光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023010502

# 基于 SMS-FBG 结构的温度应变双参数传感特性研究

张　琪[1,2]，何　巍[1,2*]，刘砚涛[3]，张钰民[1,2]，李智翰[1,2]，陈欣祎[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 100016；
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. 北京强度环境研究所，北京 100076）

**摘　要：** 提出了一种基于单模-多模-单模（SMS）光纤干涉结构级联光纤布拉格光栅（FBG）的光纤微结构温度应变双参数测量传感器，并对其应变特性、温度特性进行了实验研究。通过采用光纤熔接手段将长度为 35.5 mm 的多模光纤熔接在两段单模光纤之间，构成 SMS 光纤干涉结构，并通过级联 FBG 制成温度应变双参数测量传感器。结果证明，在 200～2 000 με 应变范围内，单模-多模-单模干涉结构和 FBG 的应变灵敏度分别为－2.31 和 1.22 pm/με，线性度分别达到 0.999 2 和 0.999 4；在 580～700 ℃温度范围内，其温度灵敏度分别为 58.79 和 13.64 pm/℃，线性度分别达到 0.996 7 和 0.998 2，可实现温度、应变双参数的同时测量。

**关键词：** 光纤传感；温度；应变；双参数测量；单模-多模-单模；光纤布拉格光栅

**中图分类号：** TN253　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0215－07

## Research on Temperature Strain Dual-parameters Sensing Characteristics Based on SMS-FBG Structure

ZHANG Qi[1,2], HE Wei[1,2], LIU Yantao[3], ZHANG Yumin[1,2], LI Zhihan[1,2], CHEN Xinyi[1,2]

(1. Beijing Informat Sci. & Technol. Univ., Key Lab. Minist. Educ. Optoelect. Measurement Technol., Beijing 100016, CHN;
2. Beijing Informat Sci. & Technol. Univ., Beijing Lab. Opt. Fiber Sensing & Syst., Beijing 100016, CHN;
3. Beijing Institute of Intensity Environment, Beijing 100076, CHN)

**Abstract:** A fiber micro structure temperature strain dual parameter measurement sensor based on singlemode-multimode-singlemode (SMS) optical fiber interference structure cascaded fiber Bragg grating (FBG) is proposed. Its strain characteristics and temperature characteristics were experimentally studied. The multimode optical fiber with a length of 35.5 mm was fused between two singlemode optical fibers by means of optical fiber fusion to form a singlemode-multimode-singlemode optical fiber interference structure, and a temperature strain dual parameter measurement sensor was made by cascading FBGs. The results show that, in the strain range of 200～2000 με, the strain sensitivity of singlemode-multimode-singlemode interference structure and FBG is －2.31 and 1.22 pm/με respectively, and the linearity is 0.999 2 and 0.999 4 respectively. In the temperature range of 580～700 ℃, the temperature sensitivity of singlemode-multimode-singlemode interference structure and FBG is 58.79 and 13.64 pm/℃ respectively, and the linearity reaches 0.996 7 and 0.998 2 respectively, which can realize simultaneous measurement of temperature and strain parameters.

**Key words:** optical fiber sensing; temperature; strain; dual-parameters measurement; singlemode-multimode-singlemode; fiber Bragg grating

**收稿日期：**2023－01－05.

**基金项目：**国家自然科学基金项目(52105540)；高等学校学科创新引智计划项目(D17021)；北京市自然基金-市教委联合基金项目(KZ201911232044).

* **通信作者：**何　巍　**E-mail:** gregg1986@sina.com

## 0 引言

光纤传感技术具有网络容量大、测量参数多、效率精度高、完全抗强电磁干扰、响应速度快及稳定性好等特点，已广泛应用于军事、工业、民生、环境等各大领域[1]，可实现温度、应变、振动、扭力、角度、压力和折射率等多种物理参量的测量[2-7]。其中，光纤干涉式传感器和光纤光栅传感器对结构力热状态的实时监测已经成为研究热点之一，受到众多学者的广泛关注。

光纤布拉格光栅传感器[8-10]作为一种小型化的无源反射型传感器件，具有不受电磁干扰、体积小、质量轻、稳定性好等优势，能够封装于运载火箭发动机、贮箱材料的内部。Hsiao 等[11]研究了一种基于金属涂层光纤布拉格光栅(FBG)的高温光纤传感器，利用溅射技术在 FBG 表面涂覆了掺氮金属膜，其在 100～650 ℃范围内具有 14.0 pm/℃的温度灵敏度；Du 等[12]设计了一种采用铝合金封装的 FBG 温度传感器，结果表明铝合金封装成 FBG 传感器在－55～70 ℃范围内的温度灵敏度为裸 FBG 传感器的 2 倍，达到了 25.7 pm/℃；吴昊等[13]利用超短 FBG 结合铝材殷钢双金属增敏结构设计了一种尺寸较小的高灵敏度温度传感器，在 20～40 ℃范围内其温度灵敏度高达 292.59 pm/℃。上述研究证明 FBG 传感器只能测量单一参量，无法实现复杂环境下的多参数测量。

在光纤传感领域，光纤干涉式传感器[14-15]具有易于制作、成本较低、灵敏度高等优点，其结构种类多变，基于不同干涉原理主要分为光纤法布里-珀罗干涉传感器、光纤马赫-曾德尔传感器、光纤萨格纳克干涉传感器等。2018 年，Chen 等[16]提出了一种将二甲基硅氧烷填充在空心光纤中的光纤温度传感器上，在 51.2～70.5 ℃范围内具有 2.703 5 nm/℃的高温灵敏度；2019 年，冯文林等[17]提出了一种端面腐蚀的双 F-P 光纤温度传感器，分别以光子晶体光纤和多模光纤作为两个 F-P 腔，实现了 28～81 ℃范围内的温度传感，灵敏度达 64.6 pm/℃；郑亚如等[18]设计了一种基于腰椎扩径熔接马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪的温度光纤传感器。通过腰椎扩径熔接技术，制成球形-单模-球形结构的 M-Z 干涉仪，在 15～60 ℃温度范围内以 68 pm/℃灵敏度实现了温度测量。现阶段光纤干涉式传感器仍存在结构脆弱、结构复杂、难以实现多参数测量等问题，限制了其在极端环境条件下的应用。

针对上述问题，以实现复杂极端环境下温度应变多参数测量为目标，本文提出了一种使用飞秒激光刻写 FBG 级联单模-多模-单模(SMS)光纤干涉结构的传感器同时测量温度和应变的方法。通过将 FBG 与 SMS 型干涉结构串联，制备温度、应变双参数传感器，并对其传感特性进行分析，通过计算得到灵敏度系数，在此基础上建立双参数传感矩阵，实现温度、应变双参数监测。

## 1 传感器原理与系统设计

SMS-FBG 温度、应变双参数传感器由 SMS 光纤干涉结构与 FBG 级联构成，其结构原理图如图 1 所示，其中 SMS 光纤干涉结构是利用光纤熔接技术在两段纤芯直径为 9 μm 的单模光纤(Single-Mode Fiber，SMF)之间熔接纤芯直径为 105 μm 的多模光纤(Multi-Mode Fiber，MMF)，MMF 长度为 35.5 mm，光通过 SMF 传入 MMF 激发高阶模式，在 MMF 纤芯中发生干涉现象，再由第二段 SMF 向后传输。针对紫外激光刻写光栅在高温环境下会出现退化的问题，设计采用飞秒激光逐点扫描方式制备栅区长度为 3 mm 的 FBG，并与 SMS 干涉结构级联，构成 SMS-FBG 双参数传感器。设计采用 C＋L 波段宽带光源作为测试光源，光经过 SMS-FBG 双参数传感器后由光谱分析仪采集透射光谱。SMS 干涉结构的透射谱中存在可用于传感的特征波谷，FBG 也存在一个可识别的透射波谷，且两者的温度、应变灵敏度系数存在差异，因此能够建立双参数矩阵实现温度、应变测量。

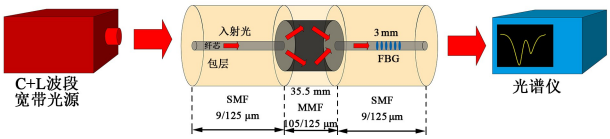



图 1 SMS-FBG 双参数传感系统原理图

由于 SMS 结构的单模光纤与多模光纤纤芯直径不同，在连接处会因失配激发不同模式从而实现干涉。两根相同的 SMF 分别轴向连接在 MMF 的两端，由于 MMF 纤芯直径大于 SMF 纤芯直径，当光束通过 SMF 到达与 MMF 的截面时，会激发 MMF 中的高阶本征模{$LP_{nm}$}。假设 SMF 和 MMF 的包层完全轴向对齐，只有对称模{$LP_{0m}$}可以被激发，MMF 中的输入场可以表示为[19]：

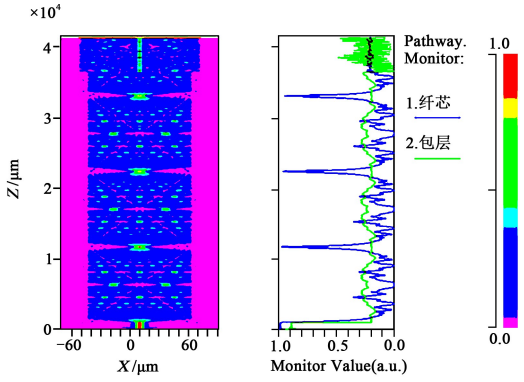
$$\Phi(x,0)=\sum_m^M c_m \Psi_m(x) \tag{1}$$

式中，$\Phi(x,0)$为 SMF 入射到 MMF 中的输入光场分布，$c_m$ 表示 MMF 中 $m$ 阶的激发系数，$M$ 为 MMF 中激发的 $LP_{0m}$ 模式数量，$\Psi_m(x)$为 $LP_{0m}$ 模式的光场分布，$x$ 为光纤截面上的径向坐标。光在 MMF 中传输时，当传输距离为 $y$ 时，可以计算其光场分布：

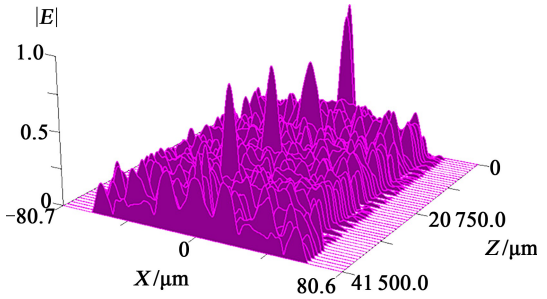
$$\Phi(x,y)=\sum_m^M c_m \Psi_m(x)\exp(\mathrm{i}\beta_m y) \tag{2}$$

式中，$\beta_m$ 为 $LP_{0m}$ 模式的传播常数。温度变化会使得 SMS 结构中 MMF 纤芯与包层的折射率发生变化，从而导致不同模式的激发系数与传播常数发生变化。结合热力学理论，温度与应变改变会使 MMF 的物理尺寸发生变化，从而导致输出光谱随参量变化发生漂移，实现温度与应变的测量。

对 SMS 结构中的纤芯和包层光场分布进行仿真，设定 SMF 包层折射率为 1.445，纤芯折射率为 1.447，MMF 长度为 35.5 mm，包层折射率为 1.427，纤芯折射率为 1.445。如图 2(a)所示，仿真结果表明，光从 SMF 进入 MMF 后激发高阶模式，在纤芯中发生模间干涉，包层中并未发生干涉现象，能够通过观察干涉谱实现参数传感。




(a) SMS 纤芯与包层内部光场二维分布图




(b) SMS 内部光场三维分布图

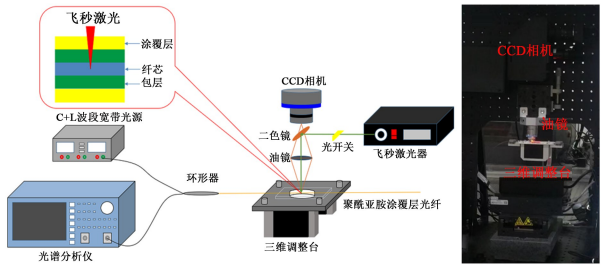
图 2　SMS 内部光场分布仿真

FBG 作为一种无源的反射型传感器件，栅区只会对特定波长的光产生反射，对其他波长的光没有任何影响。根据耦合模理论，FBG 的反射谱中心波长满足下式：

$$\lambda_B=2n_{\mathrm{eff}}\Lambda \tag{3}$$

式中，$\lambda_B$ 为中心波长，$n_{\mathrm{eff}}$ 为光栅的有效折射率，$\Lambda$ 为光栅周期。由式(3)可知，当温度、应变等外界参量引起光栅周期 $\Lambda$ 和有效折射率 $n_{\mathrm{eff}}$ 发生变化时，FBG 反射光中心波长会随之发生漂移，从而能够建立起 FBG 反射波长与外界参量的关系转化模型。

针对高温环境传感测试需求，采用飞秒激光透过光纤聚酰亚胺涂层直写技术，制备光纤光栅，避免因剥除涂覆层导致的光栅耐温性与机械强度大幅降低等问题。所设计的 FBG 飞秒激光刻写系统原理如图 3(a)所示，波长为 800 nm 的飞秒激光经过光开关、二色镜、64 倍油镜聚焦到光纤纤芯中。光纤固定在三维调整台上，通过三维调整台实现光纤的移动。三维调整台移动速度设定为 540 μm/s，飞秒激光器重频为 1 kHz，因此相邻刻写点的间隔为 540 nm，能够实现飞秒激光逐点扫描加工，采用 C+L 波段宽带光源与光谱分析仪对光栅光谱信号进行采集。由于纤芯有效折射率为 1.447，根据光栅方程可知，FBG 反射波长约为 1 562 nm，栅区长度设定为 3 mm。实验系统如图 3(b)所示。




(a) 原理图　　(b) 实物照片

图 3　飞秒激光刻写光纤光栅系统

根据 SMS 干涉结构与 FBG 对温度、应变参量的响应特性可知，当外界应变 ε 和温度 $T$ 发生变化时，FBG 和 SMS 光纤干涉结构的波长变化 $\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}$，$\Delta\lambda_{\mathrm{SMS}}$ 与应变变化 Δε、温度变化 $\Delta T$ 的相关关系如公式(4)所示。式中，$K_{\varepsilon 1}$，$K_{T1}$ 分别为 SMS 光纤干涉结构的应变灵敏度、温度灵敏度，$K_{\varepsilon 2}$，$K_{T2}$ 分别为 FBG 的应变灵敏度、温度灵敏度。

$$\begin{cases}\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}=K_{\varepsilon 1}\Delta\varepsilon+K_{T1}\Delta T\\ \Delta\lambda_{\mathrm{SMS}}=K_{\varepsilon 2}\Delta\varepsilon+K_{T2}\Delta T\end{cases} \tag{4}$$

## 2 实验及结果分析

根据 SMS-FBG 温度、应变双参数传感原理，进行传感器制备。实验中首先制备 SMS 干涉传感结构，选用 SMF-28e 型单模光纤和 MM-S105/125-22A 型多模光纤，其中单模光纤的纤芯直径为 8.5 μm，包层直径为 125 μm，多模光纤的纤芯和包层直径分别为 105 和 125 μm。对 MMF 与 SMF 进行清洗及切平处理，然后使用 Fujikura 公司的 19/80S 型号光纤熔接机实现两者熔接，其中 MMF 长度为 35.5 mm。接下来在一侧 SMF 上利用飞秒激光逐点扫描制备 FBG，栅区长度为 3.0 mm，中心波长值约为 1 562.75 nm。

搭建基于 SMS-FBG 温度应变传感器测试系统，其中应变、温度测试系统示意图如图 4(a)、(b)所示，高温测试系统如图 4(c)所示。该测试系统由光源、YOKOGAWA 公司生产的 AQ6370 光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer，OSA)、SMS-FBG 温度应变双参数传感器、弗恩森电炉有限公司生产的高温实验炉组成。如图 4 所示，光源产生的宽带光经过 SMS-FBG 双参数传感器透射进入 OSA，对 SMS-FBG 的透射谱信息进行实时采集。假设 SMS 干涉结构的透射谱波谷为 $A$，FBG 结构的透射谱波谷为 $B$，当外界参量发生变化时，$A$，$B$ 会出现不同的响应特性，其特征波谷可以作为参考信号。

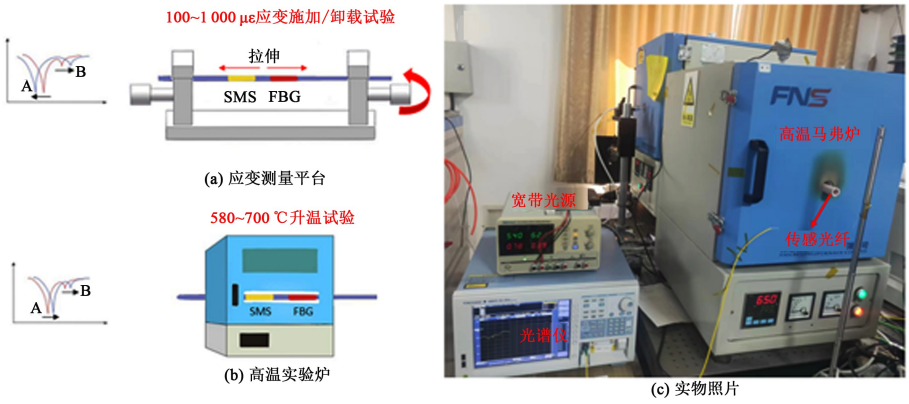
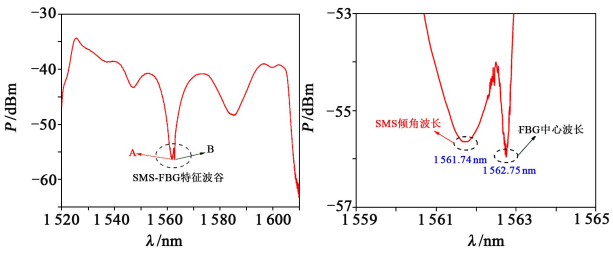



图 4 SMS-FBG 双参数传感器测试系统

对所设计的 SMS-FBG 温度、应变双参数传感器进行测试分析，由光谱仪采集到 25 ℃ 自然伸直状态下 SMS-FBG 双参数传感器透射光谱图，如图 5。由图 5(a)可知，SMS-FBG 双参数传感器的光谱整体表现为 SMS 结构的干涉谱叠加 FBG 的透射波谷，存在两个特征波谷，左边波谷 $A$ 为 SMS 干涉结构的倾角波长，$B$ 为 FBG 的中心波长，符合原理描述。其细节光谱如图 5(b)所示，SMS 倾角波长为 1 561.74 nm，FBG 初始中心波长为 1 562.75 nm。




(a) 双参数传感器的透射光谱曲线 (b) 透射光谱细节图

图 5 SMS-FBG 双参数传感器透射光谱

### 2.1 施加拉伸应变实验

实验中对 SMS-FBG 传感器进行应变测试，保持室温 25 ℃稳定条件下，将传感器两端分别固定在二维位移平台两端，方向与水平线平行，SMS 干涉结构与 FBG 均位于两个夹具之间，通过位移平台上的螺旋千分尺控制夹持器的位置，实现光纤的拉伸和压缩。传感器的透射光谱如图 6 所示，读取光谱仪采集的 1 510～1 600 nm 范围内的光谱数据，光谱仪分辨率为 0.5 nm。实验中，以 200 με 为应变变化单位，最大应变量为 2 000 με，进行施加拉伸应变实验，并用光谱仪记录透射光谱。施加拉伸应变时，

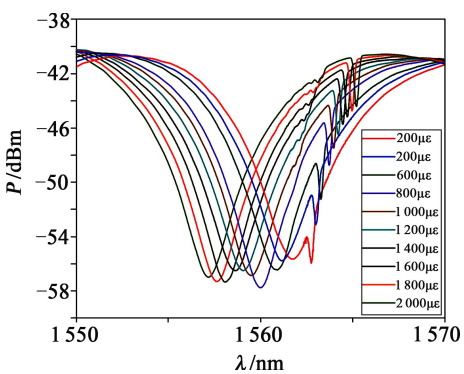
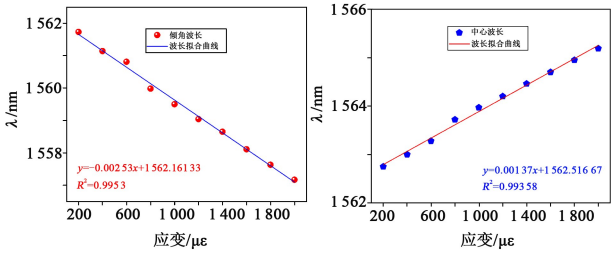


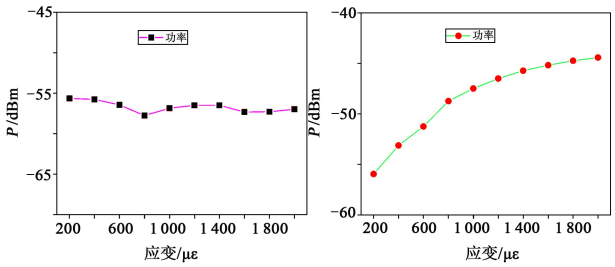

图 6 施加应变过程 SMS-FBG 双参数传感器光谱特性

SMS-FBG 复合传感器波长随应变变化曲线如图 6 所示。可以看出，随着应变的施加，SMS 干涉结构的倾角波长发生蓝移，且波谷处功率发生波动，FBG 中心波长发生红移，峰值功率随 SMS 干涉谱功率增大趋势而增大。

由分析可知，SMS 干涉结构的倾角波长与 FBG 中心波长均与应变变化量呈线性关系，如图 7(a)、(b)所示，SMS 波长变化的线性拟合度可达 0.995，应变灵敏度为 2.53 pm/με，其应变-波长曲线可由公式：$\lambda_{SMS}=-0.00253\varepsilon+1562.16133$ 表示。峰值功率在 −58～−55 dBm 范围内出现周期性波动，最大差值为 2.12 dBm，如图 7(c)所示，原因是 SMS 结构中光发生周期性干涉，导致输出功率按固有频率波动。FBG 波长变化的线性拟合度可达 0.994，应变灵敏度为 1.37 pm/με，其应变-波长曲线可由公式：$\lambda_{FBG}=0.00137\varepsilon+1562.51667$ 表示。峰值功率在 −56～−44 dBm 范围内逐渐增大，最大差值为 11.54 dBm，如图 7(d)所示。




(a) SMS 干涉结构透射波长与应变关系　(b) FBG 透射波长与应变关系

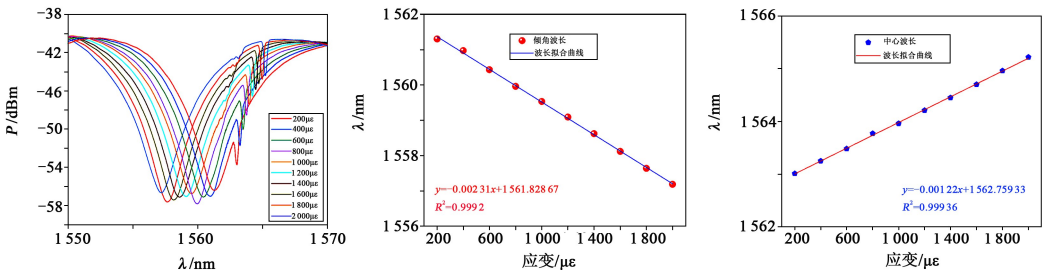



(c) SMS 干涉结构功率波动　(d) FBG 中心波长功率波动

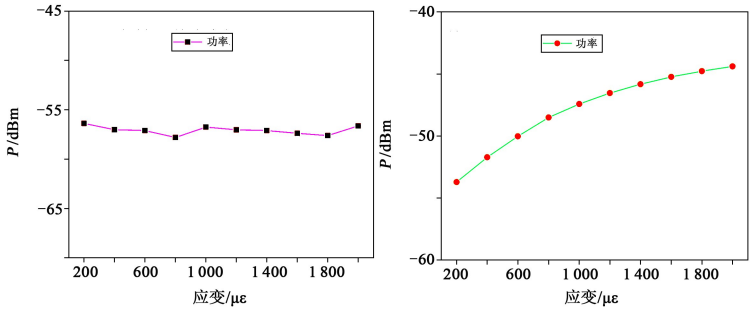
图 7　应变施加实验

## 2.2　卸载拉伸应变实验

接下来以 200 με 为应变变化单位进行应变卸载实验。随着应变的卸载，SMS 干涉结构的倾角波长发生红移，且波谷处功率发生波动，FBG 中心波长发生蓝移，峰值功率随 SMS 干涉谱功率减小而减小，如图 8(b)、(c)所示。SMS 波长变化的线性拟合度可达 0.999，应变灵敏度为 −2.31 pm/με，其应变-波长关系可由公式：$\lambda_{SMS}=-0.00231\varepsilon+1561.82867$ 表示。峰值功率在 −58～−55 dBm 范围内波动，最大差值为 1.32 dBm，如图 8(d)所示。FBG 中心波长的线性拟合度可达 0.999，应变灵敏度为 1.22 pm/με，其应变-波长关系可由公式：$\lambda_{FBG}=0.00122\varepsilon+1562.75933$ 表示。峰值功率在 −56～−44 dBm 范围内逐渐增大，最大差值为 11.33 dBm，如图 8(e)。




(a) 卸载应变过程 SMS-FBG 双参数传感器光谱特性　(b) SMS 干涉结构透射波长曲线与应变响应特性　(c) FBG 透射波长曲线与应变响应特性

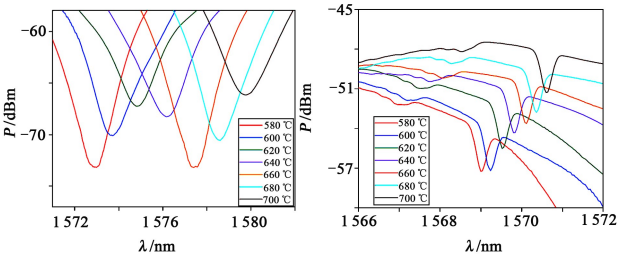



(d) SMS 干涉结构功率波动　(e) FBG 中心波长功率波动

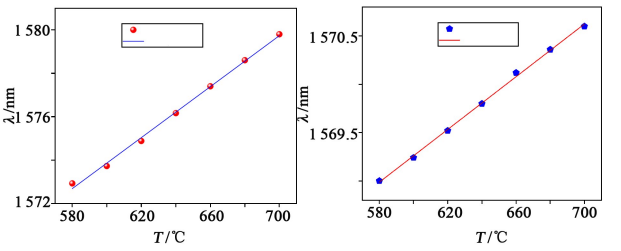
图 8　应变卸载实验结果

### 2.3 高温温度实验

应变测量完成后，将 SMS-FBG 双参数传感器置于高温炉内，使光纤处于自然伸直状态，保证其不受应变参量影响。以 580 ℃为起点，设定 20 ℃为温度变化梯度，升温至 700 ℃。每次温箱改变温度后，保温一小时，进行高温实验，并用光谱仪记录透射光谱。SMS 光纤干涉结构与 FBG 的温度响应曲线分别如图 9(a)、(b)所示，由于 SMS 干涉结构的温度灵敏度较高，在相同温度变化条件下 SMS 倾角波长漂移量较大，因此在 580～700 ℃范围内 FBG 的透射谱波谷漂移到 SMS 特征波谷的左侧。由图 9(c)、(d)可看出，随着温度升高，SMS 干涉结构的倾角波长与 FBG 的中心波长均发生红移，其灵敏度系数存在差异。SMS 干涉结构的线性拟合度可达 0.997，温度灵敏度为 58.79 pm/℃，其温度-波长曲线可由公式：$\lambda_{SMS}=0.058\,79T+1\,538.588\,57$ 表示。FBG 的线性拟合度可达 0.998，温度灵敏度可达 13.64 pm/℃，其温度-波长曲线可由公式：$\lambda_{FBG}=0.013\,64T+1\,561.074\,29$ 表示。




(a) SMS 光纤干涉结构随温度变化　(b) FBG 结构随温度变化




(c) SMS 干涉结构透射波长与温度响应　(d) FBG 透射波长与温度响应

图 9　580～700 ℃温度测量实验

综上所述，通过实验得到 SMS 结构与 FBG 的温度、应变灵敏度后，将其代入公式(4)，联立方程组，经过计算得到温度应变灵敏度矩阵如公式(5)所示，即可对温度与应变参量进行监测，实现温度与应变的双参数测量。

$$\begin{bmatrix}\Delta\varepsilon\\ \Delta T\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-2.31 & 58.79\\ 1.22 & 13.64\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{FBG}\\ \Delta\lambda_{SMS}\end{bmatrix} \tag{5}$$

## 3 结论

本文研究了一种基于 SMS 干涉结构级联飞秒刻写 FBG 的温度应变双参数传感器，建立了 SMS-FBG 传感器的应变-波长关系以及温度-波长关系模型，并对其应变特性、高温温度特性以及稳定性进行了实验验证，其中，SMS 干涉结构的倾角波长为 1 562.75 nm，FBG 的中心波长为 1 562.75 nm，二者构成 SMS-FBG 双参数传感器，在 200～2 000 με 应变范围与 580～700 ℃温度范围内，SMS 光纤干涉结构的应变灵敏度为 −2.31 pm/με，温度灵敏度达到 58.79 pm/℃；FBG 的应变灵敏度为 1.22 pm/με，温度灵敏度为 13.64 pm/℃，并在此基础上建立温度、应变双参数矩阵。所设计的 SMS-FBG 双参数传感结构能够有效实现温度、应变测量，在航空航天结构参数监测领域具有十分重要的应用价值。

**参考文献：**

[1] 邵　飞，杨　宁，孙　维，等. 基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究[J]. 航天器工程，2018，27(2)：95-103.
Shao Fei，Yang Ning，Sun Wei，et al. Research on spacecraft structural health monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Spacecraft Engineering，2018，27(2)：95-103.

[2] 张柳超，江　毅，王素梅，等. 基于飞秒激光加工的微纳高温光纤振动传感器[J]. 光学技术，2017，43(4)：334-338.
Zhang Liuchao，Jiang Yi，Wang Sumei，et al. A micro fiber optic vibration sensor fabricated by femtosecond laser for high temperature applications[J]. Optical Technique，2017，43(4)：334-338.

[3] Yin G L，Fu Q J，Yang P X，et al. Direction-discriminating torsion sensor based on optical fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt. Laser Technol.，2022，156：108461.

[4] Zheng L F，Zhang J S，Liang H J，et al. Angle sensor for humidity-insensitive angle measurement based on multimode interference[J]. Opt. Communications，2022，522：128579.

[5] 张雨彤，江　毅，崔　洋，等. 微纳光纤 Fabry-Perot 超低温压力传感器研究[J]. 光子学报，2022，51(5)：219-225.
Zhang Yutong，Jiang Yi，Cui Yang，et al. Research on the micro optical fiber Fabry-Perot ultra-low temperature pressure sensor[J]. Acta Photonica Sinica，2022，51(5)：219-225.

[6] 上官春梅，何　巍，张　雯，等. F-P 级联 MZ 温度、应变同时测量的光纤传感器[J]. 光通信技术，2018，42(1)：16-19.
ShangGuan Chunmei，He Wei，Zhang Wen，et al. Temperature and strain simultaneous measuring optical fiber sensor based on F-P cascade MZ[J]. Optical Communication Technol.，2018，42(1)：16-19.

[7] Esposito F，Campopiano S，Ladicicco A. Miniaturized strain-free fiber Bragg grating temperature sensors[J]. IEEE Sensors J.，2022，22(17)：16898-16903.

[8] Fan W, Duan L N, Gao H, et al. Low cross sensitivity and temperature compensation fiber Bragg grating accelerometer based on miniature slide rail[J]. IEEE Sensors J., 2022, 22(17): 16912-16919.

[9] Wang H P, Wu Y B, Chen C, et al. Dynamic response of CFRP reinforced steel beams subjected to impact action based on FBG sensing technology[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6377.

[10] Hsiao T C, Hsieh T S, Chen Y C, et al. Metal-coated fiber Bragg grating for dynamic temperature sensor[J]. Optik-Inter. J. for Light & Electron Optics, 2016, 127(22): 10740-10745.

[11] Du C, Kong D, Xu C, et al. Research on Temperature Characteristics of Fiber Bragg Grating Sensors with Aluminum Alloy Packaging[J]. Proc. SPIE, 2021, 11887: 1188706.

[12] 吴　昊, 张　洋, 王　帅, 等. 超短 FBG 的高灵敏度温度传感器[J]. 激光与红外, 2021, 51(8): 1057-1064.
Wu Hao, Zhang Yang, Wang Shuai, et al. High sensitivity temperature sensor of ultra-short FBG[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(8): 1057-1064.

[13] Toda K, Kishizawa K, Toyoda Y, et al. Characterization of modal interference in multi-core polymer optical fibers and its application to temperature sensing[J]. Appl. Phys. Express, 2022, 15(7): 072002.

[14] Salceda-Delgado G, Van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, et al. Optical capillary fiber mode interferometer for pressure sensing [J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(5): 2253-2260.

[15] Chen M Q, Zhao Y, Xia F, et al. High sensitivity temperature sensor based on fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer with PDMS-filled hollow-core fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 275: 60-66.

[16] 冯文林, 彭　进, 余佳浩, 等. 端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 766-770.
Feng Wenlin, Peng Jin, Yu Jiahao, et al. Double Fabry-Perot optical fiber temperature sensor with corroded ends[J]. Optical Precision Engineering, 2019, 27(4): 766-770.

[17] 郑亚如, 邹　辉, 赵　瑞, 等. 基于腰椎扩径熔接马赫-曾德尔干涉仪的温度光纤传感器[J]. 光电子·激光, 2017, 28(12): 1285-1289.
Zheng Yaru, Zou Hui, Zhao Rui, et al. Temperature optical fiber sensor based on Mach-Zehnder interferometer of lumbar enlarged diameter fusion[J]. Optoelectron. · Laser, 2017, 28(12): 1285-1289.

[18] Zhang R X, Liu T G, Han Q, et al. Temperature cross-sensitivity characteristics of singlemode-multimode-singlemode fiber structure[J]. Rev. Sci. Instrum., 2015, 86(1): 013108.1-013108.7.

## 作者简介：

**张　琪**(1996—)，男，山东省潍坊市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感系统；

**何　巍**(1986—)，男，北京市人，博士，教授，主要研究方向为光纤传感系统。