

## 激光与光电子学进展

## 强耦合七芯光纤超模式布拉格光栅及其温度和应变响应特性研究

董贤, 谢友航, 武创\*, 李杰, 关柏鸣

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 511443

**摘要** 提出并实现了一种用于双参量同时测量的强耦合七芯光纤布拉格光栅(SCF-FBG)。在透射光谱中观察到 2 个布拉格谐振峰, 对应 SCF 的类  $HE_{11}$  和类  $HE_{12}$  超模式反向谐振耦合。该传感器由 SCF 拼接在中心对齐的 2 个标准单模光纤构成, 其透射谱中还包括由超模式间的马赫-曾德尔干涉产生的干涉条纹。分别测量了该器件对温度和应变的响应, 结果表明: 2 个布拉格谐振峰的温度灵敏度分别为  $9.56 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $9.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 应变灵敏度分别为  $0.64 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $0.584 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。其中, 干涉谷的温度灵敏度和应变灵敏度分别为  $11.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $-0.925 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 因此该器件能够同时用于温度和应变的测量。

**关键词** 光纤布拉格光栅; 光纤传感器; 七芯光纤; 超模式

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220963

## Supermode Bragg Grating Inscribed in a Strongly Coupled Seven-Core Fiber and Its Response Characteristics to Temperature and Strain

Dong Xian, Xie Youhang, Wu Chuang\*, Li Jie, Guan Baiou

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 511443, Guangdong, China

**Abstract** This study develops and demonstrates a sensor based on a strongly coupled seven-core fiber (SCF) supermode Bragg grating for multiparameter measurements. Two Bragg resonance notches are observed in the transmission spectrum, corresponding to  $HE_{11}$ -like and  $HE_{12}$ -like supermodes of the SCF. Because the SCF is spliced between two standard single-mode fibers with central alignments at both ends, the transmission spectrum of the device also comprises an interferometric profile owing to the Mach-Zehnder interference of the supermodes. The responses of the device to temperature and strain are experimentally characterized. The obtained temperature and strain sensitivities of the supermode Bragg grating notches are  $9.56 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $9.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  and  $0.64 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,  $0.584 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , respectively. The obtained temperature and strain sensitivities of interferometric dips are  $11.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  and  $-0.925 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , respectively. This device can be potentially used to measure the temperature and strain simultaneously.

**Key words** fiber Bragg grating; fiber optic sensor; seven-core fiber; supermode

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)具有体积小、易于制造、绝对参量测量、强大的复用组网能力等优点<sup>[1-2]</sup>, 被广泛应用于各种物理量的传感, 如应变<sup>[3]</sup>、温度<sup>[4]</sup>、压力<sup>[5]</sup>、折射率等。在弱耦合多芯光纤中, 其外层纤芯距离中心纤芯较远(通常几十微米), 而远离光纤中心的

外层纤芯的折射率对光纤的弯曲更加敏感, 研究人员在不同种类的弱耦合多芯光纤中写入 FBG, 且用于定向弯曲和振动传感<sup>[6-9]</sup>。弱耦合多芯光纤纤芯间距通常为几十微米, 写入弱耦合多芯光纤的每个纤芯中的 FBG 均独立工作, 每个 FBG 的光谱通过扇入/扇出设备分别解调, 但这种解调方式比较复杂。

近几年来, 强耦合七芯光纤(SCF)因其独特的模

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-17; 网络首发日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(62075087)、广东省自然科学基金(2014A030306040, 2018A030313440)、广东省特支计划科技创新青年拔尖人才(2016TQ0X24, 2019TQ0X36)、广州市珠江科技新星(20180610197)

通信作者: \*wuchuang.ipt@gmail.com

式特性和高质量输出光谱备受研究人员关注<sup>[10-17]</sup>。其结构为 1 个纤芯位于光纤中心,其他 6 个纤芯呈六边形包围着中心纤芯,每对相邻纤芯间距相同且略微大于纤芯直径,其支持七对超模式<sup>[18]</sup>。由于纤芯之间的强耦合,这些超模式是非简并的,即其具有不同的有效折射率和传播常数。当标准单模光纤(SMF)与 SCF 中心对齐时,只有两对超模式以近乎相同的强度被激发,随后发生干涉,输出消光比高达 30 dB 的高质量干涉光谱。2014 年, Antonio-Lopez 等<sup>[10]</sup>首次使用了 SCF 超模式干涉仪实现 1000 °C 的高温传感。后来, Salceda-Delgado 等<sup>[12]</sup>制作了一种基于 SCF 超模式干涉仪的高灵敏度曲率传感器。同一时期, Tan 等<sup>[13]</sup>和 Yoon<sup>[17]</sup>对弱耦合 SCF 进行拉锥,以增强纤芯之间的耦合效应,得到了超模式干涉光谱,分别研究了该器件的扭转和应变响应。最近,本研究团队提出了一种基于七液芯特氟龙包层光纤的高灵敏度光纤微流控折射率传感器<sup>[11]</sup>。但是, SCF-FBG 目前还没有被研究过,这种器件结构简单同时具有测量双参量的潜力。

本文利用 193 nm 准分子激光器,通过相位掩模板技术将 FBG 写入一种强耦合 SCF,在透射光谱上观察到 2 个布拉格损耗峰,分别对应 SCF 的类 HE<sub>11</sub> 和类 HE<sub>12</sub> 超模式。本器件属于 FBG 与 SCF 超模式干涉仪的组合,透射光谱中兼有干涉条纹和 FBG 谐振峰。实验测量了该器件的温度与应变响应,发现干涉条纹波谷和光栅谐振峰具有相似的温度灵敏度,但应变响应却显著不同,因此该器件可同时用于温度和应变的测量,且具有结构简单紧凑、易于制造、机械性能良好等优点。

## 2 器件结构及其原理

图 1(a)为实验中所用强耦合 SCF 横截面的扫描

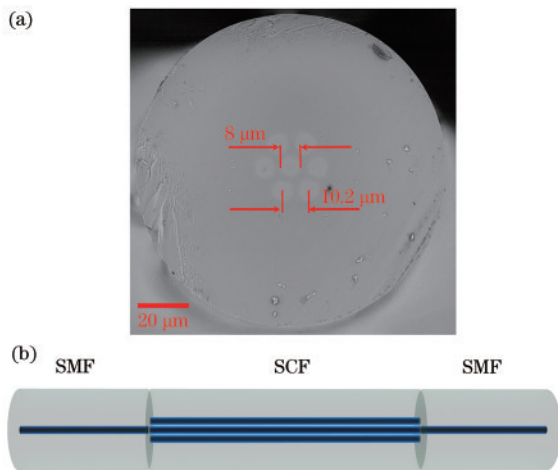


图 1 强耦合七芯光纤。(a)实验所用强耦合 SCF 横截面扫描电镜;(b)SCF 与两段 SMF 中心对准熔接示意图  
Fig. 1 Diagram of strongly coupled seven-core fiber. (a) SEM photo of the cross-section of the strongly-coupled SCF used in the experiment; (b) schematic diagram of central alignment splicing of SMF-SCF-SMF

电镜(SEM)照片,其由 7 个相同的掺锗二氧化硅纤芯和纯石英包层组成。其中,1 个纤芯位于正中心,其他 6 个纤芯呈六边形包围着中心纤芯,每个纤芯的直径均为 8.0 μm,相邻纤芯的间距为 10.2 μm,包层直径为 125 μm。一段长为 4.75 cm 的 SCF 采用中心对准的方式,熔接于两段普通的 SMF 中,如图 1(b)所示。

实验中,宽带光源为 Golight 公司生产的 SLED,其光谱范围为 1250~1650 nm,所用光谱仪为 Yokogawa 公司生产的 AQ6370D 光学光谱分析仪,其分辨率为 0.02 nm,实验中光谱测量范围为 1500~1600 nm。

如图 2(a)所示,采用 193 nm 准分子激光器和周期为 1078.78 nm 的相位掩模板在 SCF 上刻写一段长为 8 mm 的 FBG,FBG 示意图如图 2(b)所示。在刻写过程中,准分子激光器的输出功率、频率设为 1.5 W、40 Hz,刻写时长为 8 min。在干涉光谱的 1561.68 nm 和 1560.18 nm 处获得 2 个布拉格损耗峰,将其命名为 FBG-S1 和 FBG-S2,分别对应于 SCF 的类 HE<sub>11</sub> 和类 HE<sub>12</sub> 超模式与各自相反方向传播超模式的谐振耦合,如图 3 所示。干涉光谱中 dip1 具有更高的消光比,后续实验中将追踪 dip1 处的波长漂移来研究干涉光谱。

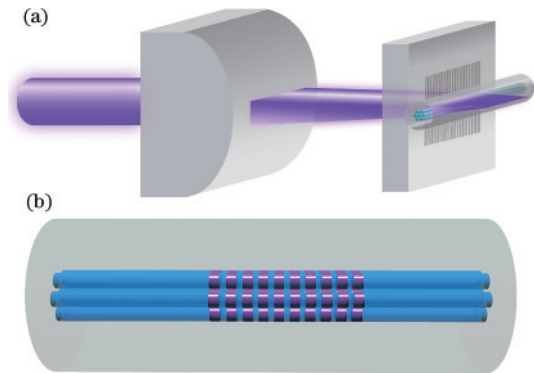


图 2 FBG 刻写。(a)SCF 上刻写 FBG 的示意图;(b)FBG 示意图  
Fig. 2 FBG inscription. (a) Schematic diagram of FBG inscription into the SCF; (b) schematic diagram of FBG

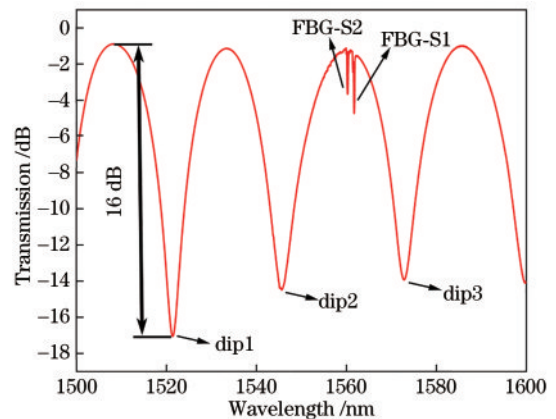


图 3 SCF-FBG 的透射光谱  
Fig. 3 Measured transmission spectrum of the SCF-FBG

由文献[19]可知,SCF中会产生7个模式。其中,当光由SMF以中心对准的方式耦合进入SCF时(即SMF的纤芯对准SCF的中央纤芯),只有SCF中的LP<sub>01</sub> mode和LP<sub>02</sub> mode会被激发,这是因为SCF的其他超模式与SMF基模的电场重叠积分为零。被激发的这2个超模式的电场矢量与标准SMF的HE<sub>11</sub>和HE<sub>12</sub>电场矢量相同,因此将其命名为类HE<sub>11</sub>和类HE<sub>12</sub>超模式,其具有不同的传播常数和有效折射率。在沿着SCF传播一段距离后产生相位差,再重新耦合到输出端的SMF时形成干涉光谱<sup>[18]</sup>。根据双光束干涉理论,模式干涉仪的透射谱,表示为

$$I(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos[2\pi/\lambda \Delta n_{\text{eff}}(\lambda, X) \cdot L(X)], \quad (1)$$

式中: $\Delta n_{\text{eff}}$ 为SCF类HE<sub>11</sub>和类HE<sub>12</sub>超模式的有效折射率之差; $L$ 为SCF的长度; $\lambda$ 为自由空间波长; $X$ 为待测量温度变化 $\Delta T$ 或轴向应变 $\epsilon$ 。干涉光谱中的波谷满足以下相位条件:

$$(2\pi/\lambda(X)) \Delta n_{\text{eff}}[\lambda(X), X] \cdot L(X) = (2m+1)\pi, \quad (2)$$

式中: $m$ 为任意整数。受待测量 $X$ 的影响,干涉谷的波长也会随着 $X$ 的变化而变化,所以满足上述相位条件的 $\lambda$ 也是 $X$ 的函数。

当 $X$ 变化时,式(2)始终成立,对式(2)两侧的 $X$ 取导数,可得:

$$d\left\{\Delta n_{\text{eff}}[\lambda(X), X] \cdot L(X)\right\} / \lambda(X) \Big/ dX = 0, \quad (3)$$

通过偏微分和简单运算,可得干涉光谱波谷的灵敏度对 $X$ 的灵敏度为

$$\frac{d\lambda(X)}{dX} = \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}} - (\lambda \cdot \partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial \lambda) \cdot \left[ \Delta n_{\text{eff}} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dX} + \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial X} \right]}, \quad (4)$$

式中: $\Delta n_{\text{eff}} \cdot (1/L) \cdot (dL/dX)$ 为光纤长度变化对干涉仪灵敏度的贡献,与光纤材料的热膨胀系数以及施加给光纤的轴向应变有关; $\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial X$ 为光纤超模式的有效折射率之差的变化对干涉仪灵敏度的贡献,可以展开为以下3项:

$$\frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial X} = \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{core}}} \cdot \frac{dn_{\text{core}}}{dX} + \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{clad}}} \cdot \frac{dn_{\text{clad}}}{dX} + \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial a_{\text{core}}} \cdot \frac{da_{\text{core}}}{dX}, \quad (5)$$

式中: $n_{\text{core}}$ 和 $n_{\text{clad}}$ 分别为纤芯和包层的折射率; $a_{\text{core}}$ 为每个纤芯的半径。式(5)右侧第1项和第2项分别为纤芯和包层折射率变化引起超模式有效折射率之差变化对干涉仪灵敏度的贡献,敏感机制为热光效应和弹光效应;第3项为纤芯尺寸变化引起超模式有效折射率之差变化对干涉仪灵敏度的贡献,敏感机制为波导的横向尺寸效应,温度上升时 $a_{\text{core}}$ 因热膨胀而变大,轴向拉

伸光纤时 $a_{\text{core}}$ 因泊松效应而变小,所以对于温度和应变而言,这一项对干涉仪灵敏度的贡献是相反的。对于SCF而言, $a_{\text{core}}$ 会改变,且各个相邻纤芯的间距也会变化,所以实际情况更为复杂。若要定量地计算干涉仪的温度灵敏度和应变灵敏度,需知纤芯和包层各自的热光系数、热膨胀系数、弹光系数、泊松比、杨氏模量等信息,将其代入COMSOL有限元分析软件的多物理过程模型进行仿真,但因没有该SCF的上述参数信息,所以未能定量地计算干涉仪灵敏度,仅作出定性分析。

透射光谱中存在2个超模式FBG谐振峰,谐振波长取决于布拉格谐振条件,即

$$\lambda_{B,i}(X) = 2n_{\text{eff},i}(X) \cdot \Lambda(X), \quad (6)$$

式中: $i=1,2$ 对应SCF的类HE<sub>11</sub>超模式和类HE<sub>12</sub>超模式; $\Lambda$ 为FBG周期,其值为刻写光栅时所用相位掩模板周期的1/2。式(6)两侧对 $X$ 求导数,可得超模式FBG谐振峰对 $X$ 的灵敏度为

$$\frac{d\lambda_{B,i}(X)}{dX} = \lambda_{B,i}(X) \cdot \left( \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dX} + \frac{1}{n_{\text{eff},i}} \cdot \frac{dn_{\text{eff},i}}{dX} \right), \quad (7)$$

式中: $(1/\Lambda) \cdot (d\Lambda/dX)$ 为光纤长度变化对光栅灵敏度的贡献; $(1/n_{\text{eff},i}) \cdot (dn_{\text{eff},i}/dX)$ 为光纤超模式有效折射率变化对光栅灵敏度的贡献,对于温度变化和轴向拉伸应变,上述两项的值都为正数,在光谱中体现为红移,因缺乏足够的信息,所以无法定量地计算光栅的温度灵敏度和应变灵敏度,仅作出定性分析。

当温度和应变同时作用于SCF时,其超模式的有效折射率之差以及光纤长度相应发生变化,从而使满足上述相位条件的 $\lambda_{\text{dip}1}$ 发生变化,引起干涉光谱波谷的波长漂移,可表示为

$$\Delta \lambda_{\text{dip}1} = K_{s1} \epsilon + K_{T1} \Delta T, \quad (8)$$

式中: $K_{s1}$ 、 $K_{T1}$ 分别为干涉光谱波谷对应应变 $\epsilon$ 和温度变化 $\Delta T$ 的灵敏度。

当温度变化和应变作用于SCF-FBG时,其超模式的有效折射率和光栅周期都会相应发生变化,从而引起光栅谐振波长发生漂移,可表示为

$$\Delta \lambda_{\text{FBG}} = K_{s2} \epsilon + K_{T2} \Delta T, \quad (9)$$

式中: $K_{s2}$ 、 $K_{T2}$ 分别为FBG对应应变 $\epsilon$ 和温度变化 $\Delta T$ 的灵敏度。

因此,当实验测得干涉光谱波谷和超模式光栅谐振耦合峰的温度和应变灵敏度之后,根据式(8)、式(9),由测得的干涉光谱和光栅谐振峰的波长漂移来获知温度变化和应变的数值。计算方法<sup>[20]</sup>可表示为

$$\begin{bmatrix} \epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{s1} K_{T2} - K_{T1} K_{s2}} \begin{bmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{s2} & K_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{dip}1} \\ \Delta \lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $\Delta \lambda_{\text{dip}1}$ 、 $\Delta \lambda_{\text{FBG}}$ 分别为实验测得的干涉光谱波谷和光栅谐振峰的波长漂移。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 温度响应

为了研究传感器的温度响应特性,将光纤固定在位移平台上,将整个器件置于温控盒中,通过调谐可变

电阻实时控制温度变化,如图 4 所示。温控盒的温度  $T$  从  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高至  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,待光谱稳定后对光谱信息每间隔  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  进行一次记录。由于温控盒的误差范围在  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,影响了测量精度,故使用误差为  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的电子精密温度计来测量温控盒的温度,调整到合适的实验温度。

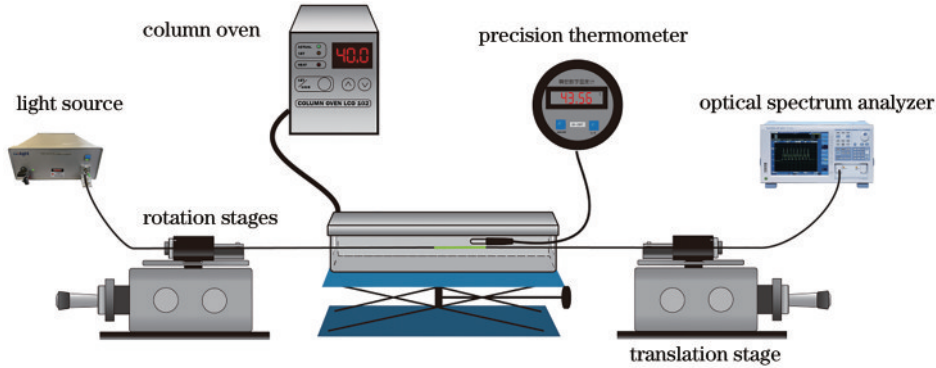


图 4 温度响应测量系统

Fig. 4 Temperature response measurement system

图 5 为光谱仪记录的传感器在不同温度条件下的透射光谱。从图 6(a)、图 6(b)可以清楚地观察到,随着温度的升高,dip1 和 FBG 的波长均出现红移,且呈良好的线性关系。追踪干涉波谷和光栅谐振峰的波长漂移,通过线性拟合可获得 FBG-S1 和 FBG-S2 的温度灵敏度分别为  $9.56\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  和  $9.55\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ,dip1 的温度灵敏度为  $11.8\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

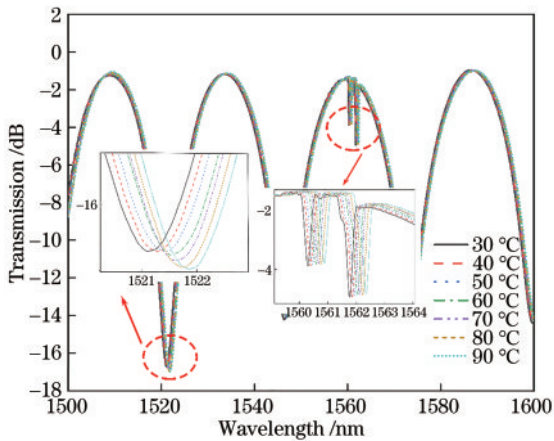


图 5 不同温度下的透射光谱响应图。插图:dip1、FBG-S1 和 FBG-S2 的波长随温度偏移

Fig. 5 Transmission spectra of the fiber sensor for various temperatures. Inset: wavelength shift of dip1 and FBG-S1 and FBG-S2 with temperature

#### 3.2 应变响应

实验装置的示意图和实验中使用的仪器,如图 7 所示。实验环境温度维持在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,将光纤固定在 2 个距离为  $290\text{ mm}$  的位移平台上。通过向外移动位移平台导致光纤长度拉伸,从而实现应力变化测量。将位移平台移动距离从  $0\text{ mm}$  逐步升高至  $0.7\text{ mm}$ ,待光谱稳定后每间隔  $0.1\text{ mm}$  进行测量,图 7 中对应的光纤微

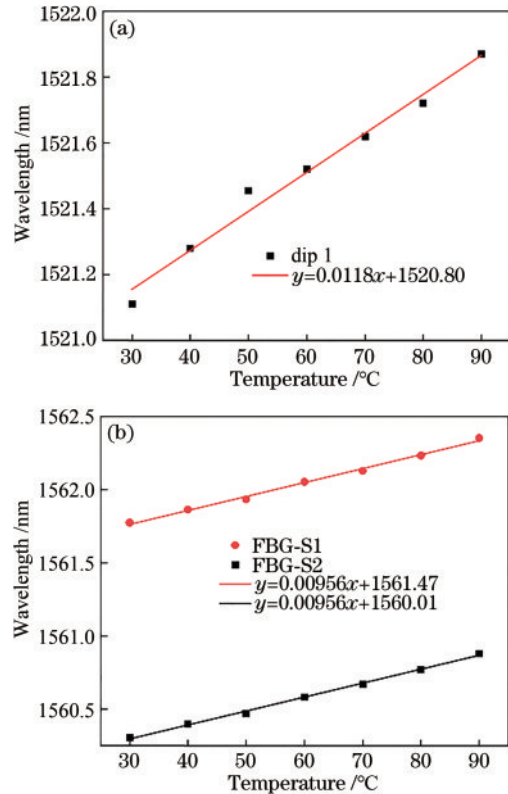


图 6 透射光谱的温度响应。(a) dip1 波长与温度的关系;(b) FBG-S1、FBG-S2 波长与温度的关系

Fig. 6 Transmission spectra of temperature response. (a) Relation between wavelength and temperature of dip1; (b) relation between wavelength and temperature of FBG-S1 and FBG-S2

应变关系为

$$\epsilon = \Delta l / l, \quad (11)$$

式中: $\Delta l$  为位移平台移动的距离; $l$  为 2 个平台之间的光纤长度。

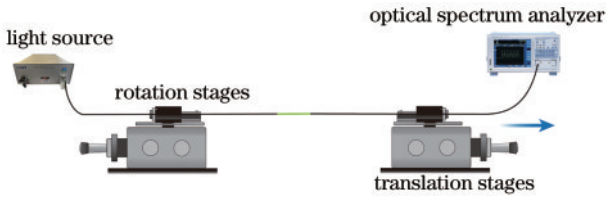


图 7 应变响应测量系统

Fig. 7 Strain response measurement system

图 8 为光谱仪记录的传感器在不同应变条件下的透射光谱。从图 9(a)、图 9(b)可以清楚地观察到,随着应力的增加,dip1 线性蓝移,而 FBG 波长随着应变增大,而线性红移。通过线性拟合可获得 FBG-S1 和 FBG-S2 的应力灵敏度分别为  $0.64 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $0.584 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , dip1 的应力灵敏度为  $-0.925 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

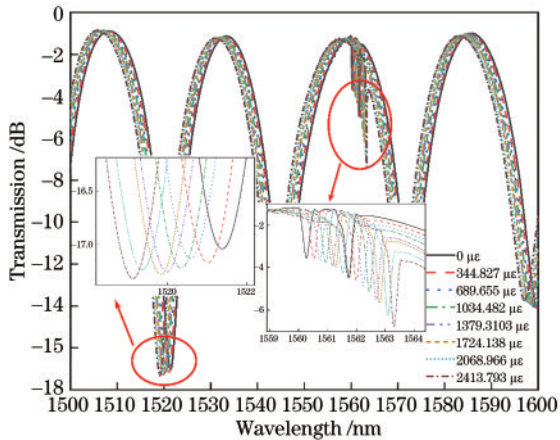


图 8 不同应力下的透射光谱响应图。插图:dip1、FBG-S1 和 FBG-S2 的波长随应力漂移

Fig. 8 Transmission spectra of the fiber sensor for various strains. Inset: wavelength shift of dip1 and FBG-S1 and FBG-S2 with strain

### 3.3 同时测量

上述实验中已知该传感器的干涉光谱和 FBG 分别对温度和应变产生不同的响应灵敏度,证实了该器件具备双参量同时测量的特点。根据式(10),通过追踪干涉光谱 dip1 和 FBG-S1 的波长漂移,即可同时确定温度和应变:

$$\begin{bmatrix} \epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.583 & 0.72 \\ 0.039 & 0.056 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{dip1}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG-S1}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

通过该矩阵方程,测量 dip1 和 FBG-S1 的波长漂移,可计算出实际的应变和温度变化。

图 10 为在给定温度为  $60^\circ\text{C}$  和应力为  $1034.482 \mu\epsilon$  时,实际施加的应力和温度与对应温度和应力的波长漂移量代入式(12)所得的计算结果之间的比较。实线为理想器件性能匹配的施加值。温度和应变标准差分别为  $\pm 1.90^\circ\text{C}$  和  $\pm 51.34 \mu\epsilon$ ,这些值可以看作是传感器的精度。造成误差最主要的原因是设备精密度(如:温控盒精准控温和位移平台等)。此外,还可以对器件

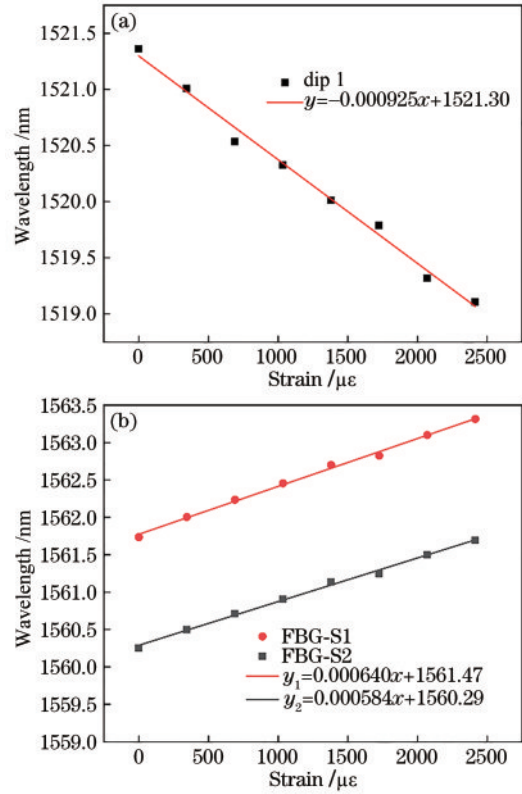


图 9 透射光谱的应变响应。(a) dip1 波长与应变的关系; (b) FBG-S1、FBG-S2 波长与应变的关系

Fig. 9 Transmission spectra of strain response. (a) Relation between wavelength and strain of dip1; (b) relation between wavelength and strain of FBG-S1 and FBG-S2

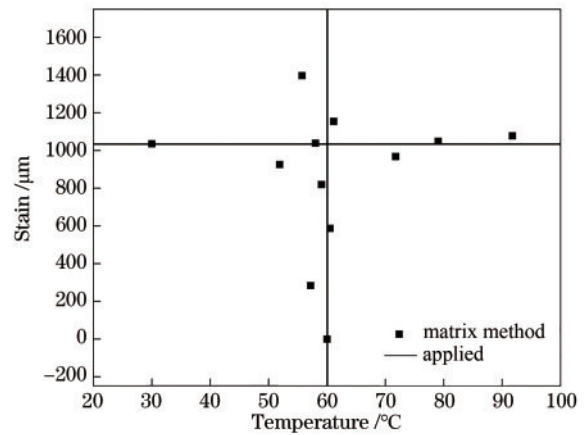


图 10 式(12)计算所得结果与施加温度和应力作比较  
Fig. 10 Calculated results with Eq. (12) compared with applied curvature and temperature

制备工艺进行优化,以提高传感性能。

## 4 结 论

采用强耦合 SCF 中心纤芯与两段标准单模中心对齐熔接,将 FBG 刻写入 SCF 的方式,实现了一种结构简单、紧凑,可以同时测量温度和应变的强耦合 SCF 超模式 FBG。实验证明了该传感器对温度具有

良好的线性响应,FBG-S1和FBG-S2的温度灵敏度分别为  $9.56 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $9.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , dip1 的温度灵敏度为  $11.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。对于应变而言,FBG与dip1呈现出相反的线性趋势,FBG-S1和FBG-S2的应变灵敏度分别为  $0.64 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $0.584 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , dip1 的应力灵敏度为  $-0.925 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。通过测量干涉光谱和布拉格谐振耦合峰的波长漂移,可实现对应变和温度的同时测量,进而证明了FBG与基于SCF的结构相结合是实现双参数同时测量传感器的有效途径。

### 参 考 文 献

- [1] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [3] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [4] James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(12): 1133-1134.
- [5] Wu C, Guan B O, Wang Z, et al. Characterization of pressure response of Bragg gratings in grapefruit microstructured fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(9): 1392-1397.
- [6] Fender A, MacPherson W N, Maier R R J, et al. Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1292-1298.
- [7] Flockhart G M H, MacPherson W N, Barton J S, et al. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(6): 387-389.
- [8] Kong J, Zhou A, Cheng C, et al. Two-axis bending sensor based on cascaded eccentric core fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(11): 1237-1240.
- [9] Zhang H L, Wu Z F, Shum P P, et al. Fiber Bragg gratings in heterogeneous multicore fiber for directional bending sensing[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085705.
- [10] Antonio-Lopez J E, Eznaveh Z S, Likamwa P, et al. Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to  $1000^\circ\text{C}$ [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4309-4312.
- [11] Dong J T, Cheng C H, Wu C, et al. Highly sensitive optofluidic refractive index sensor based on a seven-liquid-core Teflon-cladding fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26218-26227.
- [12] Salceda-Delgado G, Van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, et al. Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1468-1471.
- [13] Tan F Z, Liu Z Y, Tu J J, et al. Torsion sensor based on inter-core mode coupling in seven-core fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 19835-19844.
- [14] van Newkirk A, Antonio-Lopez E, Salceda-Delgado G, et al. Optimization of multicore fiber for high-temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4812-4815.
- [15] Villatoro J, Antonio-Lopez E, Zubia J, et al. Interferometer based on strongly coupled multi-core optical fiber for accurate vibration sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25734-25740.
- [16] Villatoro J, Arrizabalaga O, Durana G, et al. Accurate strain sensing based on super-mode interference in strongly coupled multi-core optical fibres[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4451.
- [17] Yoon M S, Lee S B, Han Y G. In-line interferometer based on intermodal coupling of a multicore fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18316-18322.
- [18] Kishi N, Yamashita E, Atsuki K. Modal and coupling field analysis of optical fibers with circularly distributed multiple cores and a central core[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(8): 991-996.
- [19] Kishi N, Yamashita E, Atsuki K. Modal and coupling field analysis of optical fibers with circularly distributed multiple cores and a central core[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(8): 991-996.
- [20] Zhou Y, Zhou W J, Chan C C, et al. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on PCF-based interferometer and fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5669-5672.