求导获得<sup>[1, 6-7]</sup>:

$$m\Delta\lambda_B = \left[ 2 \frac{n_{\text{eff, core}}(\lambda_B)}{\cos \theta} \frac{\partial \Lambda}{\partial p} + 2 \frac{\Lambda}{\cos \theta} \frac{\partial n_{\text{eff, core}}(\lambda_B)}{\partial p} \right] \Delta p, \quad (3)$$

$$m\Delta\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}} = \left\{ \frac{n_{\text{eff, core}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}}) + n_{\text{eff, clad}}^{\text{eff}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}})}{\cos \theta} \frac{\partial \Lambda}{\partial p} + \frac{\Lambda}{\cos \theta} \frac{\partial [n_{\text{eff, core}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}}) + n_{\text{eff, clad}}^{\text{eff}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}})]}{\partial p} \right\} \Delta p, \quad (4)$$

式中环境参数  $p$  可以代表温度、应变以及环境折射率 (SRI) 等。当对环境折射率进行分析时,  $p = n_s$ , 并且  $\partial \Lambda / \partial n_s$ ,  $\partial n_{\text{eff, core}}(\lambda_B) / \partial n_s$  和  $\partial n_{\text{eff, core}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}}) / \partial n_s$  三项均为零。则(3)式和(4)式可以改写为<sup>[1, 15]</sup>

$$\Delta\lambda_B = 0, \quad (5)$$

$$m\Delta\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}} = \frac{\Lambda}{\cos \theta} \frac{\partial n_{\text{eff, clad}}^{\text{eff}}(\lambda_{\text{clad}}^{\text{eff}})}{\partial n_s} \Delta n_s. \quad (6)$$

可见环境折射率变化将仅引起包层模式谐振的漂移, 这种依赖性是通过包层模式的色散关系测定的。当 SRI 与某一包层模式的有效折射率相匹配时, 该包层模式将截止并转变为辐射模, 此时基于该包层模式谐振的 SRI 测量灵敏度达到最高。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 HO-TFBG 的高阶光谱特性

在飞秒激光刻写的 HO-TFBG 中, 与高阶 Bragg 谐振 ( $m > 1$ ) 相对应的高阶“包层模式谐振系列”可以观察到, 以  $3^\circ$  倾角 HO-TFBG 为例进行高

阶光谱特性分析。

图 3 为  $3^\circ$  倾角 HO-TFBG 的高阶“包层模式谐振系列”的生长情况, 这是在光栅刻写过程中通过 OSA 实时监控和记录的, 为了便于说明, 对各阶段记录的透射谱进行了平移。根据相位匹配关系(1)式和(2)式分析可知, 这一系列包层模式谐振 (1575 ~ 1605 nm 范围) 是与基本光栅 ( $\pm 1$  级衍射光束干涉, 周期  $\Lambda = \Lambda_{\text{PM}}/2$ ) 的 3 阶 Bragg 谐振相对应的。可见, 光束沿  $x$  轴扫描曝光接近  $h/2$  路程时, 包层模式谐振才出现, 随后谐振峰振幅显著增加。

在 1200 ~ 1700 nm 的探测范围内, 上述单一 HO-TFBG 还可以观察到另外两组高阶“包层模式谐振系列”, 如图 4 所示。同样依据相位匹配关系(1)式和(2)式, 分布在 1185 ~ 1210 nm 波长范围内的一系列包层模式谐振对应于基本光栅的 4 阶 Bragg 谐振。

光栅刻写使用的相位掩模板虽然是基于 800 nm 激光波长优化的, 以使 0 级衍射光束功率得到抑制,

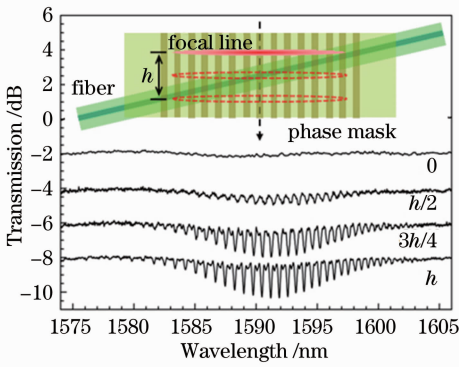


图 3 HO-TFBG(3°倾角)的三阶“包层模式谐振系列”的生长情况。插图演示了光束扫描曝光过程

Fig.3 Growing situation of the third order "cladding mode resonances" of the HO-TFBG (3° tilt angle). The inset illustrates the scanning exposure process of the beam

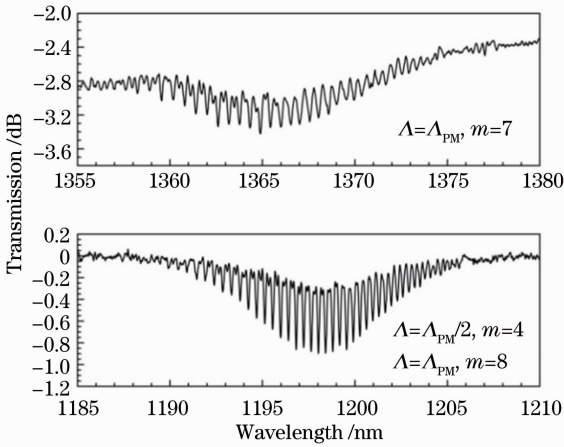


图 4 HO-TFBG(3°倾角)在 1355~1380 nm 和 1185~1210 nm 范围的高阶光谱特性

Fig.4 High-order spectra characteristics of the HO-TFBG (3° tilt angle) in the range of 1355 ~ 1380 nm and 1185 ~ 1210 nm

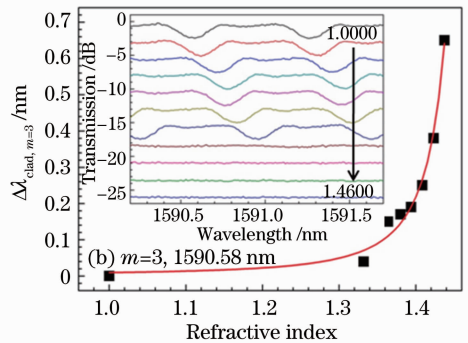
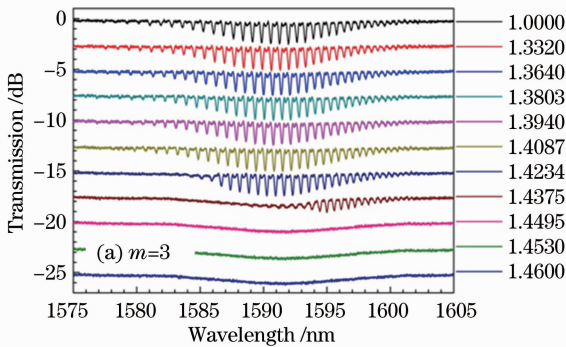


图 5 3阶“包层模式谐振系列”对 SRI 的响应。(a) 透射谱随 SRI 增加的演化过程；(b) LP<sub>018</sub> 包层模式谐振的灵敏度分析  
Fig.5 Response of the third order "cladding mode resonances" to SRI. (a) Evolutionary process of the transmission spectrum with the increase of the SRI; (b) sensitivity analysis to the LP<sub>018</sub> cladding mode resonance

衍射效率低于 3%，但是超高峰功率的飞秒脉冲分配给 0 级衍射光束的微小功率经过聚焦后，足够诱导出于掩模板周期相同的光栅结构( $\Lambda = \Lambda_{PM}$ )，它将叠印在基本光栅之上，与基本光栅相比其形成的包层模式谐振的振幅较低。分布在 1355~1380 nm 波长范围内的一系列包层模式谐振，是由 0 级衍射光束诱导的光栅形成的，它对应于 7 阶 Bragg 谐振。而与该光栅的 6 阶和 8 阶 Bragg 谐振相对应的“包层模式谐振系列”叠加到了基本光栅形成的 3 阶和 4 阶“包层模式谐振系列”之上。

因此，飞秒激光制备的单一 HO-TFBG 的透射谱中含有两种特征光谱，多阶“包层模式谐振系列”携带的信息量将更加丰富，与 UV-TFBG 相比它更易于实现多参数传感。

### 3.2 HO-TFBG 的折射率传感

对于 HO-TFBG 各阶“包层模式谐振系列”的 SRI 传感特性分析，是在室温条件下通过将光栅沉浸在具有不同体积浓度的甘油-水溶液中完成的。折射率范围为 1.3320~1.4600，这是通过阿贝折射仪测量的。每次测量后，该传感器用去离子水和乙醇清洗，待光谱恢复到原始状态之后再次进行测量。以上述 3°倾角 HO-TFBG 为例，并且仅监控谐振振幅较大的由基本光栅形成的 3 阶和 4 阶“包层模式谐振系列”，两组透射谱随 SRI 增加的演化过程呈现在图 5(a)和图 6(a)中。由于包层模式的倏逝场直径直接决定着其对 SRI 的灵敏度，因此，随着 SRI 增加将最先影响高阶包层模式谐振，其相应的谐振峰强度随着模式之间重叠积分的减小而降低，并逐渐转化为辐射模<sup>[2-3,6]</sup>。



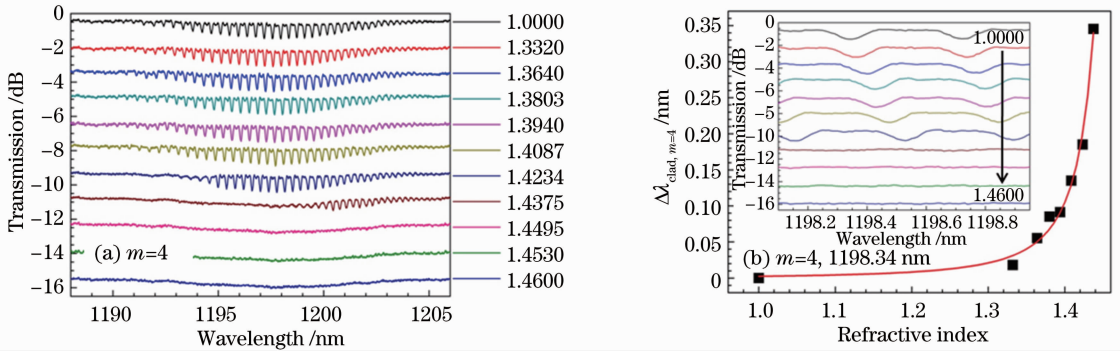


图 6 4 阶“包层模式谐振系列”对 SRI 的响应。(a) 透射谱随 SRI 增加的演化过程；(b) LP<sub>018</sub> 包层模式谐振的灵敏度分析

Fig. 6 Response of the fourth order "cladding mode resonances" to SRI. (a) Evolutionary process of the transmission spectrum with the increase of the SRI; (b) sensitivity analysis to the LP<sub>018</sub> cladding mode resonance

在分析各阶“包层模式谐振系列”的 SRI 灵敏度中,并没有选择较为复杂的光谱包络积分或者功率检测法<sup>[2-3]</sup>,而是采用比较直观的波长检测法<sup>[8]</sup>,如图 5(b)和图 6(b)所示。插图分别表示谐振波长 1590.58 nm 和 1198.34 nm 的 LP<sub>018</sub> 包层模式谐振对 SRI 的响应。而主图分别表示各谐振波长漂移 ( $\Delta\lambda_{\text{clad},3}^{018}, \Delta\lambda_{\text{clad},4}^{018}$ ) 随 SRI 的变化。SRI 灵敏度在包层模式截止附近达到最大,在 3 阶和 4 阶“包层模式谐振系列”中,对于 LP<sub>018</sub> 模式的最大 SRI 灵敏度分别为 19.20 nm/RIU (RIU 为折射率单位) 和 11.40 nm/RIU,这是在 1.4234~1.4375 折射率范围内通过线性拟合获得的。可见,在各阶“包层模式谐振系列”中,对于同级包层模式(LP<sub>*v*</sub>)谐振,其 SRI 灵敏度随 Bragg 衍射阶数的增加而降低,这一关系从(4)式中亦可以得到。

### 3.3 HO-TFBG 的轴向应变和高温传感

除 SRI 传感之外,轴向应变和温度也是 TFBGs 的固有传感特性。同样研究 3° 倾角 HO-TFBG 的 3 阶和 4 阶“包层模式谐振系列”,并监控各阶中 LP<sub>018</sub>

包层模式谐振对轴向应变和温度的响应。

轴向应变的测量是通过对 HO-TFBG 施加轴向张力实现的。光纤内部的应变可利用  $\epsilon = F/(\pi r^2 E)$  获得,其中  $F$  为轴向张力, $r$  为包层半径, $E$  为石英的杨氏模量。轴向应变的增加将导致谐振波长的红移,图 7(a) 表示 LP<sub>018</sub> 包层模式谐振的漂移 ( $\Delta\lambda_{\text{clad},3}^{018}$  和  $\Delta\lambda_{\text{clad},4}^{018}$ ) 随应变增加的变化,通过线性拟合可以获得它们的轴向应变灵敏度,分别为 1.31 pm/ $\mu\epsilon$ , 0.98 pm/ $\mu\epsilon$ 。

在温度灵敏度测量之前,为保证重复测温过程中光谱的稳定性,HO-TFBG 预先在 1000 °C 下退火 10 h,以擦除温度稳定性较低的折射率变化<sup>[8,16,19-20]</sup>。图 7(b) 表示 3 阶和 4 阶 LP<sub>018</sub> 包层模式谐振的漂移随温度的变化,探测的温度从室温增加到 1000 °C,通过线性拟合同样可以获得二者的温度灵敏度分别为 14.2 pm/°C, 10.9 pm/°C。

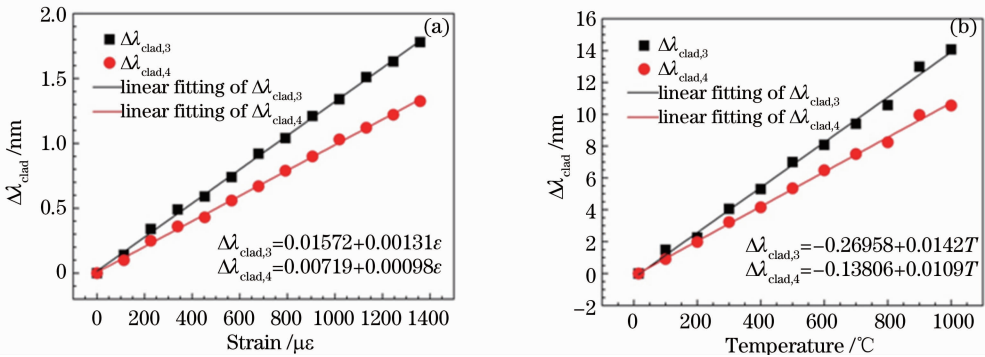


图 7 3 阶和 4 阶“包层模式谐振系列”对(a)轴向应变和(b)温度的响应

Fig. 7 Responses of the third and fourth order "cladding mode resonances" to (a) axial strain and (b) temperature

通过上述分析可知,在各阶“包层模式谐振系列”中,同级包层模式(LP<sub>*v*</sub>)谐振的轴向应变和温度灵敏度之间的关系与 SRI 灵敏度类似,同样随

Bragg 衍射阶数的增加而降低。对于 HO-TFBG 传感特性的分析,本文仅关注高阶“包层模式谐振系列”对环境微扰的响应,关于高阶 Bragg 谐振的传感

特性在以往的报道中已有相关研究<sup>[20]</sup>。

## 4 结 论

利用飞秒激光结合高阶相位掩模板在非敏化单模光纤中制备出一种 HO-TFBG。这种单一 HO-TFBG 在 1200~1700 nm 波长范围内呈现两种特征透射谱,分别来自于±1 级和 0 级衍射光束诱导的光栅结构。它具有飞秒激光刻写光栅的典型高温稳定性,并通过对高阶“包层模式谐振系列”的折射率、轴向应变和温度等传感特性的研究,证实其不仅拥有 UV-TFBG 的所有传感优势,而且众多高阶“包层模式谐振系列”携带的信息量更加丰富,更易于实现多参数传感。此外,单一 HO-TFBG 具有多波段滤波功能,有望作为光纤滤波器应用于光纤通信领域。

## 参 考 文 献

- 1 T Erdogan, J E Sipe. Tilted fiber phase gratings [J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(2): 296–313.
- 2 G Laffont, P Ferdinand. Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry [J]. Meas Sci Technol, 2011, 12(7): 765–770.
- 3 N J Alberto, C A Marques, J L Pinto, *et al.*. Three-parameter optical fiber sensor based on a tilted fiber Bragg grating [J]. Appl Opt, 2010, 49(31): 6085–6091.
- 4 C F Chan, C Chen, A Jafari, *et al.*. Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts [J]. Appl Opt, 2007, 46(7): 1142–1149.
- 5 Y Y Shevchenko, J Albert. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings [J]. Opt Lett, 2007, 32(3): 211–213.
- 6 T Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14(8): 1760–1773.
- 7 T Erdogan. Fiber grating spectra [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277–1294.
- 8 Chao Chen, Yong-Sen Yu, Rui Yang, *et al.*. Reflective optical fiber sensors based on tilted fiber Bragg gratings fabricated with femtosecond laser [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(3): 455–460.
- 9 Qi Yuefeng, Zhou Liying, Bi Weihong, *et al.*. Research on transmission mechanism and characteristics of hollow-core photonic bandgap fiber gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006006.

- 齐跃峰, 周丽英, 毕卫红, 等. 空芯光子带隙光纤成栅机理及特性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006006.
- 10 Jianchun Yang, Jing Huang, Xueming Li, *et al.*. High-sensitivity long-period fiber grating sensor with SAN/cryptophane A for coal mine gas detection [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 080601.
- 11 A C L Wong, W H Chung, H Tam, *et al.*. Single tilted Bragg reflector fiber laser for simultaneous sensing of refractive index and temperature [J]. Opt Express, 2011, 19(2): 409–414.
- 12 Zhengtong Wei, Nuan Jiang, Zhangqi Song, *et al.*. KrF excimer laser-fabricated Bragg grating in optical microfiber made from pre-etched conventional photosensitive fiber [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(4): 040603.
- 13 Jiang Qi, Hu Debo. A comparative study of refractive index sensors based on bare TFBG and SPR-TFBG [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080602.
- 蒋奇, 胡德波. 基于倾斜光纤光栅及其表面等离子效应的折射率传感比较研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080602.
- 14 Zhijun Yan, Hushan Wang, Kaiming Zhou, *et al.*. Broadband tunable all-fiber polarization interference filter based on 45° tilted fiber gratings [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(1): 94–98.
- 15 K O Hill, G Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1263–1276.
- 16 Chao Chen, Yongsen Yu, Rui Yang, *et al.*. Monitoring thermal effect in femtosecond laser interaction with glass by fiber Bragg grating [J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(14): 2126–2130.
- 17 Rui Yang, Yongsen Yu, Chao Chen, *et al.*. Rapid fabrication of microhole array structured optical fibers [J]. Opt Lett, 2011, 36(19): 3879–3881.
- 18 Jingchun Guo, Yongsen Yu, Xulin Zhang, *et al.*. Compact long-period fiber gratings with resonance at second-order diffraction [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(16): 1393–1395.
- 19 S J Mihailov, D Grobnc, C W Smelser, *et al.*. Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phase mask [J]. Opt Mater Express, 2011, 1(4): 754–765.
- 20 D Grobnc, S J Mihailov, C W Smelser, *et al.*. Multiparameter sensor based on single high-order fiber Bragg grating made with IR-femtosecond radiation in single-mode fibers [J]. IEEE Sens J, 2008, 8(7): 1223–1228.
- 21 C W Smelser, D Grobnc, S J. Mihailov. Self-focusing behavior in the fabrication of fiber Bragg gratings with an ultrafast laser and a phase mask [C]. Maryland: Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2005. JWB16.
- 22 Dai Yutang, Zhou Guangfu, Li Tao, *et al.*. Fiber optic magnetic field sensor based on femtosecond laser micromachining [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1206001.
- 戴玉堂, 周广福, 李涛, 等. 基于飞秒激光微加工的光纤磁场传感器[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1206001.

栏目编辑: 王晓琪