

## 平顶型CLPG-CFBG级联结构中温度应力传感特性的研究

吕子尚, 胡劲华, 任丹萍, 赵继军

### Research on temperature strain sensing characteristics of flat top CLPG-CFBG cascade structure

引用本文:

吕子尚, 胡劲华, 任丹萍, 赵继军. 平顶型CLPG-CFBG级联结构中温度应力传感特性的研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 65-70.  
L Zishang, HU Jinhua, REN Danping, et al. Research on temperature strain sensing characteristics of flat top CLPG-CFBG cascade structure[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 65-70.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 41-45.

#### 2. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 329-334.

#### 3. 变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术

引用本文: 马凤翔, 赵跃, 李辰溪, 等. 变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 829-834.

#### 4. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统

引用本文: 王伟, 张天阳, 陈海滨, 等. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 849-853.

#### 5. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感

引用本文: 宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 916-920.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0065-06

## 平顶型 CLPG-CFBG 级联结构中温度应力传感特性的研究

吕子尚, 胡劲华\*, 任丹萍, 赵继军

(河北工程大学 信息与电气工程学院, 邯郸 056038, 中国)

**摘要:** 为了使光纤光栅传感器在光纤传感系统的应用中同时具有温度应力双参量传感和通信传输的功能, 提出了一种由啁啾长周期光纤光栅 (CLPG) 和啁啾光纤布喇格光栅 (CFBG) 组成的平顶型光纤光栅传感器结构。采用测量中心波长位移的方法, 建立了传感器温度和应力灵敏度系数矩阵, 进行了理论分析和仿真验证。结果表明, CLPG 的温度和应力灵敏度大小分别为 2660 pm/°C 和 132 pm/μ $\epsilon$ ; CFBG 的温度和应力灵敏度大小分别为 12.6 pm/°C 和 0.8 pm/μ $\epsilon$ , 且 CLPG 和 CFBG 同时都具有平顶输出光谱, 平顶光谱带宽分别达到了 13.8 nm 和 5.6 nm, 该传感器可以实现温度应力双参量同时传感, 具有稳定的通信传输波段。该研究为光纤光栅传感器在光纤传感系统中的应用提供了参考。

**关键词:** 光纤光学; 光纤光栅传感器; 啁啾光纤光栅; 平顶光谱; 温度; 应力

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.011

### Research on temperature strain sensing characteristics of flat top CLPG-CFBG cascade structure

LÜ Zishang, HU Jinhua\*, REN Danping, ZHAO Jijun

(School of Information & Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to make the fiber grating sensor have the functions of temperature/strain dual-parameter sensing and communication transmission in the application of fiber sensing system, a new flat-top fiber grating sensor structure composed of the chirped long period grating (CLPG) and chirped fiber Bragg grating (CFBG) was proposed. The sensitivity coefficient matrix of temperature and strain of the sensor was established by measuring the displacement of the center wavelength, and the theoretical analysis and simulation were carried out. The results show that, the temperature and strain sensitivities of CLPG were 2660 pm/°C and 132 pm/μ $\epsilon$ , respectively. CFBG sensitivities were 12.6 pm/°C for temperature and 0.8 pm/μ $\epsilon$  for strain. Both CLPG and CFBG had flat-top output spectra at the same time, and the flat-top spectral bandwidths reached 13.8 nm and 5.6 nm, respectively. The sensor can realize the simultaneous sensing of both parameters of temperature/strain and has a stable communication transmission band. This study serves as a reference for the application of fiber grating sensors in fiber sensing systems.

**Key words:** fiber optics; fiber grating sensor; chirped fiber grating; flat-top spectrum; temperature; strain

## 0 引言

光纤光栅凭借不受外部光源波动影响、传感信号强、检测精度高、响应频率快、抗干扰检测能力强, 以及器件组网方式灵活等优点, 已日益成为光纤信息通信和光纤传感网系统的关键器件之一<sup>[1]</sup>。在分布式光纤传感网系统中, 由于光纤光栅传感器对温度<sup>[2-4]</sup>、湿

度<sup>[5]</sup>、微弯曲应变<sup>[6]</sup>和应力<sup>[7]</sup>等多个参量都非常敏感, 被广泛用于矿井安全、结构健康监测<sup>[8]</sup>和周界安防等领域进行环境参量的监测和传感。物体特性变化时最直观的表现方式体现在温度和应力两方面, 这使得一个传感器能够实现温度和应力同时检测显得尤为必要。因此, 研究者们通过设计不同类型的光纤光栅结构形成两个或多个谐振峰, 利用不同类型谐振峰之间对介质温度/应变测量的灵敏度大小不同实现双参量的同时检测。例如, GUO 等人<sup>[9]</sup>提出了一种少模光纤长周期光栅双参量传感, 利用模式间双峰耦合现象提高了测量灵敏度。ZHANG 等人<sup>[10]</sup>采用单模和多模光纤级联的方式制备了一种新型高灵敏度的多模光纤

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61905060); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2021019)

\* 通信作者: hujh84@hebeu.edu.cn

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-02-27

啁啾长周期光栅,利用两个高阶模透射谱对两种参量的响应差实现了同时传感。KANG 等人<sup>[11]</sup>利用耦合型双芯光纤对外界温度和应力变化的灵敏度响应特性与光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的不同提出了一种新的传感器,且耦合型双芯光纤的应力和温度灵敏度达到了  $0.98867 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $31.25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , FBG 则分别达到了  $1.25 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $10.125 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。ZHANG 等人<sup>[12]</sup>提出了长周期光纤光栅(long period grating, LPG)与 FBG 级联的双参量传感器结构,形成了3个谐振峰,在一定测量范围内使温度和应力灵敏度最大分别达到了  $41.66 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $2.33 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

在光纤传感系统中,光纤光栅传感器不仅要解决温度应力之间存在的交叉敏感问题,还需满足光纤通信中色散补偿<sup>[13]</sup>和稳定传输波段<sup>[14]</sup>的要求。啁啾光纤光栅由于光栅的周期沿光纤轴呈线性分布,使得光脉冲展宽形成平顶光谱<sup>[15]</sup>,可以有效地实现色散补偿<sup>[16]</sup>,并且对环境温度和应力的变化也较为敏感<sup>[17]</sup>。上述光纤光栅传感器的输出光谱为洛伦兹型,中心波长随温度和应力的变化均会漂移,但没有稳定的通信传输波段,容易产生色散,影响通信的传输质量,不利于系统通信传感一体化<sup>[18]</sup>。

因此,本文作者提出了一种基于啁啾长周期光纤光栅(chirped long period grating, CLPG)<sup>[19]</sup>和啁啾光纤布喇格光栅(chirped fiber Bragg grating, CFBG)<sup>[17]</sup>级联的平顶型温度应力双参量光纤光栅传感器。通过优化调节所提出结构中的啁啾系数大小,增大光谱带宽,输出平顶透射光谱,形成稳定的传输波段,以保证光信号的传输质量。利用 CLPG 和 CFBG 形成的不同谐振峰对温度和应力灵敏度响应不同的特性,有效地消除了两种参量检测时的交叉敏感,使传感器实现了温度应力的同时传感,并从模场能量角度分析了包层半径变化对 CLPG 灵敏度影响。该传感器有望与现有的光通信基础设施进行很好的兼容,实现通信传感一体化<sup>[20]</sup>,在分布式光纤传感系统中具有良好的应用前景。

## 1 器件结构与原理

图1为本文作者提出的一种平顶型温度应力双参量传感的器件结构示意图。该器件由 CLPG 和 CFBG 共同级联而成,器件结构主要元件的基本物理结构参数分别为:纤芯折射率  $n_1$ ,包层折射率  $n_2$ ,CLPG 初始周期  $\Lambda_{0,1}$ ,CFBG 初始周期  $\Lambda_{0,B}$ ,CLPG 长度  $L_1$ ,CFBG 长度  $L_B$ ,纤芯半径  $r_1$ ,包层半径  $r_2$ 。光由左侧输入,由于啁啾光纤光栅的周期呈啁啾性变化,入射光谱经传感器

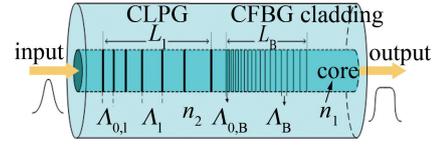


图1 CLPG-CFBG 级联结构示意图

变化后输出为平顶型光谱。

基于耦合模理论可知,CLPG 光谱是由纤芯基模和高阶的包层模式之间相互耦合形成的正向传输的透射光谱。所以 CLPG 谐振波长  $\lambda_1$  表达式如下<sup>[10,21]</sup>:

$$\lambda_1 = (n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},2})\Lambda_1 \quad (1)$$

式中: $n_{\text{eff},1}$  为纤芯基模有效折射率; $n_{\text{eff},2}$  为包层模式的有效折射率; $\Lambda_1$  为 CLPG 的啁啾周期。而 CFBG 与 FBG 相同为正向纤芯模式和反向纤芯模式的自耦合现象,依据相位匹配条件可得 CFBG 的谐振波长  $\lambda_B$  为<sup>[21]</sup>:

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

式中: $\Lambda_B$  为 CFBG 的啁啾周期。啁啾周期是由于光栅条在光纤中呈线性分布形成的,因此可得啁啾光纤光栅周期  $\Lambda$  表达式:

$$\Lambda = x(c/L) + \Lambda_0 - c/2 \quad (3)$$

式中: $\Lambda_0$  为啁啾光纤光栅周期的初始值; $c$  为啁啾光纤光栅啁啾系数; $x$  为啁啾周期在对应啁啾光纤光栅长度中所在的位置,且范围为  $0 \leq x \leq L$ ;  $L$  代表对应的啁啾光纤光栅长度。

由弹性力学和弹光效应理论可知,在外界应力发生改变作用在光纤光栅轴向方向时,纤芯和包层各介质本身的有效折射率均会受到轴向应力的影响,同时光栅周期也会随应力的变化而变化。因而当光纤轴向应力  $\epsilon$  发生改变时,对长短周期的谐振波长式(1)、式(2)取微分可以得出各自谐振中心波长对应的应力灵敏度系数,其表达式为<sup>[22]</sup>:

$$K_{\epsilon,1} = \frac{d\lambda_1}{d\epsilon} = \left( \frac{dn_{\text{eff},1}}{d\epsilon} - \frac{dn_{\text{eff},2}}{d\epsilon} \right) \Lambda_1 + (n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},2}) \frac{d\Lambda_1}{d\epsilon} \quad (4)$$

$$K_{\epsilon,B} = \frac{d\lambda_B}{d\epsilon} = 2 \frac{dn_{\text{eff},1}}{d\epsilon} \Lambda_B + 2n_{\text{eff},1} \frac{d\Lambda_B}{d\epsilon} \quad (5)$$

式中: $K_{\epsilon,1}$ 、 $K_{\epsilon,B}$  分别为 CLPG 应力灵敏度系数和 CFBG 应力灵敏度系数。应力对光纤有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的影响主要取决于光纤光栅本身的弹光系数  $P_e$  的大小,即  $dn_{\text{eff}}/d\epsilon = n_{\text{eff}} \times P_e$ <sup>[9]</sup>;对啁啾光纤光栅周期的影响为  $d\Lambda = \Lambda d\epsilon$ <sup>[10]</sup>。因此当作用在传感器轴向方向的应力大

小变化量为  $\Delta\varepsilon$  时,依据式(4)、式(5)所求出的  $K_\varepsilon$  联立等式,可计算出传感器中心波长位移量大小  $\Delta\lambda$  为:

$$\Delta\lambda = K_\varepsilon \times \Delta\varepsilon \quad (6)$$

同应力变化相似,当环境温度  $T$  发生变化时,周期受自身材料热膨胀系数  $\eta = \Lambda^{-1} d\Lambda/dT$ <sup>[7]</sup> 的影响、有效折射率受热光系数  $\xi = n_{\text{eff}}^{-1} dn_{\text{eff}}/dT$ <sup>[7]</sup> 的影响。对式(1)和式(2)取温度的微分得到温度灵敏度系数<sup>[21]</sup>:

$$K_{T,1} = \frac{d\lambda_1}{dT} = \left( \frac{dn_{\text{eff},1} - dn_{\text{eff},2}}{dT} \right) \Lambda_1 + (n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},2}) \frac{d\Lambda_1}{dT} \quad (7)$$

$$K_{T,B} = \frac{d\lambda_B}{dT} = 2 \frac{dn_{\text{eff},1}}{dT} \Lambda_B + 2n_{\text{eff},1} \frac{d\Lambda_B}{dT} \quad (8)$$

因此,当传感器周围环境温度的变化量大小为  $\Delta T$  时,依据式(7)、式(8)所求出的  $K_T$  与温度变化量联立等式可计算出传感器中心波长位移量大小  $\Delta\lambda$  为:

$$\Delta\lambda = K_T \times \Delta T \quad (9)$$

综上所述,当传感器受到外环境温度和自身轴向应力的同时作用时,联立式(6)、式(9)生成方程组,进而生成传输矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon,1} & K_{T,1} \\ K_{\varepsilon,B} & K_{T,B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\Delta\lambda_1$  表示为 CLPG 的中心波长位移量; $\Delta\lambda_B$  表示 CFBG 中心波长的位移量,且灵敏度系数矩阵行列式  $D = |K_{\varepsilon,1}K_{T,B} - K_{T,1}K_{\varepsilon,B}| \neq 0$ 。因此通过观察中心波长位移量,结合逆系数矩阵可知温度和轴向应力各自的变化量大小,即式(10)的逆传输矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon,1} & K_{T,1} \\ K_{\varepsilon,B} & K_{T,B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 2 器件设计与分析

首先对级联 CLPG-CFBG 传感器初始结构参数设置介绍如下: $n_1 = 1.45$ 、 $n_2 = 1.46$ <sup>[23]</sup>,器件纤芯半径  $r_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,CLPG 周期初始值  $\Lambda_{0,1} = 220 \mu\text{m}$ ,CFBG 周期初始值  $\Lambda_{0,B} = 0.49 \mu\text{m}$ 。光纤光栅的调制系数随刻蚀的深度加深而增大,进而使得光纤光栅的透射谱越明显,因此在合适范围内 CLPG 调制系数设为 0.0005,CFBG 调制系数为 0.0008,CLPG 长度  $L_1 = 3.5 \text{ cm}$ ,CFBG 长度  $L_B = 2 \text{ cm}$ 。

### 2.1 啁啾系数选择

为了满足在光纤传感系统中的应用,得到更好的

平顶透射光谱谱型。依据式(3)分别讨论了 CFBG 的啁啾系数  $c_B$  和 CLPG 的啁啾系数  $c_1$  各自在不同数值大小时对透射谱的影响。从图 2a 可知,在 0.001 ~ 0.003 范围内,随着  $c_B$  的增大,CFBG 的透射光谱带宽逐渐展宽;但是当  $c_B$  到达 0.002 以后,随着啁啾系数的增大,透射率效果反而减小。由分析可知,当  $c_B = 0.002$  时,CFBG 的透射平顶光谱最好,且平顶带宽达到了 5.6 nm。同理,CLPG 的平顶光谱在光纤传感系统中有利于宽带模式的转换促进模式之间的耦合<sup>[24]</sup>,提高光纤内模式耦合效率<sup>[25]</sup>,对 CLPG 的啁啾系数  $c_1$  在 4.1~4.7 范围内进行了仿真分析。由图 2b 所示, $c_1$  的数值大小变化对 CLPG 透射光谱带宽没有影响,CLPG 平顶光谱带宽达到了 13.8 nm;但是当啁啾系数  $c_1 = 4.4$  时,透射光谱平顶效果最好。由此可知,当  $c_1 = 4.4$ 、 $c_B = 0.002$  时,两平顶光谱分别达到最优效果。

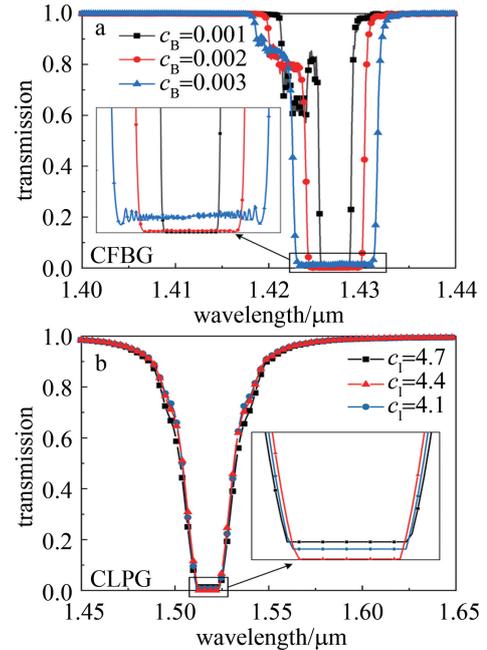


图 2 啁啾系数分析光谱图

Fig. 2 Spectrogram of the chirp coefficient analysis

### 2.2 包层半径选择

随后,进一步研究 CLPG-CFBG 级联结构中包层半径对谐振中心波长漂移的影响,仿真分析了不同半径下,该器件结构截面的模场分布。如图 3 所示,本文中将包层半径  $r_2$  从  $62.5 \mu\text{m}$  逐渐减小到  $15.5 \mu\text{m}$ ,对比观察两种模式在不同半径下的模场能量分布情况。由图 3a、图 3b 和图 3c 可以观察到纤芯基模 ( $LP_{0,1}$ ) 模场能量保持不变,不受包层半径的影响。观察图 3d、图 3e、图 3f 可知,随包层半径的减小,1 阶 2 次包层模 ( $LP_{0,2}$ ) 模场能量分布逐渐减小,这使得该光纤光栅传

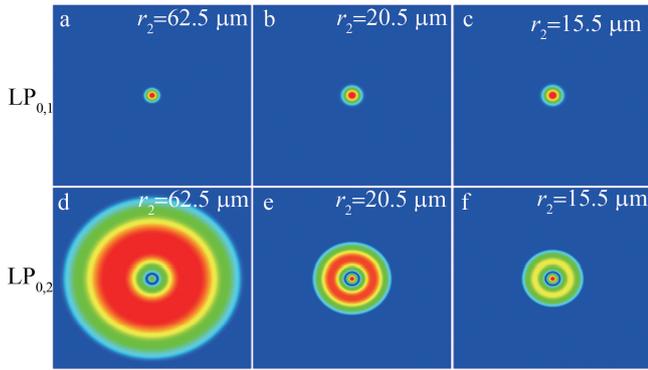


图3 不同包层半径下 CLPG-CFBG 传输模式的模场能量分布

Fig. 3 Mode-field distribution of CLPG-CFBG transmission modes at different cladding radii

传感器结构周围介质中的消逝波增大<sup>[26]</sup>, 光纤光栅传感器与外界环境的相互作用<sup>[27]</sup>增强, 有利于提高光纤光栅传感器对温度和应力检测的灵敏度。

另外, 光纤光栅的模式主要由纤芯和包层的模式有效折射率决定, 因此仿真计算了不同包层半径下两种模式分别对应的有效折射率。如表 1 所示, 随包层半径的减小,  $LP_{0,1}$  模的有效折射率不变,  $LP_{0,2}$  模的有效折射率值逐渐减小, 与模场能量变化规律相符合。依据式(1)可知, 在相同环境影响下,  $n_{\text{eff},1}$  和  $n_{\text{eff},2}$  的差值越大, CLPG 的谐振中心波长漂移越明显, 环境参量检测时的灵敏度越高。但是 CLPG 透射光谱是纤芯模与包层模相互耦合的效果, 包层半径小于  $20.5 \mu\text{m}$  时, CLPG 光谱透射效率反而降低, 所以包层半径选定为  $20.5 \mu\text{m}$ 。

表 1 不同包层半径下两种模式的有效折射率值

Table 1 Effective refractive index values of the two modes at different cladding radii

$LP_{m,n}$ modes	$n_{\text{eff}}$		
	$r_2 = 62.5 \mu\text{m}$	$r_2 = 20.5 \mu\text{m}$	$r_2 = 15.5 \mu\text{m}$
$LP_{0,1}$	1.4563	1.4563	1.4563
$LP_{0,2}$	1.4499	1.4493	1.4487

级联型结构传感器输出光谱形状如图 4 所示。从

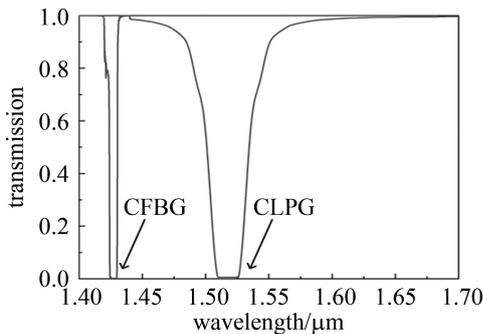


图4 CLPG-CFBG 级联结构透射光谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the CLPG-CFBG cascaded structure

图中可知, 平顶带宽较窄的谐振峰表示 CFBG 结构光谱, 右侧谐振峰平顶带宽较宽, 为 CLPG 结构光谱。

### 3 结果与分析

#### 3.1 应力传感特性

随着轴向应力的增加, 两个谐振峰漂移呈不同的漂移趋势。如图 5a 和图 5b 所示, CLPG 的谐振峰中心波长位置随应力的增大向短波长方向蓝移, CFBG 的谐振峰中心波长位置随应力的增大而红移, 因此使得两中心波长之间间距减小。为了更准确地测量出谐

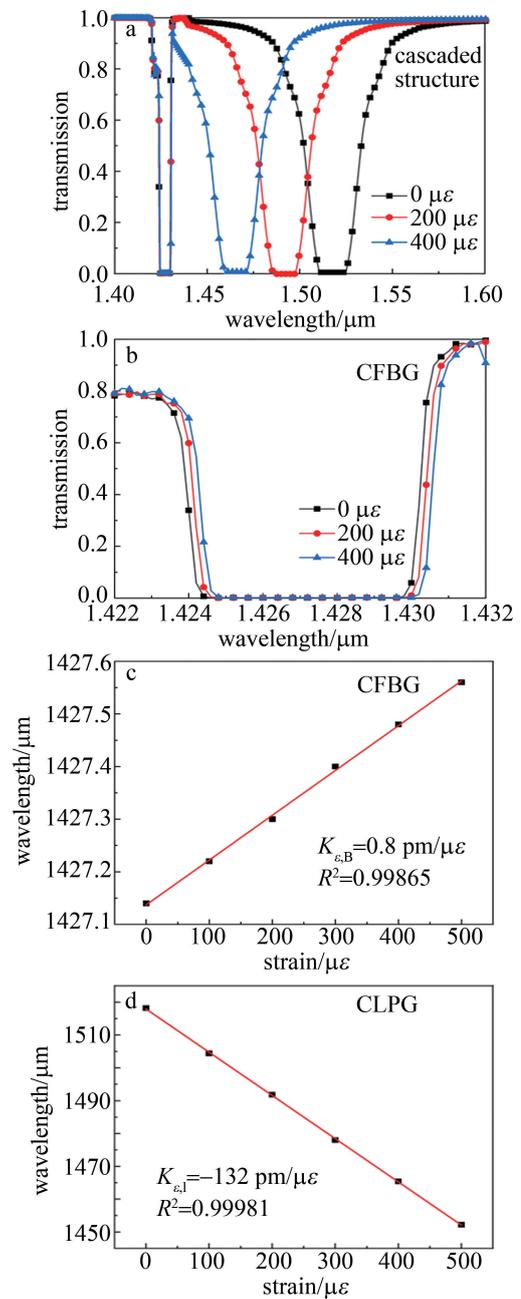


图5 应力测量

Fig. 5 Strain measurement

振中心波长随应力变化的规律,从  $0 \mu\epsilon \sim 500 \mu\epsilon$  范围内每  $100 \mu\epsilon$  进行取点采样,如图 5c 和图 5d 所示。波长漂移与应力变化呈良好的线性关系,并计算出 CFBG 的应力灵敏度  $K_{\epsilon,B} = 0.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,线性度  $R^2 = 0.99865$ ;CLPG 的应力灵敏度  $K_{\epsilon,I} = -132 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,线性度  $R^2 = 0.99981$ 。

### 3.2 温度传感特性

随着外界温度的升高,两个谐振峰中心波长位置呈相同的漂移趋势,与应力相反。如图 6a 和图 6b 所示,CLPG 和 CFBG 的谐振峰均同时向长波长方向红

移,中心波长间距增大。为了更准确地测量出谐振中心波长随温度升高的变化规律,从  $20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  每  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  进行取点采样,对各个采样点进行多次测量求平均值,随后将各平均值进行线性拟合。如图 6c 和图 6d 所示,波长漂移的大小与温度变化量呈良好的线性关系。由此计算出 CFBG 的温度灵敏度  $K_{T,B} = 12.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,线性度  $R^2 = 0.99938$ ;CLPG 的温度灵敏度  $K_{T,I} = 2660 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,线性度  $R^2 = 0.99998$ 。

综上所述,将仿真结果  $K_{\epsilon,I} = -132 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_{T,I} = 2660 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_{\epsilon,B} = 0.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_{T,B} = 12.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  代入式 (11),得到逆传输矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -132 & 2660 \\ 0.8 & 12.6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_I \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

当外界环境温度和应力发生变化时,通过观察两个谐振中心波长的变化量并代入式 (12),可以直接计算出温度和应力的变化量。

此外,外界温度和应力在一定范围内变化时,CFBG 平顶光谱总是存在固定的部分重叠光谱,重叠波段在  $1426 \text{ nm} \sim 1429 \text{ nm}$  之间,如图 5b 和图 6b 所示。因此该部分重叠光谱可以为光信号通信提供稳定的传输波段,保证了光信号通信的传输质量,可更好地与现有的通信基础设施相结合,有利于通信传感一体化进程。

## 4 结论

本文中提出了一种 CLPG-CFBG 级联平顶型光纤光栅传感器结构。仿真结果表明,CLPG 的温度和应力灵敏度分别为  $2660 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $132 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,CFBG 的温度和应力灵敏度分别为  $12.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $0.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,生成了灵敏度系数矩阵,有效解决了温度和应力之间相互存在的交叉敏感问题,使传感器具有双参量同时传感的功能。进一步优化光纤的啁啾系数,使 CLPG 和 CFBG 的平顶光谱带宽分别达到了  $13.8 \text{ nm}$  和  $5.6 \text{ nm}$ 。在一定温度和应力传感范围内,具有  $1426 \text{ nm} \sim 1429 \text{ nm}$  范围内稳定传输的通信波段,可以保证光信号的传输质量。与传统传感器相比,该传感器具有温度应力双参量传感和稳定通信传输的功能,能够更好地与通信基础设施相结合应用于光纤传感网系统中。

### 参考文献

- [1] YUAN L B, TONG W J, JIANG Sh, *et al.* Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001 (in Chinese).  
苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.

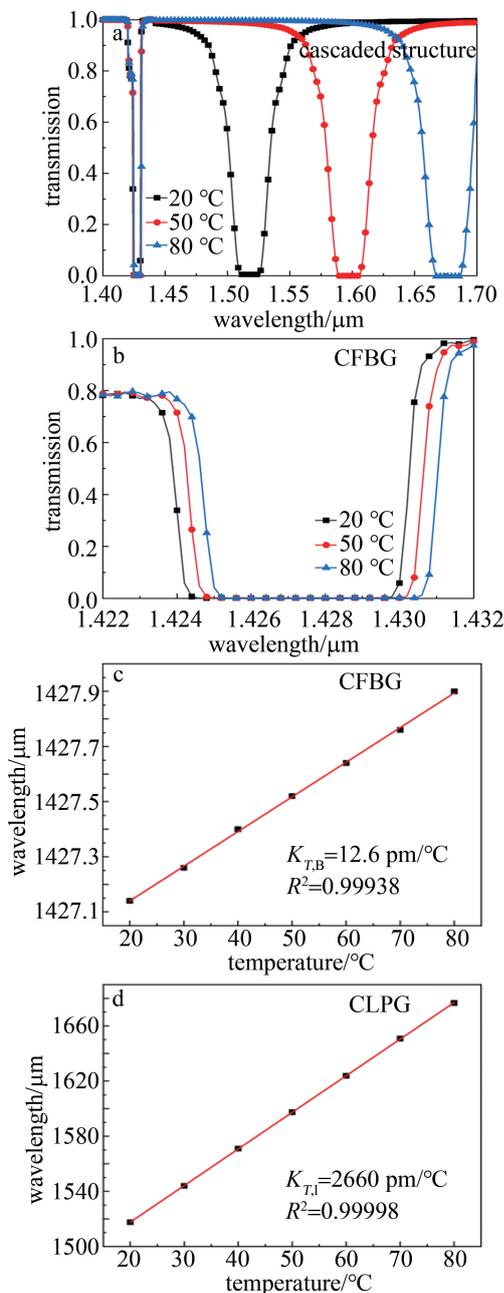


图 6 温度测量

Fig. 6 Temperature measurement

- [2] LI G, JI L T, LI G Q, *et al.* High-resolution and large-dynamic-range temperature sensor using fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18523-18529.
- [3] HUA Z M, LI Y Q, WANG Sh K, *et al.* Sensitization design of liquid dual parameter sensor based on fiber grating[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(3): 337-343(in Chinese).  
华子明, 李永倩, 王少康, 等. 光纤光栅液体双参量传感器增敏设计[J]. *激光技术*, 2022, 46(3): 337-343.
- [4] GONG W H, ZHANG X X, KANG J W. Research on dual-parameter characteristics of composite interference fiber sensor based on cascade FPI-MZI[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5): 618-623(in Chinese).  
龚文慧, 张雄星, 康家雯. 级联 FPI-MZI 复合干涉光纤传感器双参数特性研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 618-623.
- [5] QI Y F, JIA C, TANG L, *et al.* Research on temperature and humidity sensing characteristics of cascaded LPFG-FBG [J]. *Optik*, 2019, 188: 19-26.
- [6] LEE S B, JUNG Y J, CHOI H K, *et al.* Hybrid LPG-FBG based high-resolution micro mending strain sensor[J]. *Sensors*, 2020, 21(1): 22.
- [7] GAO X K, NING T G, ZHANG Ch B, *et al.* A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing [J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124441.
- [8] ZHANG Y J, GAO H Ch, ZHANG L T, *et al.* Embedded gold-plated fiber Bragg grating temperature and stress sensors encapsulated in capillary copper tube[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(3): 200195(in Chinese).  
张燕君, 高海川, 张龙图, 等. 毛细铜管封装的内嵌式镀金光纤布拉格光栅温度和应力传感器[J]. *光电工程*, 2021, 48(3): 200195.
- [9] GUO Y Ch, LIU Y G, WANG Zh, *et al.* Dual resonance and dual-parameter sensor of few-mode fiber long period grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906003(in Chinese).  
郭艳城, 刘艳格, 王志, 等. 少模光纤长周期光栅双峰谐振及双参量传感[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0906003.
- [10] ZHANG Sh, GENG T, WANG Sh J, *et al.* High-sensitivity strain and temperature simultaneous measurement sensor based on multimode fiber chirped long-period grating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(24): 14843-14849.
- [11] KANG Z X, SUN J, MA L, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506004(in Chinese).  
康泽新, 孙将, 马林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506004.
- [12] ZHANG W, LOU X P, DONG M L, *et al.* Optical fiber sensor by cascading long period fiber grating with FBG for double parameters measurement[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(5): 372-375.
- [13] CAO X. Optimization of dispersion compensation in optical fiber communication systems[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1): 101-104(in Chinese).  
曹雪. 光纤通信系统色散补偿方案的优化[J]. *激光技术*, 2014, 38(1): 101-104.
- [14] LI W, ZHANG A L, CHENG Q H, *et al.* Theoretical analysis on SPR based optical fiber refractive index sensor with resonance wavelength covering communication C+L band[J]. *Optik*, 2020, 213: 164696.
- [15] PISCO M, IADICICCO A, CAMPOPIANO S, *et al.* Structured chirped fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(12): 1613-1625.
- [16] MAO Y, YAN X P, WANG W F. Principle and design of chirped fiber grating [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1653: 012011.
- [17] TOSI D. Review of chirped fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2147.
- [18] ZHANG Ch B, TANG X Y, WANG G Q, *et al.* Research frontier of communication and sensing integration technology for optical networks [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(1): 0100001(in Chinese).  
张传彪, 唐雄燕, 王光全, 等. 光网络的通感一体化技术研究前沿[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(1): 0100001.
- [19] YANG Y, CAO Y, CHEN X. A study on relation between ultra-wideband filtering characteristics and structural parameters for a chirped long-period fiber grating [J]. *Indian Journal of Physics*, 2013, 87(3): 297-302.
- [20] YAN Y X, ZHENG H, ZHAO Zh Y, *et al.* Distributed optical fiber sensing assisted by optical communication techniques[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 3654-3670.
- [21] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [22] ZHANG W, HAO J Q, LOU X W, *et al.* All-fiber dual-parameter sensor based on cascaded long period fiber grating pair fabricated by femtosecond laser and CO<sub>2</sub> laser[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2018, 37(2): 66-78.
- [23] LIU Y M, QIAN Q Q, HUANG Y L. Simultaneous measurement of temperature and strain based on single tilted fiber Bragg grating[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2018, 29(4): 383-388(in Chinese).  
刘一民, 钱清泉, 黄元亮. 基于单一倾斜光纤光栅的温度应变同时测量[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(4): 383-388.
- [24] ISRAELEN S M, ROTTWITT K. Broadband higher order mode conversion using chirped microbend long period gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 23969-23976.
- [25] FENG M, HE J Y, MAO B W, *et al.* Generation of cylindrical vector dissipative soliton using an ultra-broadband LPFG mode converter with flat conversion efficiency[J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41496-41511.
- [26] CHANG H Y, CHANG Y Ch, SHENG H J, *et al.* An ultra-sensitive liquid-level indicator based on an etched chirped-fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 268-271.
- [27] YI Y, MA Y W, WANG S Y, *et al.* A new strain sensor based on depth-modulated long-period fiber grating [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 111: 103520.