

# 基于单模-多模-单模拉锥结构的高灵敏度 光纤布拉格光栅应变传感器

王洪海<sup>1\*</sup>, 彭思敏<sup>2</sup>, 桂鑫<sup>1,2</sup>, 王昌佳<sup>2</sup>, 李政颖<sup>2</sup>

<sup>1</sup>武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup>武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 提出了一种基于单模-多模-单模拉锥结构的光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器, 该传感器能有效提高应变的检测灵敏度。多模光纤具有孔径大、易耦合、写制光栅较容易、可承受应变较大等优点, 使光栅区域位于拉锥多模光纤处, 则该多模拉锥光纤的光栅可使传感器获得更高的应变探测精度和灵敏度。通过控制多模光纤的拉伸长度, 制作了多个不同锥度的传感器。先将一段长度为 1.7 cm 的多模光纤对芯熔接在两段单模光纤中间, 然后对多模光纤段分别进行长度为 0.8, 0.9, 1.0 cm 的拉锥, 在多模光纤锥区一侧写入长度为 7 mm 的 FBG。通过分析反射谱中谐振波长的变化来监测温度、应变的改变。实验结果表明, 该传感器的应变检测范围为 0~960  $\mu\epsilon$ , 应变灵敏度最高可达 15.5  $\text{pm}/\mu\epsilon$ , 而温度灵敏度为 10.5  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ , 锥区半径越细则应变灵敏度提升越明显。由于应变灵敏度相对传统 FBG 有大幅提高, 而温度传感特性保持不变, 在没有温度补偿的情况下, 温度引起的应变误差仅为 0.677  $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ , 降低了应变和温度之间的交叉敏感性。

**关键词** 传感器; 光纤布拉格光栅; 多模光纤; 拉锥; 单模-多模-单模; 应变灵敏度

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.132802

## High-Sensitivity Fiber Bragg Grating Strain Sensor Based on Singlemode-Multimode-Singlemode Tapered Structure

Wang Honghai<sup>1\*</sup>, Peng Simin<sup>2</sup>, Gui Xin<sup>1,2</sup>, Wang Changjia<sup>2</sup>, Li Zhengying<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup> School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** This study proposes a fiber Bragg grating (FBG) sensor based on a singlemode-multimode-singlemode tapered structure that can effectively increase strain sensitivity. The grating is located at the tapered-multimode fiber region. A multimode fiber has the advantages of large aperture, easy coupling, easy writing of gratings, and the ability to withstand large strain. The use of tapered-multimode fiber gratings for strain sensing provides high accuracy and sensitivity. We produce multiple sensors with different tapers by changing the stretched length of the multimode fiber. Firstly, a 1.7-cm-long multimode fiber is welded between two singlemode fibers. Then, the middle multimode fiber section is tapered to 0.8, 0.9, and 1.0 cm, respectively. Subsequently, a 7-mm-long Bragg grating is written on the side of the multimode fiber cone. Changes in external parameters, such as temperature and strain, are monitored by analyzing the change of the resonant wavelength in the reflection spectrum. The experimental results show that the strain detection range of the sensor is 0-960  $\mu\epsilon$ , the highest strain sensitivity of the sensor can reach 15.5  $\text{pm}/\mu\epsilon$ , and the temperature sensitivity is 10.5  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ . Furthermore, the thinner the cone radius is, the more obvious the increase in strain sensitivity is. The strain sensitivity is considerably improved compared with that of the conventional FBG, and the temperature sensing characteristics remain unchanged; hence, the temperature-induced strain error is only 0.677  $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$  without temperature compensation, which reduces the

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61575149, 61735013)、湖北省自然科学基金(2018CFA056)

\* E-mail: wanghh@whut.edu.cn

cross-sensitivity between strain and temperature.

**Key words** sensors; fiber Bragg grating; multimode fiber; taper; singlemode-multimode-singlemode; strain sensitivity

**OCIS codes** 280.4788; 060.3735; 060.2370; 060.2280

## 1 引言

光纤传感器由于其尺寸小、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点<sup>[1]</sup>,在传感领域被广泛研究<sup>[2]</sup>。近年来,在光纤传感领域,基于单模-多模-单模(SMS)结构的多模干涉型传感器具有光纤传感器件的优势,还具备结构简单、成本低廉<sup>[3]</sup>以及检测灵敏度高<sup>[4]</sup>等优点,得到了国内外专家学者的广泛关注。光子晶体光纤<sup>[5]</sup>、无芯光纤<sup>[6]</sup>、多模光栅<sup>[7]</sup>等多种新型光纤已被应用于SMS的多模干涉传感器中,这些结构已被证明能进行温度、应变、弯曲以及折射率等的传感检测。系统的检测灵敏度是衡量传感器性能的重要参数指标之一,基于SMS结构的多模干涉型传感器比普通单模光纤传感器,可传输多种模式,因此其对外界环境变化所导致的参量变化比普通单模干涉型光纤传感器(Mach-Zehnder, Fabry-Perot, Michelson等)的灵敏度更高。

目前,关于SMS结构与光纤布拉格光栅(FBG)结合作为应变传感器的研究已有报道。2009年,Zhang等<sup>[8]</sup>提出了一种SMS结构和FBG级联的传感器,应变灵敏度为 $2.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。2012年,李保勇等<sup>[9]</sup>提出了在SMS结构的多模光纤段刻写长度为 $1.6 \text{ cm}$ 的FBG传感器,并分析了其应变特性,检测了其透射谱峰值的变化,实现了在 $0\sim 250 \mu\epsilon$ 范围内 $2.7 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 的应变灵敏度。2014年,Song等<sup>[10]</sup>提出了一种在SMS结构的多模光纤段刻写长度为 $1.5 \text{ cm}$ 的FBG传感器,该传感器的FBG透射峰在 $0\sim 200 \mu\epsilon$ 内的应变灵敏度也为 $2.7 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。基于SMS结构的FBG传感器的应变灵敏度比传统的FBG传感器提高2倍左右,能更好地应用于应变检测中。

本文利用多模光纤孔径大、易耦合、可承受较大可恢复应变、制作成本低等优势,将多模光纤熔融拉锥以增强应变灵敏度。通过在多模光纤两端焊接单模光纤,抑制基模与包层模式的耦合<sup>[11]</sup>,从而有效地检测FBG谐振峰。将FBG、锥形光纤、SMS结构光纤结合在一起,得到了一种新型的基于SMS拉锥结构的FBG波长检测型传感器,简称STMS-FBG。STMS-FBG的谐振波长直接受传感信号调制,相比

干涉型传感器具有更好的抗干扰能力<sup>[12]</sup>。本文从理论上分析了基于SMS拉锥结构的FBG传感器对应力的传感原理,并且通过光频域反射技术(OFDR)实现解调,利用拍频信号的频谱信息,实现了空间分辨率为 $1 \text{ mm}$ 的光纤光栅位置信息的提取,从而检测出拉锥的多模光纤锥区不同半径对应的不同应力灵敏度。实验证明此传感器在 $0\sim 960 \mu\epsilon$ 的应变测量范围内具有良好的线性度;其灵敏度高达 $15.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,比文献[8-10]提高约一个数量级。

## 2 传感器制作与理论分析

### 2.1 传感器制作

基于SMS拉锥结构的FBG传感器的制作主要包括3个步骤:SMS结构光纤对芯熔接、多模段光纤熔融拉锥以及刻写布拉格光栅。采用渐变型折射率多模光纤(MMF),其纤芯直径为 $62.5 \mu\text{m}$ ,包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 。采用型号为SMF-28的单模光纤,其纤芯直径为 $9 \mu\text{m}$ ,包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 。由于光纤熔融拉锥机的火头尺寸为 $1 \text{ cm}$ ,SMS结构中多模光纤长度不能小于 $1 \text{ cm}$ 。选择多模光纤的初始长度为 $1.7 \text{ cm}$ ,以便对多模光纤拉锥以及在锥区刻写布拉格光栅。SMS结构的多模光纤段拉锥的示意图如图1所示。将焊接好的SMS结构光纤固定在氢气熔融拉锥机上,多模光纤部分置于火头加热的位置。拉锥光纤的锥度由拉伸速度与拉伸长度决定。

在拉伸后的多模光纤锥区的一侧刻写长度为 $7 \text{ mm}$ 的布拉格光栅。制作完成的传感器结构示意图如图2所示。控制拉锥机的左右拉伸速度均为 $120 \mu\text{m}/\text{s}$ ,制作拉伸长度 $L'$ 为 $0.8, 0.9, 1.0 \text{ cm}$ 的3种传感器,采用OFDR解调系统<sup>[13-14]</sup>还原其反射光谱,如图3(a)~(c)所示,反射光谱中有多个谐振峰,其原因是:1)光在从单模光纤到多模光纤的传输过程中激发了多模光纤中不同阶数的纤芯基模,拉锥激发了多模光纤的更多纤芯模式,这些模式在纤芯内又发生了能量交换,当这些不同的光传输模式到达布拉格光栅时,满足相位匹配条件的模式会被反射回来;2)锥区纤芯半径的变化导致基模有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 的变化。

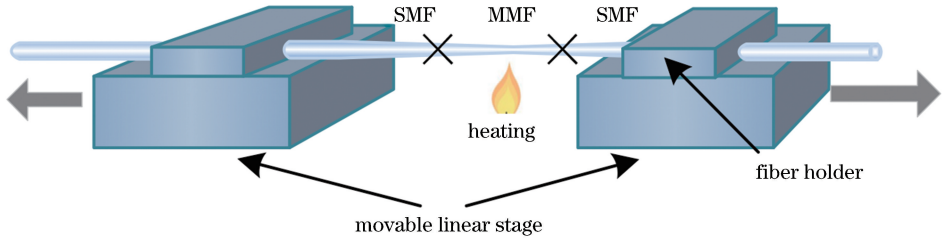


图 1 光纤熔融拉锥示意图

Fig. 1 Schematic of fiber fused taper

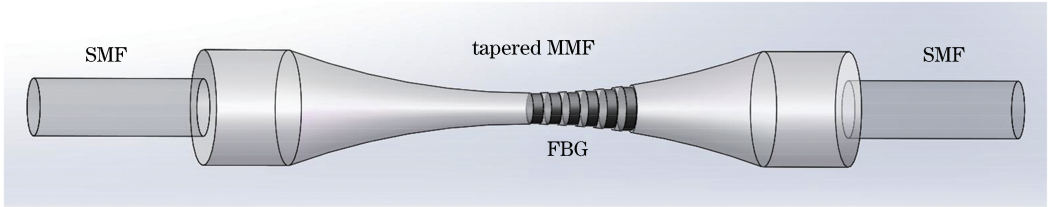


图 2 拉锥的 SMS 光纤光栅 (STMS-FBG) 结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of STMS-FBG

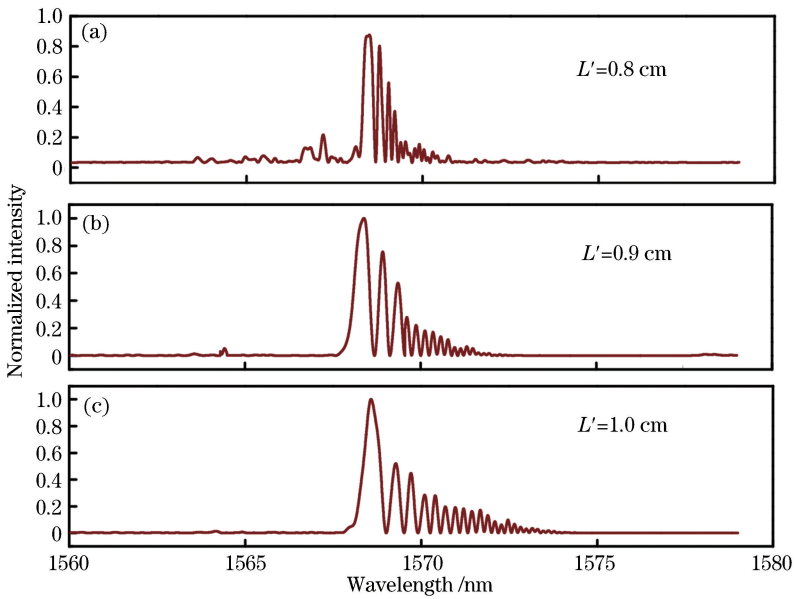


图 3 STMS-FBG 反射光谱图

Fig. 3 Reflection spectra of STMS-FBG

## 2.2 应变传感理论分析

如图 2 所示,拉锥后的多模光纤锥区半径沿光纤轴向均匀减小。将光栅沿光纤轴向平均分成  $N$  段,由于每一段的半径不同,所承受的应变不同,因此具有不同的传感特性。设半径最细处的光栅为第一段,半径设为  $R_0$ ,最后一段光栅设为第  $N$  段,半径为  $R_N$ 。光纤光栅的布拉格反射条件为<sup>[15]</sup>

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

式中: $\lambda_B$  为反射的中心波长; $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率; $\Delta$  为光栅周期。设第  $i$  段光栅半径为  $(R_{i-1} +$

$R_i)/2$ ,其中  $R_i$  为第  $i$  段处的光纤半径,则此段光栅所承受的应变为

$$\epsilon_i = \frac{F}{E\pi} \left( \frac{R_{i-1} + R_i}{2} \right) - 2, \quad (2)$$

式中: $F$  表示光栅所承受的应力大小; $E$  表示光栅的弹性模量,为定值。当在光纤两端施加应力时,光纤布拉格波长由于有效折射率的变化和光栅周期的变化发生漂移,所以第  $i$  段光栅产生的波长漂移为

$$\Delta\lambda_{Bi} = 2\Delta n_{\text{eff}i}\Delta_0 + 2n_{\text{eff}}\Delta\Delta_i, \quad (3)$$

式中: $\Delta n_{\text{eff}i}$  表示第  $i$  段有效折射率的变化量; $\Delta_0$  表示在没有应力作用下的光栅周期; $\Delta\Delta_i$  表示第  $i$  段

光栅的光栅周期变化量。根据弹光效应原理,有

$$\Delta n_{\text{eff}i} = -\left(\frac{n_{\text{eff}}^3}{2}\right) [P_{12} - \mu(P_{11} - P_{12})] \epsilon_i, \quad (4)$$

$$\Delta \Lambda_i = \Lambda_0 \epsilon_i, \quad (5)$$

式中: $P_{11}$ 和 $P_{12}$ 表示应变张量的 Pockels 系数; $\mu$ 表示泊松比,由光纤材料决定<sup>[16]</sup>。结合(2)~(5)式可得第*i*段光栅的波长漂移为

$$\Delta \lambda_{\text{Bi}} = 2 \left\{ n_{\text{eff}} - \frac{n_{\text{eff}}^3}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} - P_{12})] \right\} \cdot \Lambda_0 \frac{F}{E\pi} \left( \frac{R_{i-1} + R_i}{2} \right) - 2. \quad (6)$$

由(6)式可知,当锥区半径一定时,随着应力的

增大,波长漂移量与应力的大小呈线性关系;在同样应力作用下,半径越小的区域,波长漂移量越大。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 应变实验

对制作好的不同锥度的传感器分别进行应变实验,实验装置示意图如图 4 所示。固定光纤的 2 个夹具距离为 33 cm,应变大小为拉伸距离与 2 个夹具之间距离之比。轴向应变从 0 到 960  $\mu\epsilon$  逐渐增加,以 60  $\mu\epsilon$  为步进,采用 OFDR 系统采集数据进行解调<sup>[13-14]</sup>。

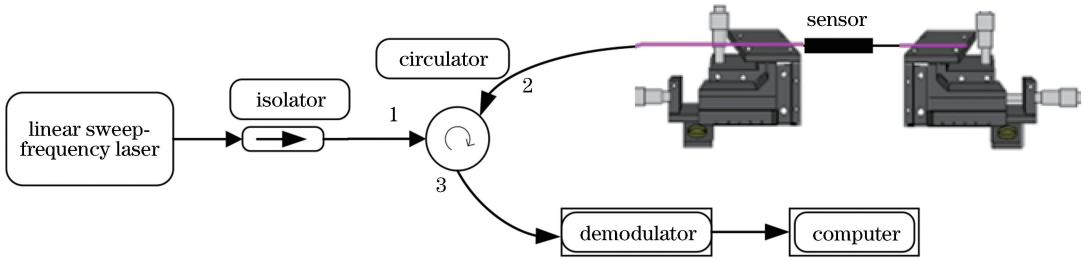


图 4 应变实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of strain experimental setup

当应变增加时,不同锥度的传感器的光谱具有相同的变化趋势,选取拉伸长度为 1.0 cm 的传感器进行分析,光谱变化如图 5(a) 所示。由于锥区光纤半径沿光纤轴向均匀变化,随着应变增大,半径变细,对应变的灵敏度增大。将刻写的 7 mm 光栅作为一个整体用 OFDR 系统解调。由图 5(a) 可知,最高峰向右漂移最快,较矮的峰漂移比较慢,各个峰逐渐重合后又慢慢分开,整体光谱谱宽

先变窄后变宽,随着应力的增大光谱呈现对称的性质。取光谱中的最大峰值对应的波长作为中心波长,中心波长随着应变增大而逐渐增大。拉伸长度为 0.8, 0.9, 1.0 cm 的传感器灵敏度分别为 9.5, 11.8, 15.1  $\text{pm}/\mu\epsilon$ , 拟合曲线如图 5(b) 所示,图中  $k_1, k_2, k_3$  分别表示 3 个传感器的应变灵敏度,可以看出拉伸长度越长,即光纤被拉伸的越细,传感器对应变的灵敏度越大。

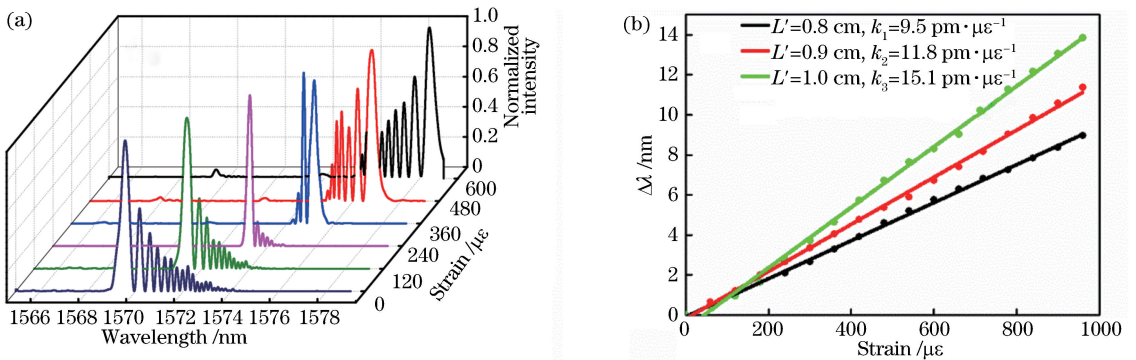


图 5 应变响应图。(a)不同应变作用下的反射光谱响应;(b)不同拉伸长度的传感器应变灵敏度拟合曲线

Fig. 5 Diagrams of strain responses. (a) Reflective spectral responses under different strains; (b) fitting curves of strain sensitivity for sensors with different tapered lengths

由实验结果可知,拉锥使该传感器的应变灵敏度得到了较大提高,并且能承受较大的可恢复应变,同时具有很好的线性度。表 1 列出了该传感器及以

往报道的 SMS 结合 FBG 的应变传感器的各项参数,其中 STMS-FBG 为本文所制作的传感器,SMS-FBG1、SMS-FBG2、SMS-FBG3 分别表示 Zhang<sup>[8]</sup>、

李保勇<sup>[8]</sup>、Song<sup>[10]</sup>所报道的传感器。文献[8]中未提到 SMS-FBG1 应变的测量范围。由表 1 可知,本文所制作的传感器在应变的测量范围和应变灵敏度方面都明显优于已报道的类似传感器。

表 1 所提传感器 STMS-FBG 与以往报道相关传感器各项指标对比

Table 1 Comparison of indexes of proposed STMS-FBG sensors and those in previously related reports

Sensor	STMS-FBG	SMS-FBG1 <sup>[8]</sup>	SMS-FBG2 <sup>[8]</sup>	SMS-FBG3 <sup>[10]</sup>
Sensitivity / ( $\text{pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ )	15.5	2.1	2.7	2.7
Measuring range of strain / $\mu\epsilon$	0-960	—	0-250	0-200

为了验证不同半径的光纤对应的应变灵敏度与半径大小的对应关系,通过 OFDR 解调算法实现对光栅的定位,得到的空间分辨率可达到 1 mm。实验中,在传感器离光源较远的一侧锥区刻写光栅,对光栅进行分段解调,通过高斯拟合获取中心波长。每 1 mm 光栅的光谱对应的应变灵敏度都不一样,解调结果表明,离光源位置越近的光栅,即半径越小的光纤光栅,应变灵敏度越高。由于刻写的光栅长度为 7 mm,从半径最细的第一段到最后一段,如图 6 所示分别用 01 到 07 表示,每一段对应的应变灵敏度拟合曲线如图 6 所示, $k_1$  到  $k_7$  分别表示每一段的应变灵敏度。可以看出,最细的一段应变灵敏度为  $15.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,最后一段应变灵敏度为  $2.7 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

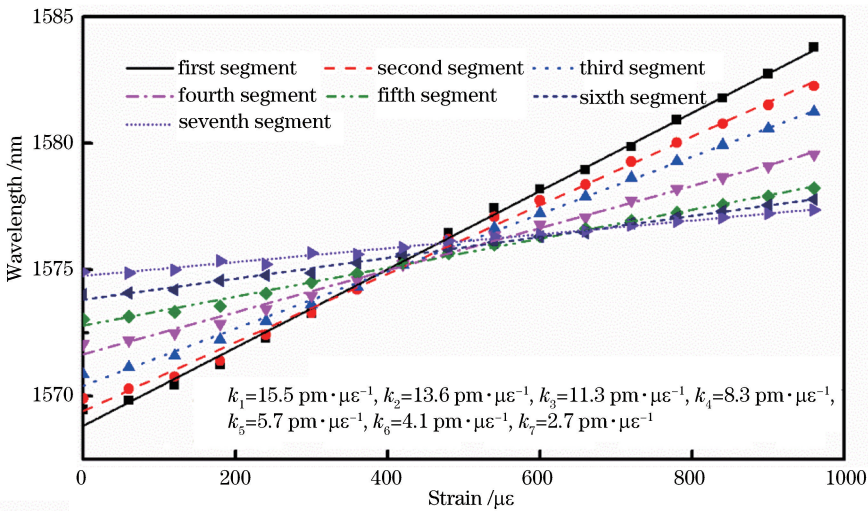


图 6 不同段 FBG 的应变灵敏度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of strain sensitivity for different FBG segments

在光学显微镜下,用切割刀在光纤锥区最细的地方切断,测定截面半径,依次切断 1 mm,测定每一小段光纤的截面半径。每一小段光纤不同半径对应的不同灵敏度如表 2 所示。

表 2 锥区不同半径光纤对应的应变灵敏度

Table 2 Strain sensitivities of fibers with different radii in cone zone

Fiber	01	02	03	04	05	06	07
Radius / $\mu\text{m}$	20.02	22.45	24.73	30.47	35.42	41.36	48.49
Sensitivity / ( $\text{pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ )	15.5	13.6	11.3	8.3	5.7	4.1	2.7

由图 7 可知,测得最细处光纤截面的半径为  $20.02 \mu\text{m}$ ,第 7 段光纤半径为  $48.49 \mu\text{m}$ 。由理论推导可知,光栅的应变灵敏度与半径的平方成反比[(6)式]。第 1 段与第 7 段半径平方之比  $m_1 = 5.866$ ;第 1 段应变灵敏度与第 7 段应变灵敏度之

比  $m_2 = 5.7$ 。实验结果与预期基本吻合。

### 3.2 温度实验

测量了该传感器对温度的传感特性。将传感器置于温控箱内,通过程序控制温度从  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  升高到  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,步进为  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温度的改变会导致热光效应和热膨胀效应的产生,从而导致光纤有效折射率和光栅周期发生变化<sup>[17]</sup>,这与光纤的锥区形状无关。当温度在  $30 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内增加时,光谱仅仅产生平移,没有形状的改变,光谱变化趋势如图 8(a)所示。取光谱的最高峰对应的波长作为中心波长,中心波长随着温度的增加逐渐增大,拟合曲线如图 8(b)所示,温度灵敏度为  $10.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

STMS-FBG 传感器与普通未拉锥的 FBG 传感器相比,对温度的灵敏度相差不大。普通 FBG 传感器应变灵敏度为  $1.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,温度灵敏度为  $10.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ <sup>[18]</sup>,在没有温度补偿的情况下,由温度

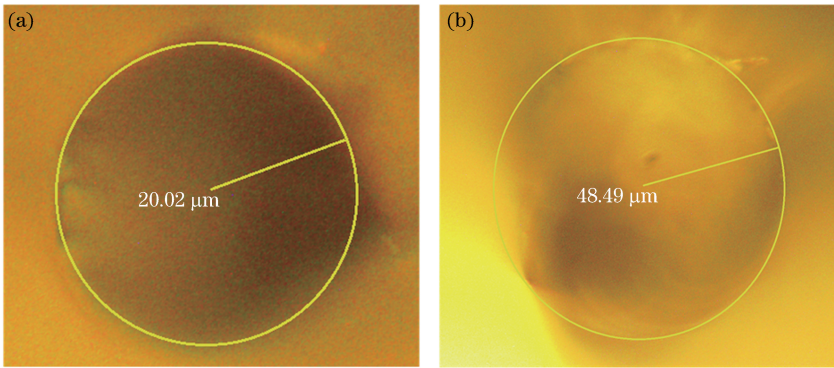


图 7 锥区不同位置的光纤半径。(a)第 1 段;(b)第 7 段

Fig. 7 Fiber radii at different locations in cone zone. (a) First segment; (b) seventh segment

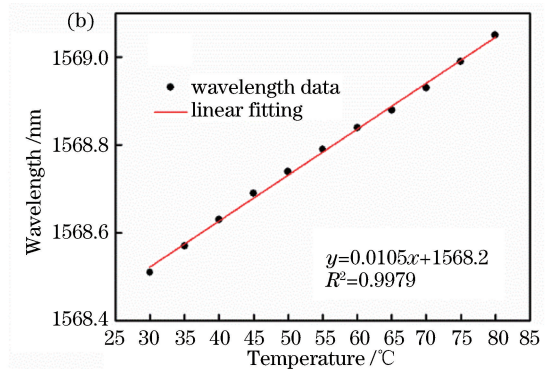
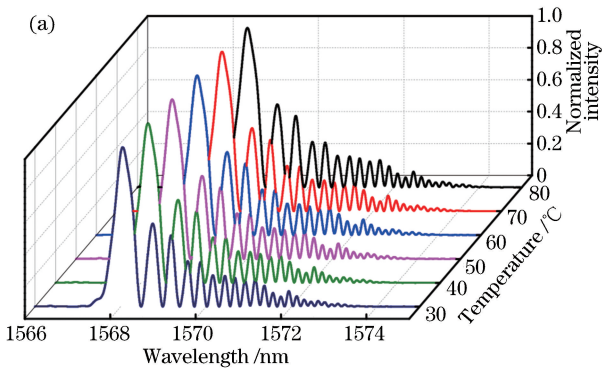


图 8 温度响应图。(a)不同温度作用下的反射光谱响应;(b)温度灵敏度拟合曲线

Fig. 8 Diagrams of temperature responses. (a) Reflective spectral responses at different temperatures; (b) fitting curve of temperature sensitivity

引起的应变误差为  $9.545 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 。而 STMS-FBG 传感器的应变灵敏度为  $15.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，由温度引起的应变误差为  $0.677 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 。因此，STMS-FBG 结构作为应变传感器，可以有效地降低温度和应变之间的交叉敏感性<sup>[19]</sup>。

## 4 结 论

制作了一种 STMS-FBG 传感器，并对其制造技术进行了介绍。通过多模光纤两端熔接单模光纤，抑制了多模光纤中非需求的基模与包层模式耦合，从而可有效地检测 FBG 谐振峰；通过对多模光纤进行拉锥，增加了应变灵敏度。分析了锥形多模光纤光栅的应变传感理论，对该传感器进行了应变和温度测试。采用 OFDR 解调技术实现了对锥形光纤空间分辨率为  $1 \text{ mm}$  的解调，理论分析及实验结果表明，不同半径对应不同的应变灵敏度。STMS-FBG 传感器在  $0\sim 960 \mu\epsilon$  测量范围内的最高应变灵敏度为  $15.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，且线性度良好，在应变监测方面具有优良的性能和很大的应用潜力。下一步工作重点是研究 STMS-FBG 的光谱分析算法及

其在温度、应力、折射率等多参量同时测量方面的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Y H, Shao C J, Qu W J, *et al.* Simplified time-dependant optical-mechanical transformation equation for FBG strain sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 1965-1970.  
吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 1965-1970.
- [2] Liu Y, Li Y M, Lu Y L, *et al.* High-sensitivity strain sensor of long period fiber grating based on grooved technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 100602.  
刘宇, 李云梅, 路永乐, 等. 高灵敏度刻槽型长周期光纤光栅应变传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 100602.
- [3] You C T, Chen P C, Ding P F. Experimental research on single mode-multimode-single mode fiber structure in security system [J]. *Laser &*

- Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 060603.
- 游赐天, 陈沛超, 丁攀峰. 单模-多模-单模光纤结构在安防系统的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 060603.
- [4] Zhao Y, Cai L, Li X G, *et al.* Investigation of the high sensitivity RI sensor based on SMS fiber structure [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 205: 186-190.
- [5] Oliveira R, Marques T H R, Bilro L, *et al.* Multiparameter POF sensing based on multimode interference and fiber Bragg grating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(1): 3-9.
- [6] Chen Y F, Han Q, He Y, *et al.* Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0905001.
- 陈耀飞, 韩群, 何洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905001.
- [7] Shao M, Qiao X G, Fu H W, *et al.* Fiber humidity sensor based on fiber Bragg grating sandwiched in SMS fiber structure [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 3008-3013.
- 邵敏, 乔学光, 傅海威, 等. 光纤布拉格光栅嵌入 SMS 光纤结构的湿度传感器[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 3008-3013.
- [8] Zhang J Z, Sun W M, Yuan L B, *et al.* Design of a single-multimode-single-mode filter demodulator for fiber Bragg grating sensors assisted by mode observation [J]. Applied Optics, 2009, 48(30): 5642-5646.
- [9] Li B Y. The SMS fiber structure based fiber Bragg grating and its sensing application [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- 李保勇. 基于 SMS 光纤结构的布拉格光纤光栅及其传感应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [10] Song D W, Chai Q, Liu Y L, *et al.* A simultaneous strain and temperature sensing module based on FBG-in-SMS [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(5): 055205.
- [11] Okude S, Sudoh M, Shima K, *et al.* A novel technique for suppressing undesired coupling of LP<sub>01</sub> mode to cladding modes in fiber Bragg gratings [C] // Optical Fiber Sensors 1996, May 21-21, 1996, Sapporo, Japan. Washington, D. C.: OSA, 1996: We54.
- [12] Jiang D S, He W. 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.
- [13] Li Z Y, Sun W F, Wang H H. Research on the ultra-weak reflective fiber Bragg grating sensing technology based on optical frequency domain reflection technology [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806003.
- 李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806003.
- [14] Zhang C, Yang N, Bao Y, *et al.* Spectral resolution improvement technique for optical frequency-domain reflectometry-based optical fiber distributed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806001.
- 张超, 杨楠, 包艳, 等. 基于光频域反射计的光纤分布式传感中光谱分辨率提升技术 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0806001.
- [15] Sun S H, Yu Y L, Li H, *et al.* Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505002.
- 孙诗惠, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505002.
- [16] He W, Li J Z, Chen H B, *et al.* Strain sensing properties of multimode fiber Bragg gratings [J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(12): 15-17.
- 何伟, 李剑芝, 陈宏波, 等. 多模光纤光栅的应变传感特性 [J]. 传感器技术, 2003, 22(12): 15-17.
- [17] Su H, Wang J, Liu L L, *et al.* Optical fiber grating temperature and axial tension sensing system based on swept source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040601.
- 苏红, 王健, 刘岚岚, 等. 基于扫频光源的光纤光栅温度和轴向拉力传感系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040601.
- [18] Wang M G, Wei H, Tong Z, *et al.* Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 867-869.
- 王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量 [J]. 光学学报, 2002, 22(7): 867-869.
- [19] Wang Y P, Xiao L M, Wang D N, *et al.* Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity [J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3414-3416.