光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024031801

单模-空芯-单模光纤微结构应变传感特性研究

王　磊[1,2]，张钰民[1,2]，姚霁峰[3]，骆　飞[1,2]，祝连庆[1,2]*

（1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192；
2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016；3. 广州南沙光子感知技术研究院，广州 511462）

摘　要： 设计了一种单模-空芯-单模光纤微结构应变传感器，利用光束传播法进行仿真分析，建立了波长-应变关系模型，并对其应变特性、温度特性进行实验研究。实验结果表明，在 0～340 με 范围内的拉伸应变灵敏度和－340～0 με 范围内的压缩应变灵敏度分别高达－4.19 和－4.26 pm/με，线性度分别为 0.997 1 和 0.998 1；在 20～70 ℃范围内的温度灵敏度为 9.6 pm/℃，线性度达到 0.990 9。该传感器制作简单且具有较高的应变灵敏度，可以实现应变测量。

关键词： 空芯光纤；多模干涉；应变传感器；灵敏度；光纤传感

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0516－08

Research on the Strain Sensing Characteristics of Single Mode-Hollow Core-Single Mode Optical Fiber Microstructure

WANG Lei[1,2], ZHANG Yumin[1,2], YAO Jifeng[3], LUO Fei[1,2], ZHU Lianqing[1,2]

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science & Technol. University, Beijing 100192, CHN; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technol. University, Beijing 100016, CHN; 3. Guangzhou Nansha Intell. Photon. Sens. Research Institute, Guangzhou 511462, CHN)

Abstract: A single mode-hollow core-single mode (SHS) fiber microstructure strain sensor was proposed. A wavelength strain relationship model was established using the beam propagation method, and the strain and temperature characteristics of the SHS were experimentally studied. The experimental results showed that the tensile strain sensitivity in the range of 0～340 με and compressive strain sensitivity in the range of －340～0 με were as high as －4.19 pm/με and －4.26 pm/με, respectively, with linearity values of 0.997 1 and 0.998 1, respectively. In the range of 20～70 ℃, the temperature sensitivity was 9.6 pm/℃, and the linearity reached 0.990 9. This sensor is simple to make and has a high strain sensitivity.

Key words: hollow core fiber; multimode interference; strain sensor; sensitivity; optical fiber sensing

0　引言

随着工业化的迅速发展，人们对物体结构健康监测的需求不断提高。应变作为表征物体结构受力变形程度的物理量[1]对于结构状态监测至关重要。因此，应变测量在机械故障诊断、材料测试、汽车工程、航空航天等多个领域具有广泛应用。传统的应变测量如电阻应变测量法，存在耐腐蚀性差、易受电磁环境干扰等缺点，光纤传感器因其体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰等[2]优点被广泛应用于应变、温度、折射率等物理量的测量。

光纤光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）应变传

收稿日期：2024－03－18.
基金项目：北京学者计划研究项目(BJXZ2021-012-00046).
* **通信作者：**祝连庆

感器已经被应用于实际工程之中[2]。1993 年，Hill 等[3]首次提出相位掩模技术，利用相位掩模板后的±1 级衍射产生干涉条纹，再对光纤纤芯进行曝光来写入光栅；2023 年黄鹏宇等[4]提出了一种基于 FBG 的起落架载荷监测方法，标定过程中得到的 FBG 传感器的应变灵敏度为 1.18 pm/με；同年邹仕军等[5]应用 FBG 应变传感器在飞行实验中进行应变测量，FBG 的应变灵敏度系数为 1 pm/με。

然而，FBG 应变传感器受激光带宽限制，其应变灵敏度相比于干涉型应变传感器较低（通常在 1 pm/με 左右）[6]，对光栅刻写精度要求较高，制作过程还包括光纤增敏和光栅退火工艺，成本高昂。针对上述问题，基于空芯光纤（Hollow Core Fiber，HCF）的干涉型传感器，因其具备制作简单、成本较低、灵敏度高等优势，已经成为光纤传感领域的重要研究对象，并被广泛应用于应变传感研究中。

1995 年，Sirkis 等[7]提出了一种将 HCF 与两段单模光纤（Single Mode Fiber，SMF）熔接在一起的复合式光纤法布里-珀罗（Fabry-Perot，F-P）应变传感器，作为 F-P 腔的空芯光纤长度范围为 40～1 000 μm，经实验验证发现，传感器的传感特性与空芯光纤长度有关。但是，由于 F-P 腔中空气带来的光强损耗，使该结构空芯光纤的长度只能维持在微米量级。

2020 年，申佳鑫等[8]使用长度为 2.5 cm 小孔径空芯光纤（芯径为 5 μm）与布拉格光栅级联，实现温度与应变的双参数测量。空芯光纤温度与应变灵敏度分别为 1.802 1 pm/℃和 1.243 2 pm/με。由于空芯光纤部分的长度和芯径的限制，测得的应变灵敏度较低。

2022 年，Zhao 等[9]提出一种基于反谐振空芯光纤的微型 F-P 应变探头，应变灵敏度高达 2.05 pm/με。通过缩短反谐振空芯光纤的长度进一步提高了应变灵敏度。

2024 年，陈欣祎等[10]提出一种单模-多模-单模（Single Mode-Multimode-Single Mode，SMS）结构与 F-P 腔级联的应变和温度同时测量的双参数传感器，应变灵敏度分别达到－2.45 和－2.34 pm/με，温度灵敏度高达 11.85 和 5.59 pm/℃。

针对上述应变传感器存在的制作复杂、应变灵敏度较低等问题，本文设计了一种结构简单、易于制作、灵敏度较高的基于 HCF 多模干涉效应的应变传感器，该传感器的结构为单模-空芯-单模（Single Mode-Hollow Core-Single Mode，SHS）光纤结构。应变导致空芯光纤的结构参数发生变化，通过实时监测传感器多模干涉特征峰的波长漂移量，实现应变的实时测量。

1 传感器结构及原理

1.1 SHS 光纤微结构传感器设计

SHS 光纤结构如图 1 所示，由两根单模光纤和一段长为 55 mm 空芯光纤熔接制成，其中两根单模光纤与空芯光纤的包层直径同为 125 μm，单模光纤的纤芯直径（9 μm）大于空芯光纤的空气纤芯直径（2.3 μm），通过芯径失配实现模间干涉。

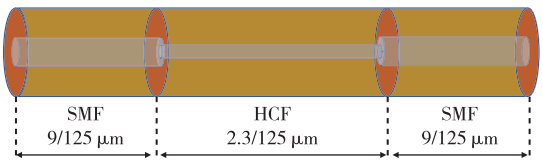


图 1 光纤应变传感器结构图

1.2 SHS 光纤微结构传感器传感原理

来自宽带光源的入射光从输入端单模光纤传输至空芯光纤时，由于单模光纤与空芯光纤的纤芯直径不同，在熔接处发生模式失配效应，产生不同高阶模式的传输光，这些高阶模式依据各自不同纵向传播常数在空芯光纤中继续传播并发生模间干涉[11]，耦合到输出端单模光纤中，输出的透射谱具有一系列的波峰和波谷。根据多模干涉理论，透射谱的波峰和波谷对应的特征波长可以表示为：

$$\lambda_0 = p\left(\frac{n_{\text{eff}}D^2}{L}\right), p = 0,1,2,\cdots \tag{1}$$

式中，λ_0 为特征波长，p 为自映像系数，n_{eff} 为参与干涉的模式之间的有效折射率差，D 为空芯光纤有效模场直径，L 为空芯光纤的轴向长度。由公式（1）可知，传感器的特征波长主要受外界环境折射率、空芯光纤长度和模场直径影响。

如果在传感器上施加应变或者环境温度发生变化，由于 HCF 长度和 HCF 侧壁中传输各阶次模式有效折射率的改变，相应多模干涉特征峰的波长也会发生变化[8]。

在测量应变时，由于弹性光学效应，有效折射率和 HCF 长度的变化都是由应变引起的[12]。当光纤受到轴向应变时，波长的相对漂移表示为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(1 + \frac{L}{\Delta n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial L}\right)\Delta\varepsilon \tag{2}$$

式中，$\Delta\lambda$ 是由应变引起的波长变化，$\Delta\varepsilon$ 是施加的应变。

当测量温度时，因热膨胀和热光效应，由温度引起的波长漂移可表示为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}+\frac{1}{\Delta n_{\mathrm{eff}}}\cdot\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial T}\right)\Delta T \tag{3}$$

式中，$\Delta\lambda$ 是温度引起的波长变化，ΔT 是外界的温度变化。

2　基于光束传播法的空芯光纤数值仿真

2.1　光纤结构的参数设置

光束传播法是通过求解波动方程或亥姆霍兹方程来模拟光在波导中的传播过程。使用光学仿真软件 Rsoft 中的 BeamPROP 模块基于光束传播法对 SHS 结构的纤芯和包层的纵向光场能量分布进行仿真，设定 SMF 包层折射率为 1.462 8，纤芯折射率为 1.468 2，HCF 的长度为 55 mm，包层折射率为 1.446，空气纤芯折射率为 1。如图 2 所示，仿真结果表明，当 HCF 空气纤芯直径小于 SMF 纤芯直径时，由于芯径失配以及空气芯与包层的有效折射率差较大，SMF 纤芯中传输的基模可以耦合至 HCF 侧壁中以多模形式传输并发生多模干涉效应，通过观察干涉谱的变化可实现应变参数传感[13]。

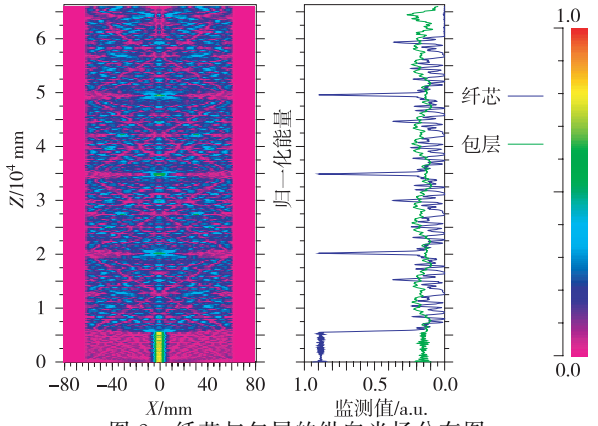


图 2　纤芯与包层的纵向光场分布图

根据仿真结果分析与以往研究[8]可知，HCF 长度越长，从 HCF 耦合至输出端 SMF 的光波透射率越高，对应的多模干涉特征峰的应变和温度灵敏度越高。然而当 HCF 长度过长时，会导致透射谱出现过多的干涉峰且容易出现光纤微弯，影响测量结果。本文结合多模干涉特征峰数量以及提高应变灵敏度进行分析，设定 HCF 长度为 55 mm。

2.2　拉伸应变仿真结果分析

为了检验拉伸应变对 SHS 结构透射谱的影响，设定了不同的应变值进行仿真实验，其中应变以 500 με 为步进，从 0 με 增加到 3 000 με，对应的 HCF 的长度从 55 mm 增加到 55.165 mm，包层直径从 125 μm 减小到 124.936 25 μm，空气纤芯直径从 2.5 μm 减小到 2.492 5 μm。仿真结果如图 3 所示。在应变从 0 με 增加到 3 000 με 的过程中，其透射谱特征波长分别为 1 548.8，1 547.5，1 546.1，1 544.9，1 543.6，1 542.4，1 541.2 nm，透射强度从 −34.957 dB 增加到 −27.84 dB。结果表明，在 0～3 000 με 范围内，随着拉伸应变的增加，SHS 结构的透射谱向短波长方向漂移，即发生“蓝移”现象。

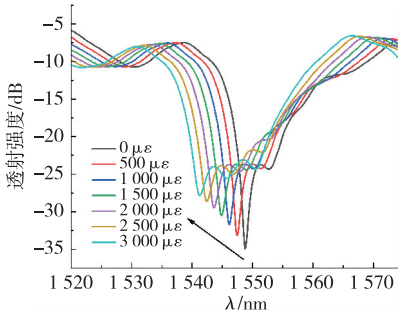


图 3　施加拉伸应变时透射谱的变化

将特征波长与其对应的应变值进行线性拟合，得到的特征波长与应变的关系如图 4 所示，应变灵敏度为 −2.54 pm/με，线性度为 0.999 44。结果表明，空芯光纤长度和直径的变化会影响透射谱的特征波长，与传感理论部分得出的结论一致。

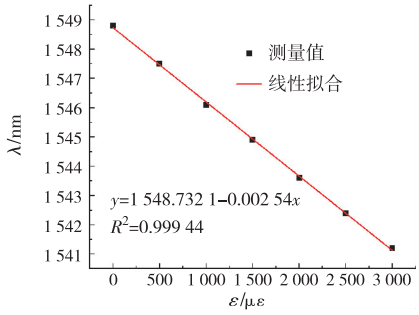


图 4　特征波长与拉伸应变的关系

2.3　压缩应变仿真结果分析

为了检验压缩应变对 SHS 结构透射谱的影响，设定了不同的应变值进行仿真实验，其中应变以 −500 με（＋表示拉伸，－表示压缩[14]）为步进，从 0 με 增加到 −3 000 με，对应的 HCF 的长度从 55 mm 减小到 54.835 mm，包层直径从 125 μm 增加到 125.063 75 μm，空气纤芯直径从 2.5 μm 增加

到 2.507 5 μm。仿真结果如图 5 所示，在应变从 0 增加到−3 000 με 的过程中，透射谱的特征波长分别为 1 548.8，1 549.7，1 550.6，1 551.6，1 552.5，1 553.4，1 554.4 nm，对应的透射强度从−34.957 dB 减小到−54.26 dB。结果表明，在 0～−3 000 με 范围内，随着压缩应变的增加，SHS 结构的透射谱向长波长方向偏移，即发生“红移”现象。

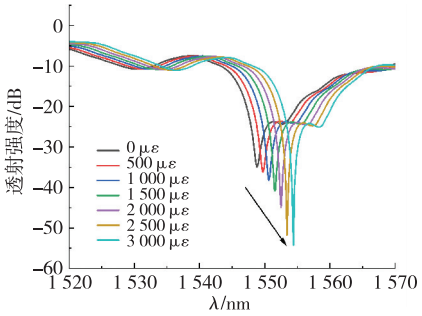


图 5 施加压缩应变时透射谱的变化

将特征波长与其对应的应变值进行线性拟合，得到的特征波长与应变的关系如图 6 所示，应变灵敏度为−1.86 pm/με，线性度为 0.999 78。

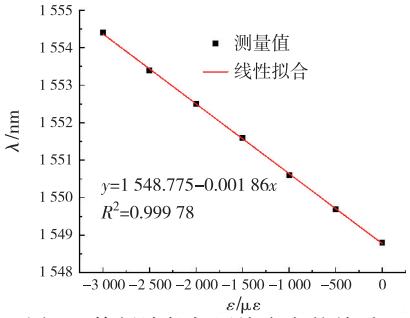


图 6 特征波长与压缩应变的关系

3 传感器制作及实验系统搭建

3.1 SHS 光纤微结构传感器的制作

制备光纤传感器，单模光纤选用正通飞达公司的单模光纤跳线，包层直径为 125 μm，纤芯直径为 9 μm；HCF 选用 Polymicro Technolohies 公司的 TSP005150 纯石英空芯光纤，包层直径为 125 μm，纤芯直径为 2.3 μm。

传感器的制作过程[15]如图 7 所示，首先，使用剥线钳去除 SMF 与 HCF 的聚酰亚胺涂覆层，其次，使用光纤切割刀获取 SMF 和 HCF 平整的切割端面，最后，使用光纤熔接机进行 SMF 与 HCF 的两次熔接。

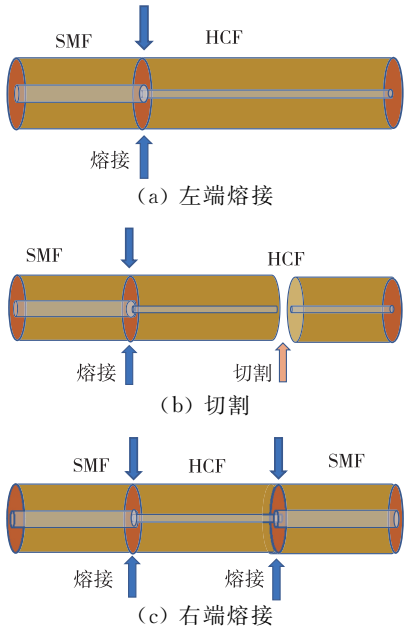


图 7 传感器制作过程示意图

3.2 实验系统搭建

分别搭建光纤传感器应变和温度测试系统，其中应变传感测试系统如图 8 所示，该系统由宽带光源、AQ6370D 光谱分析仪（Optical Spectrum Analyzer，OSA）、光纤应变传感器、应变加载装置、电阻应变片、四通道应变仪（WMSC1-4无线应变模

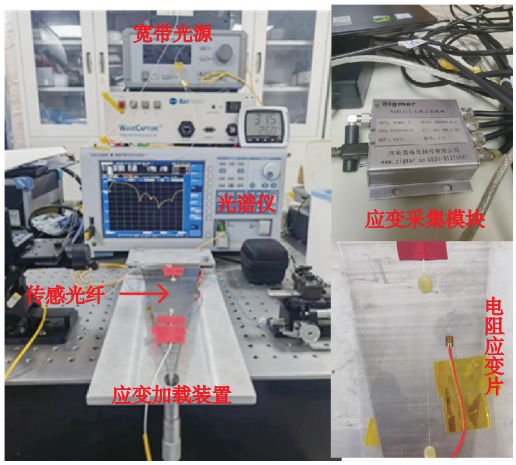


图 8 应变测试系统实物图

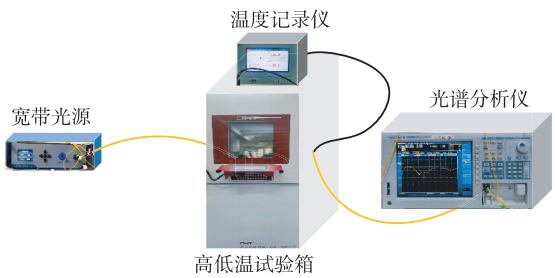


图 9 温度测试系统示意图

块)组成。温度传感测试系统示意图如图 9 所示，由宽带光源、OSA、高低温试验箱、温度记录仪、光纤传感器组成。光源产生的宽带光经过入射端单模光纤进入空芯光纤部分，外界应变或温度变化会导致空芯光纤的物理尺寸和有效折射率发生变化，OSA 连接输出端单模光纤，实时监测透射谱的变化。

对 SHS 结构光纤传感器进行测试分析，由 OSA 采集到 26 ℃ 自然伸直状态下的透射光谱图，如图 10 所示，在透射光谱中出现了具有多个透射峰特征的多模干涉信号。每个透射峰的特征波长以及对应的透射强度并不相同，这是由于 HCF 中多个高阶模式被激发，发生多模干涉[16-18]，HCF 长度和有效折射率差会影响干涉谷的特征波长。研究表明，空芯光纤部分的长度越长，透射谱的干涉谷数量越多[19]。后续实验将选用透射峰特征明显、透射强度较低的 dip1 和 dip3 作为传感器波长漂移的参考信号。

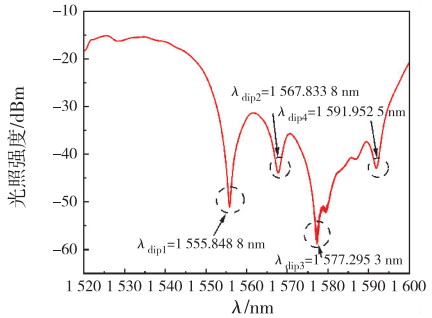


图 10　传感器的透射谱

4　实验结果与分析

4.1　SHS 光纤微结构拉伸应变特性

实验中等强度梁片固定有光纤传感器的一面与应变加载装置的微分头直接接触，通过应变加载装置使微分头上升改变等强度梁的挠度，对固定在等强度梁上的传感器施加应力。应变与挠度的关系为[20]：

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} y \tag{4}$$

式中，ε 为应变，h 为等强度梁的厚度，l 为等强度梁的有效长度，y 为挠度。等强度梁的各项参数为：$h=3$ mm，$l=300$ mm。1 mm 的挠度变化产生的应变量约为 33.3 $\mu\varepsilon$。为了避免温度变化带来的测量误差，室温保持在 26 ℃。实验中，以 66.6 $\mu\varepsilon$ 为理论应变变化单位，进行施加拉伸应变实验，利用 OSA 采集波长数据，应变记录仪采集等强度梁的真实应变值。

施加拉伸应变得到的透射光谱如图 11 所示，可以看出，随着应变的施加，SHS 光纤微结构应变传感器透射谱的多个干涉谷的特征波长发生蓝移，且波谷处的透射强度发生波动，如图 11 中的局域放大子图。

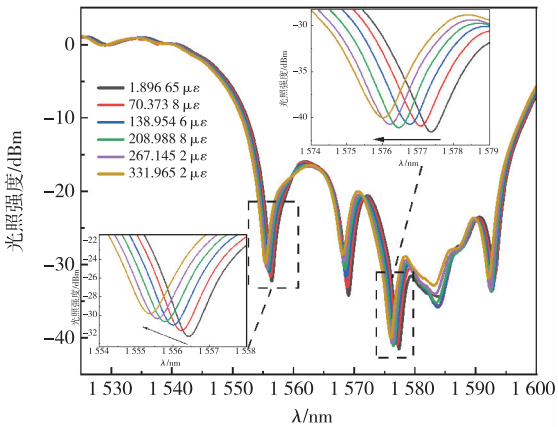


图 11　施加拉伸应变时的透射谱变化

对应变传感器的透射光谱数据进行寻谷处理，得到波谷的特征波长与拉伸应变变化量呈现线性关系，如图 12 所示。计算得到，SHS 光纤结构的应变灵敏度为 $K_{\mathrm{dip1},\varepsilon}=-3.23$ pm/$\mu\varepsilon$，R^2 值为 0.998 6；$K_{\mathrm{dip3},\varepsilon}=-4.19$ pm/$\mu\varepsilon$，R^2 值为 0.997 1。透射强度更低的 dip3 的应变灵敏度略高于 dip1 的应变灵敏度，在实际的应变测量过程中，可以选择应变灵敏度更高的 dip3 作为波长漂移的参考信号。

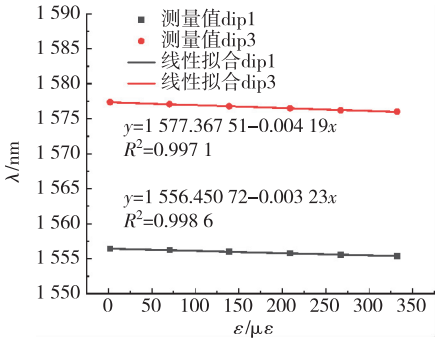


图 12　特征波长与拉伸应变的关系

4.2　SHS 光纤微结构压缩应变特性

旋转螺旋测微器设定每次上升高度为 2 mm，对等强度梁尖端施加应力，以 −66.6 $\mu\varepsilon$(+表示拉伸，−表示压缩)为理论应变变化单位，应变量从 0 $\mu\varepsilon$ 逐渐增大到 −333 $\mu\varepsilon$。进行压缩应变实验时，实验中等强度梁片及光纤传感器的位置如图 7 所示，利用 OSA 记录透射光谱数据，应变仪采集真实

应变数据。

当在室温(26 ℃)下,施加压缩应变时,应变传感器透射光谱变化如图 13 所示,可以看到,随着应变量的增加,透射光谱的多模干涉特征峰向长波长方向均匀移动,如图 13 中的局域放大子图所示,特征波长发生红移,波谷对应的透射强度发生波动。

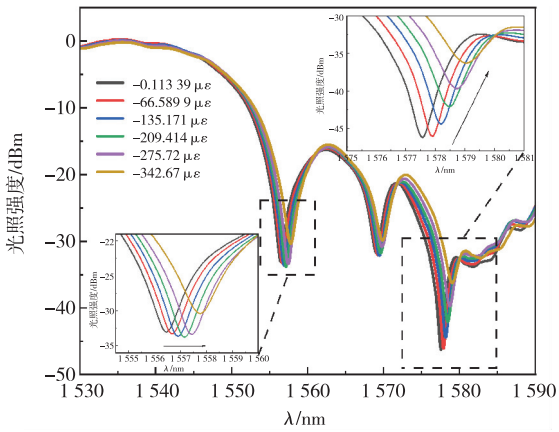


图 13 施加压缩应变时的透射谱变化

对应变传感器透射光谱数据进行寻谷处理,得到波谷的特征波长与压缩应变的对应关系如图 14 所示。可以看出,特征波长与对应的应变呈线性关系。计算得到,传感器的应变灵敏度为 $K_{dip1,\varepsilon}=-3.74$ pm/με,R^2 值为 0.993 9;$K_{dip3,\varepsilon}=-4.26$ pm/με,R^2 值为 0.998 1。

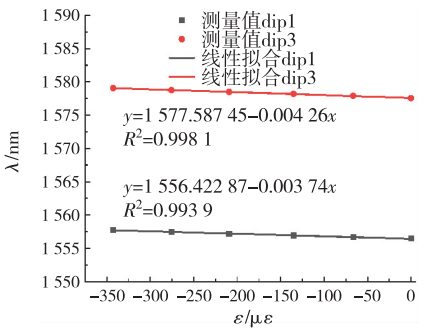


图 14 特征波长与压缩应变的关系

实验获取的透射光谱的变化趋势与仿真光谱相同,应变实验测得的传感器应变灵敏度与仿真结果存在差距。这是因为仿真时设置的光纤折射率与实验中使用的光纤折射率存在差距,仿真时设置的采样率为 0.1 nm,实验中光谱仪的采样率为 0.004 nm,这导致了仿真误差的产生,另一方面仿真过程中对光纤施加应力时,假定光纤受力均匀,空气纤芯直径变化为线性变化,实际实验中,空芯光纤受力分布不均也会对结果产生影响。

如表 1 所示,与常见的 3 种光纤应变传感器进行性能比较,可以发现 SHS 光纤微结构应变传感器具有较高的应变灵敏度,并且制作简单,可以用于应变监测领域。

表 1 常见光纤应变传感器性能比较

参考文献	类型	应变灵敏度/(pm·με^{-1})
[4]	FBG	1.18
[10]	SMS	−2.45
本文	SHS	−4.26
[10]	FPI	2.05

4.3 光纤应变传感器温度影响实验

温度实验的装置如图 9 所示,利用多禾试验设备有限公司的 DHT 高低温试验箱测试传感器的温度传感特性,温箱温度调节范围为−70～180 ℃,精度为±0.5 ℃。将自由状态的传感器放入高低温试验箱,使待测样品保持水平,避免弯曲带来的应力影响[21]。同时在传感器的同侧固定好温度记录仪的测温探头,温度记录仪的测温精度为±0.1 ℃,实时记录实际温度。以 20 ℃为起点,设定 10 ℃为温度变化梯度,升温至 70 ℃,每次温度改变后,待温度稳定 2 h 后,进行温度实验,用 OSA 记录透射谱数据,温度记录仪实时记录温度数据。在温度稳定阶段进行波长数据的记录得到的结果较为准确。

升温过程中传感器透射谱的演变过程如图 15 所示,在 20～70 ℃范围内,SHS 光纤结构的多模干涉特征峰随温度的升高向长波长方向漂移,发生红移现象。

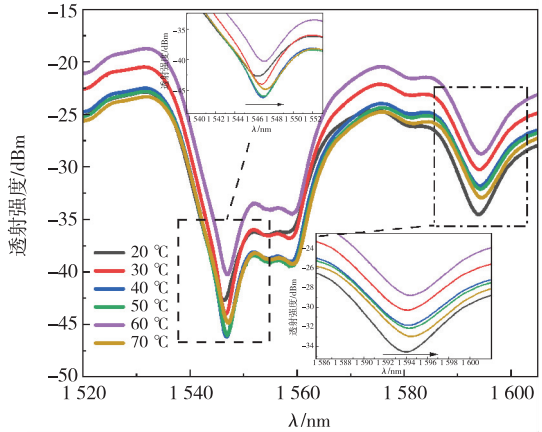


图 15 升温过程中 HCF 透射谱变化

对透射谱的特征波长和温度进行线性拟合,得到的传感器特征波长随温度的变化规律如图 16 所示,传感器的温度灵敏度为 9.6 pm/℃,线性度为 99.09%,拟合效果良好。

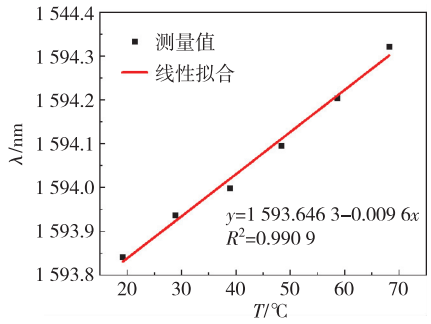


图 16　无应变时波长-温度对应曲线关系

上述分析表明，该 SHS 光纤微结构传感器的温度灵敏度与传统 FBG 的温度灵敏度基本一致，而应变灵敏度系数是 FBG 应变灵敏度系数的 3.5 倍。因此，在实际应用时，仍需考虑温度对应变测量的影响，其温度与应变的解耦方法可参照引入温度补偿 FBG、灵敏度系数不同的匹配传感器等途径实现[22-23]。

5　结论

本文利用多模干涉效应设计了一种制作简单、灵敏度高的 SHS 光纤微结构应变传感器，并基于光束传播法进行了仿真分析和实验验证。分析和验证结果均表明该传感器的应变灵敏度大幅提升，实测值可达−4.26 pm/με，温度灵敏度为 9.6 pm/℃，具有 99%以上的线性度。该 SHS 光纤微结构应变传感器能够实现应变的有效测量，在飞机结构健康监测领域具有应用前景。

参考文献：

[1] Liu D, Kumar R, Wei F, et al. Highly sensitive twist sensor based on partially silver coated hollow core fiber structure[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(17): 3672-3677.

[2] 陈　鸣，常建华，徐　遥，等. 基于空芯光纤的温度、湿度、应变同时测量光纤传感器[J]. 光学学报，2023，43(23)：36-46.
Chen Ming, Chang Jianhua, Xu Yao, et al. Optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature, humidity and strain based on hollow-core optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(23): 36-46.

[3] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Appl. Phys. Lett., 1998, 62(10): 1035-1037.

[4] 黄鹏宇，陈　诗，刘元凤，等. 基于 FBG 的某舰载机前起落架载荷监测技术研究[J]. 激光杂志，2023，44(7)：68-75.
Huang Pengyu, Chen Shi, Liu Yuanfeng, et al. Research on nose landing gear load monitoring technology of a certain carrier-based aircraft based on FBG[J]. Laser Magazine, 2023, 44(7): 68-75.

[5] 邹仕军，王雪婷，杜新悦. 光纤光栅(FBG)传感器在飞行试验应变测量中的应用[J]. 自动化应用，2023，64(9)：201-203.
Zou Shijun, Wang Xueting, Du Xinyue. Application of fiber grating (FBG) sensors in flight test strain measurement[J]. Automation Applications, 2023, 64(9): 201-203.

[6] 宋鑫本，朱晓亮，潘寒洁，等. 基于游标效应的可调节光纤应变传感器[J]. 激光与光电子学进展，2024，61(17)：1306004.
Song Xinben, Zhu Xiaoliang, Pan Hanjie, et al. Adjustable optical fiber strain sensor based on vernier effect[J]. Progress in Lasers and Optoelectronics, 2024, 61(17): 1306004.

[7] Sirkis J, Berkoff T A, Jones R T, et al. In-line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors[J]. J. Lightwave Technol., 1995, 13(7): 1256-1263.

[8] 申佳鑫，王　伟，张军英，等. 光纤布拉格光栅与空芯光纤多模干涉混合型温度应变双参量传感器[J]. 光子学报，2021，50(5)：166-173.
Shen Jiaxin, Wang Wei, Zhang Junying, et al. Fiber Bragg grating and hollow fiber multi-mode interference hybrid temperature strain dual parameter sensor[J]. Acta Photonics, 2021, 50(5): 166-173.

[9] Zhao X N, Wu X Q, Zuo C, et al. Miniatured Fabry-Perot strain probe based on anti-resonant hollow core fiber[J]. Measurement, 2022, 203: 111775.

[10] Chen X Y, He W, Li Z H, et al. Dual-parameter fiber sensor for temperature and strain based on SMS-FP composite structure[J]. Mod. Phys. Lett. B, 2023, 38(11): 2450069.

[11] 李　虎，郭子龙，杨文婷，等. 空芯光纤多模干涉型光纤液位传感技术研究[J]. 激光技术，2022，46(1)：120-124.
Li Hu, Guo Zilong, Yang Wenting, et al. Research on hollow-core fiber multi-mode interference type fiber level sensing technology[J]. Laser Technology, 2022, 46(1): 120-124.

[12] Dong L G, Gang T T, Bian C, et al. A high sensitivity optical fiber strain sensor based on hollow core tapering[J]. Opt. Fiber Technol., 2020, 56: 102179.

[13] 张　琪，何　巍，刘砚涛，等. 基于 SMS-FBG 结构的温度应变双参数传感特性研究[J]. 半导体光电，2023，44(2)：215-221.
Zhang Qi, He Wei, Liu Yantao, et al. Research on temperature strain dual-parameter sensing characteristics based on SMS-FBG structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(2): 215-221.

[14] 李依伦，李　敏. 材料力学中应力与应变的名称与正负定义[J]. 力学与实践，2017，39(5)：484-488.
Li Yilun, Li Min. Names and positive and negative definitions of stress and strain in materials mechanics[J]. Mechanics and Practice, 2017, 39(5): 484-488.

[15] Ling C, Wang Y, Li J, et al. Numerical and experimental

study on temperature measurement performance of SNS fiber optic sensor with liquid-sealed[J]. Opt. Fiber Technol., 2022, 73: 103042.

[16] Tang F, Zhou G, Li T, et al. Fe-C-coated single-mode-multimode-single-mode optical fiber sensor for steel corrosion monitoring[J]. IEEE Sensors J., 2022, 22(19): 18508-18516.

[17] Xu S, Wang Z, Yang H, et al. Optimization design of SNS sensor structural parameters for battery expansion monitoring[J]. Front. Energy Res., 2021, 9: 725458.

[18] Liu D, Li W, Wu Q, et al. Negative curvature hollow core fiber based all-fiber interferometer and its sensing applications to temperature and strain[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4763.

[19] Li C, Ning T, Li J, et al. Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. Opt. Laser Technol., 2017, 90: 179-184.

[20] 朱少华, 章征林, 仇唐国, 等. 等强度梁表面应变分布光纤测量实验[J]. 压电与声光, 2019, 41(6): 809-813.
Zhu Shaohua, Zhang Zhenglin, Qiu Tangguo, et al. Optical fiber measurement experiment of surface strain distribution of equal-strength beams[J]. Piezoelectricity and Acousto-Optics, 2019, 41(6): 809-813.

[21] 汪柯红, 余 洋, 王 洋, 等. 空芯光纤的双机理温度传感特性比较[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 67-75.
Wang Kehong, Yu Yang, Wang Yang, et al. Comparison of dual-mechanism temperature sensing characteristics of hollow-core optical fibers[J]. Acta Photonics, 2022, 51(11): 67-75.

[22] 胡辽林, 张卫超. 基于参考光栅的光纤光栅应变测量温度补偿[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(11): 39-45.
Hu Liaolin, Zhang Weichao. Temperature compensation for fiber grating strain measurement based on reference grating[J]. Laboratory Research and Exploration, 2014, 33(11): 39-45.

[23] 谭 展, 廖常锐, 刘 申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 98-104.
Tan Zhan, Liao Changrui, Liu Shen, et al. Simultaneous temperature strain measurement sensor based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 98-104.

作者简介:

王 磊(1998—),男,山东省济南市人,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术与光电器件;

张钰民(1982—),男,北京市人,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器。