

基于对称啁啾长周期光纤光栅的双参量传感*

黄秋萍¹⁾ 朱晓帅¹⁾ 任子嫣¹⁾ 陈海云^{1)†}
凌强³⁾ 彭保进¹⁾²⁾ 陈达如³⁾

1) (浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 金华 321004)

2) (浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

3) (浙江师范大学杭州高等研究院, 杭州 311231)

(2025年4月7日收到; 2025年6月1日收到修改稿)

本文提出了一种基于对称啁啾长周期光纤光栅的双参量传感方法, 传感器由两个长度和平均周期相同但啁啾系数相反的啁啾长周期光纤光栅组成, 由于马赫-曾德尔干涉效应和光栅的啁啾效应, 对称啁啾长周期光纤光栅的透射谱表现为频率渐变的干涉条纹, 相邻干涉谷间隔随波长而增大, 条纹中不同波长位置的干涉谷对同一被测参量的响应灵敏度不同, 因而可以通过矩阵解调实现对多个参量的同时测量. 对传感器的模式干涉机制、光谱特性和传感原理进行了理论和数值分析, 并通过紫外光逐点曝光法刻制了光栅结构, 平均光栅周期为 321 μm , 啁啾系数为 $\pm 21.9 \mu\text{m}/\text{cm}$, 总长度为 4.34 cm, 实现了对环境折射率和温度双参量的同时测量. 此外, 由于条纹光谱中有多个频率不同的干涉谷, 因此该传感器结构可以被进一步拓展应用于对 3 个及以上环境参量的同时测量, 在生物化学传感、环境监测等诸多领域有较好的应用前景.

关键词: 对称啁啾长周期光纤光栅, 双参量传感, 折射率, 温度

PACS: 42.81.-i, 07.07.Df, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.74.20250449

CSTR: 32037.14.aps.74.20250449

1 引言

近年来, 光纤传感器由于具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、网络兼容性好等优点而受到了越来越多的关注, 并在折射率^[1-3]、温度^[4-6]、湿度^[7,8]、气压^[9,10]、气体浓度^[11,12]和溶液离子浓度^[13,14]等环境参量的检测中得到了广泛的应用. 高灵敏响应是光纤传感器的突出优点, 但光纤结构和材料特性本身受温度影响, 因而多个参量的交叉串扰是光纤传感技术中一个不可回避的问题. 因此, 解决不同参量之间的串扰, 实现对多个参量的同时测量是当前光纤传感器研究的一个重要方向^[15-21].

目前光纤多参量传感机制主要通过将不同传感特性的光纤结构组合来实现^[15-17], 但原有单个传感器的优良特性在这种复合结构中往往难以同时得到保证, 会出现不兼容、不稳定、灵敏度和机械强度降低、产生相互串扰等问题, 从而影响多参量传感器的整体性能. 基于单个光纤结构的多参量传感也有报道, 早在 1997 年, Bhatia 等^[18]就提出了基于单个长周期光纤光栅 (long-period fiber grating, LPFG) 进行双参量传感的方法, 利用 LPFG 中不同包层模耦合对应谐振峰的差异性响应, 通过差分矩阵解调实现对应力和温度的同时测量, 但灵敏度较低. 此后, 基于 LPFG 的多参量传感器层出不穷, 传感性能不断优化. Ling 等^[19]用 CO_2 激光

* 浙江省基础公益技术应用研究计划 (批准号: LGF19F050001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chy@zjnu.cn

在少模光纤中刻入 LPFG, 利用包层模与 LP_{01} 、 LP_{11} 纤芯模耦合的差异性, 实现对环境折射率 (surrounding refractive index, SRI) 和温度的同时测量. Zhao 等^[20] 用 CO_2 激光器对少模环芯光纤进行单侧照射写入 LPFG, 利用不对称耦合特性实现对矢量弯曲、扭转和温度的同时测量. Zhang 等^[21] 设计了保偏光纤和单模光纤组合制成的 LPFG 结构, 通过偏振复用实现对弯曲和扭转的同时测量. Esposito 等^[22] 在保偏熊猫光纤中用电弧放电方法制作 LPFG, 考察不同包层模耦合产生的三个谐振峰变化, 结合偏振特性实现对温度、应力和扭转的同时测量. Urrutia 等^[23] 通过紫外逐点曝光法刻制 LPFG, 并在部分光栅包层外镀制 PAH/PAA 薄膜, 利用镀膜/未镀膜区域 LPFG 产生的不同谐振峰实现对湿度和温度的同时测量. 为了满足多参量传感所需的差异化响应要求, 以上单光栅结构中通常需要用到特殊结构光纤, 或需要额外镀膜, 操作相对复杂, 成本较高. Liu 等^[24] 用飞秒激光在普通单模光纤中刻入工作于相位匹配转折点附近的单个相移 LPFG, π 相移和双峰谐振效应使透射谱中产生 4 个不同的损耗峰, 通过矩阵解调可实现对温度、应力、折射率和 pH 四个参量的同时测量, 但在有限的波长范围内准确刻制工作于相位匹配转折点附近的 LPFG 并不容易, 需要不断调试工艺参数, 过程复杂, 耗时长.

本文提出一种基于对称啁啾长周期光纤光栅的紧凑型多参量传感器结构, 在单模光纤中用传统紫外光逐点曝光法刻制而成. 对称啁啾 LPFG 由啁啾系数相反、平均周期和长度相同的两个连续的线性啁啾子光栅组成, 啁啾效应使不同波长的纤芯模式在不同位置被第一个子光栅耦合至包层模式, 而对称啁啾结构使包层模式在第二个子光栅的对称位置被重新耦合回纤芯中, 因而不同波长的光对应的等效干涉臂长度不同, 从而形成干涉臂长度渐变的马赫-曾德尔干涉 (Mach-Zehnder interference, MZI). 因此, 对称啁啾 LPFG 的透射谱表现为空间频率渐变的不均匀 MZI 干涉条纹, 不同波长位置的干涉谷对同一参量具有不同的响应特性, 通过矩阵解调可以实现对多个参量的同时测量. 本文系统地分析了对称啁啾 LPFG 的干涉机理和光谱特性, 并以环境折射率和温度两个参量为例展示对称啁啾 LPFG 的多参量传感应用, 为光纤多参量传感技术的发展提供一种新的技术思路.

2 理论分析

对称啁啾长周期光纤光栅的结构如图 1 所示, 光栅周期 Λ 沿光纤轴向先增大后减小, 形成对称性结构, 中心点两侧为啁啾系数相反、平均周期和长度相同的两个子光栅. 单个线性啁啾子光栅的周期可以表示为^[8]

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + C(z - L/2), \quad (1)$$

式中, z 为沿光纤轴向坐标, 原点位于子光栅左侧边缘. Λ_0 为子光栅的平均周期, 即子光栅中点位置的周期. C 为啁啾系数, 图 1 所示的对称光栅结构中, 左侧子光栅的 C 为正, 而右侧子光栅的 C 为负.

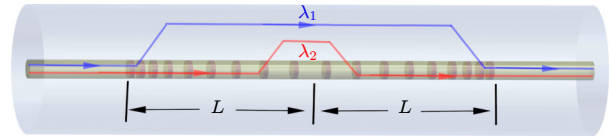


图 1 对称啁啾 LPFG 的结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of symmetrically chirped LPFG.

根据长周期光纤光栅的耦合模理论, 啁啾 LPFG 的谐振波长由相位匹配条件确定^[25]:

$$\lambda_{\text{res}}(z) = \left(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m} \right) \Lambda(z), \quad (2)$$

式中, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯模和第 m 个包层模的有效折射率. 由 (2) 式可知, 啁啾 LPFG 的谐振波长与位置 z 相关, 不同波长的纤芯模在左侧子光栅的不同位置被耦合到包层模, 包层模又在右侧子光栅的对称位置被重新耦合回纤芯, 与从纤芯中传输而来的模式形成马赫-曾德尔干涉效应^[26]:

$$I = I_{\text{co}} + \alpha I_{\text{cl}}^m - 2\sqrt{\alpha I_{\text{co}} I_{\text{cl}}^m} \cos \theta, \quad (3)$$

其中, I_{co} 和 I_{cl}^m 分别为纤芯模和包层模的光强; α 为包层模的衰减系数; θ 为相位差:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m} \right) L_p, \quad (4)$$

式中, L_p 为不同波长的光从左侧光栅的“耦合”到右侧光栅的“重新耦合”位置之间的距离, 即 MZI 中的干涉臂长度, 对称啁啾 LPFG 的对称啁啾结构和耦合特性决定了 L_p 不是一个定值, 由 (1) 式及图 1 所示结构可得

$$L_p = L - \frac{2}{C} [A(z) - \Lambda_0]. \quad (5)$$

L_p 随光栅周期的增大而减小, 而由 (2) 式可知, 光栅

谐振波长随光栅周期增大, 即 L_p 随波长增大而减小. 在干涉条纹中, 当 (4) 式中相位差为 π 的奇数倍时, 在特定波长处达到干涉极小值, 即干涉谷的波长位置:

$$\lambda_k = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L_p}{2k+1}, \quad (6)$$

式中, $k = 0, 1, 2, \dots$, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$, 相邻两个干涉谷之间的波长间隔为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L_p}, \quad (7)$$

$\Delta\lambda$ 表示自由光谱范围 (free spectral range, FSR).

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_j L_j) + i \frac{\bar{\sigma}_j}{\gamma_j} \sin(\gamma_j L_j) & i \frac{\kappa}{\gamma_j} \sin(\gamma_j L_j) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_j} \sin(\gamma_j L_j) & \cos(\gamma_j L_j) - i \frac{\bar{\sigma}_j}{\gamma_j} \sin(\gamma_j L_j) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, i 是虚数单位; L_j 是第 j 段光栅的长度; $\gamma_j^2 = \bar{\sigma}_j^2 + \kappa\kappa^*$, κ 是纤芯模与包层模之间的耦合系数, $\bar{\sigma}_j = \delta_j + \kappa_{\text{co}}/2$, 其中 κ_{co} 是纤芯模的自耦合系数, δ_j 是失谐参量:

$$\delta_j = \frac{\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) - \frac{\pi}{\Lambda_j}, \quad (9)$$

其中, Λ_j 是第 j 段光栅的周期.

图 2 为数值计算得到的对称啁啾 LPFG 透射条纹图谱, 计算中采用的参数为 $\Lambda_0 = 321 \mu\text{m}$, $L = 2.1 \text{ cm}$, $C = \pm 22 \mu\text{m}/\text{cm}$. 透射谱中呈现的是高对比度非均匀干涉条纹, 条纹频率随波长而减小, FSR 随波长而增大, 如图 2 中标识的位于短波长和长波长位置的 FSR_1 和 FSR_2 分别为 11.4 nm

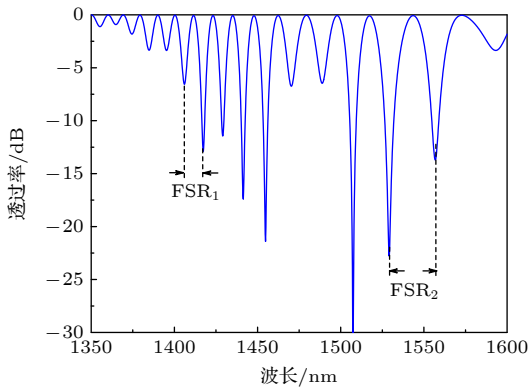


图 2 对称啁啾 LPFG 仿真透射谱

Fig. 2. Simulated transmission spectrum of symmetrically chirped LPFG.

由 (7) 式可知, 对称啁啾 LPFG 结构产生的干涉条纹 FSR 除了受波长本身影响之外, 还与 L_p 有关, 结合 (5) 式可知, 条纹 FSR 随波长而显著增大, 即空间频率随波长而减小. 同时, 由 (6) 式可知, 对于相同的环境参量 (如折射率 n 或温度) 变化, 不同波长处的干涉谷波长偏移量将因 L_p 而显著不同, 这种差异化响应特性为基于差分矩阵解调的多参量传感奠定了基础.

根据耦合模理论, 对称啁啾 LPFG 的透射谱可以利用传输矩阵法进行模拟计算, 整个光栅结构被分成若干段, 每段近似看成是一个均匀 LPFG, 光经过单个均匀 LPFG 的传输可用矩阵表示 [25]:

和 27.6 nm . 需要指出的是, 如果图 1 中的光栅周期沿轴向先减小再增大, 同样可以构成对称啁啾 LPFG 结构, 但条纹频率变化趋势与图 2 中所示相反, 短波长侧的条纹频率小, 而长波长侧的条纹频率大.

对称啁啾 LPFG 透射条纹的非均匀特性可以通过傅里叶变换进行深入分析, 图 2 所示条纹的傅里叶频谱如图 3(a) 中的红色实线所示, 频谱中显示了宽谱的特征峰. 为了比较, 图 3(a) 中同时给出了级联啁啾长周期光纤光栅的条纹频谱, 级联啁啾 LPFG 结构是将两个相同的啁啾 LPFG 直接级联 [8], 即图 1 中右侧的光栅与左侧光栅完全相同. 此时, 不同波长光对应的干涉臂长度为定值 L , 除了与波长相关的 FSR 微小变化外, 干涉条纹近乎均匀, 如图 3(b) 中蓝色虚线所示. 由对比可见, 对称啁啾 LPFG 的特征频谱是以级联啁啾 LPFG 特征频谱为中心向两侧展宽, 同时特征峰值降低, 意味着对称啁啾 LPFG 的条纹中包含了更多的频率成分, 频谱范围更宽. 这是因为对称啁啾结构使 MZI 的干涉臂长度不再是固定值 L , 而是随波长而变化, 导致条纹频率成分的显著增加. 图 3(b) 和图 3(c) 给出了对两种光栅结构条纹特征频谱进行滤波后恢复后得到的相位曲线, 并与原条纹信号进行同步显示. 由图 3(b) 可见, 级联啁啾 LPFG 的相位随波长近似呈线性增加, 相应的透过率随波

长呈等周期的余弦调制, 即条纹 FSR 近乎均匀. 而图 3(c) 所示的对称啁啾 LPFG 的相位随波长呈明显的曲线变化趋势, 相位曲线的斜率随波长而减小, 对应的条纹频率随波长减小, 表现为 FSR 逐渐增大的非均匀条纹特征, 与理论分析结果相符.

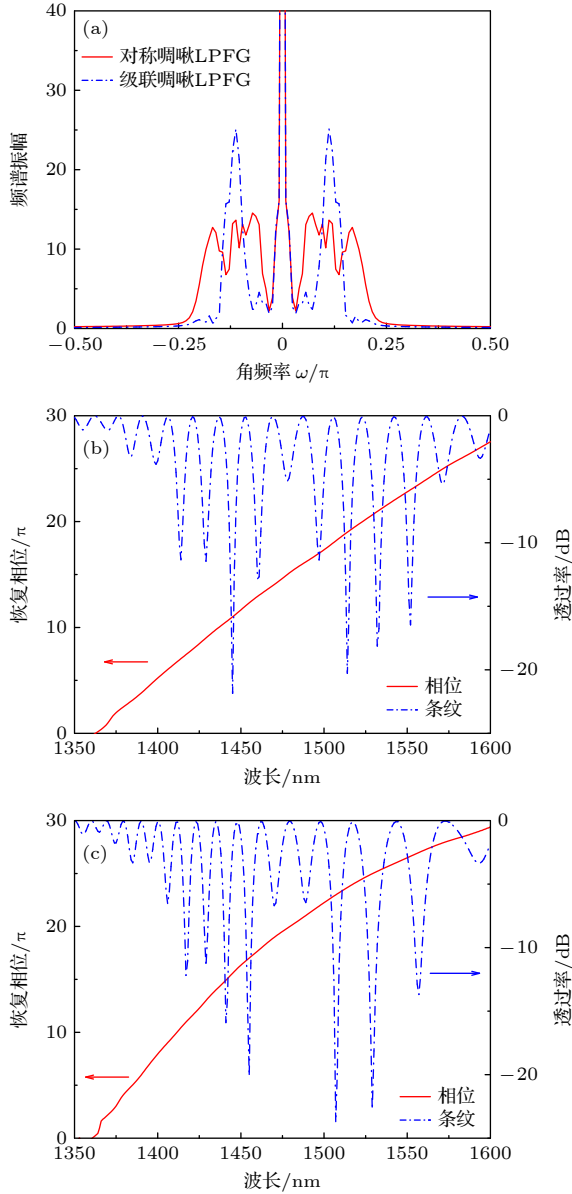


图 3 条纹傅里叶分析 (a) 频谱; (b) 级联啁啾 LPFG 的恢复相位; (c) 对称啁啾 LPFG 的恢复相位
Fig. 3. Fourier analysis for the fringe: (a) Frequency spectrum; (b) recovered phase of cascaded chirped LPFG; (c) recovered phase of symmetrically chirped LPFG.

3 实验结果及分析

对称啁啾长周期光纤光栅通过紫外光逐点曝光写入单模光纤 (Corning SMF-28), 单模光纤

在 120 atm (1 atm = 101325 Pa) 条件下高压载氢一周以提高掺 Ge 纤芯的光敏性. 所用光源为 213 nm 紫外脉冲激光, 脉冲功率为 137 mW, 频率为 12 kHz, 光斑直径为 80 μm , 单点曝光时间为 10 s. 左侧光栅的周期从 296 μm 增大至 343 μm , 变化步长为 3 μm , 每一周期值刻写 4 个周期. 左侧光栅长度 L 为 2.17 cm, 等效啁啾系数为 21.9 $\mu\text{m}/\text{cm}$, 右侧光栅以相同方式对称刻写, 周期从 343 μm 减小至 296 μm , 等效啁啾系数为 -21.9 $\mu\text{m}/\text{cm}$. 刻写完成后的光栅在 120 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温条件下退火 12 h 以增强光谱稳定性.

实验中刻制的对称啁啾 LPFG 透射谱如图 4(a) 中红色实线所示, 条纹 FSR 随波长逐渐增大, 与相同参数下数值仿真条纹图谱基本吻合. 图 4(b) 显示了传感器在空气中和水中的透射条纹谱对比, 与一般的 LPFG 传感相似, 环境折射率的增加使光谱发生蓝移, 但显著不同的是, 条纹图谱中不同 FSR 的干涉谷波长偏移量明显不同, 如图中标识的 “dip1” 和 “dip2” 分别偏移了 4.6 nm 和 7.2 nm, 体现

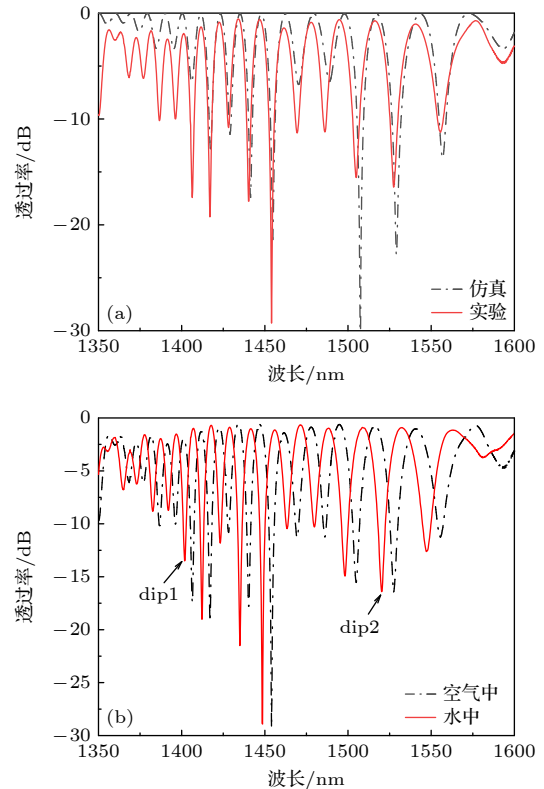


图 4 对称啁啾 LPFG 透射谱 (a) 实验与仿真透射谱对比; (b) 水中与空气中透射谱对比
Fig. 4. Transmission spectrum of symmetrically chirped LPFG: (a) Comparison between the experimental and simulated spectra; (b) comparison between the spectra in air and water.

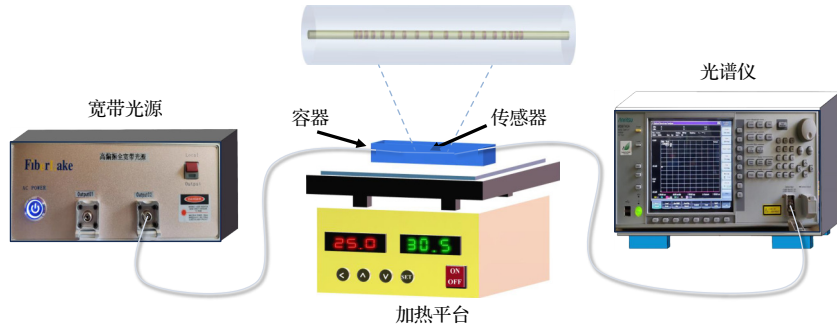


图 5 环境折射率和温度响应测试实验装置示意图

Fig. 5. Schematic diagram of the setup for SRI and temperature measurements.

了对相同环境参量变化响应的差异性, 为多参量传感器的构建奠定了基础. 后续传感测试中将以 dip1 和 dip2 的波长偏移表征对 SRI 和温度的响应.

环境折射率和温度响应测试实验装置如图 5 所示, 传感器置于金属容器中, 并固定保持绷直状态以避免弯曲的影响, 宽带光源发出的光经过传感器后由光谱仪 (Anristu, MS9740A) 接收并显示光谱, 金属容器置于加热平台上. 质量比浓度从 0% 至 40% 的甘油溶液用以模拟产生不同环境折射率^[19], SRI 响应测试时, 温度保持为 20 °C.

不同 SRI 下的条纹图谱变化如图 6 中插图所示, dip1 和 dip2 随 SRI 增大均呈现蓝移, 整体蓝移特性与已知的 LPFG 对 SRI 的响应特性相同, 但 dip2 的偏移量明显比 dip1 大得多. 图 6 中给出了 5 次折射率重复测量所得的带误差棒数据, 线性拟合结果表明, 在 1.3333—1.3841 的 SRI 范围内, dip1 和 dip2 对 SRI 的响应灵敏度分别为 -55.319 nm/RIU 和 -95.346 nm/RIU , 线性拟合斜率的标准误差分别为 ± 2.496 和 ± 4.999 , R^2 分别为 0.981 和 0.975, 线性度良好.

温度响应测试时, 容器内为纯净的去离子水, 由加热平台对其进行加热升温, 在 12—80 °C 的范围内每隔约 6 °C 记录一次光谱, 共记录 12 个温度点的光谱数据, 每个温度值测量时温度保持稳定 5 min 以上. 温度升高过程中的条纹变化如图 7 中的插图所示, 条纹图谱随温度升高而向长波长方向移动, dip2 同样相对于 dip1 有更大的偏移量. 图 7 中同时给出了 5 次温度重复测量所得的带误差棒数据, 线性拟合结果显示, dip1 和 dip2 对温度的响应灵敏度分别为 $0.0627 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 和 $0.0859 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, 线性拟合斜率的标准误差分别为 ± 0.0008 和 ± 0.0012 , R^2 值均为 0.998, 线性度良好.

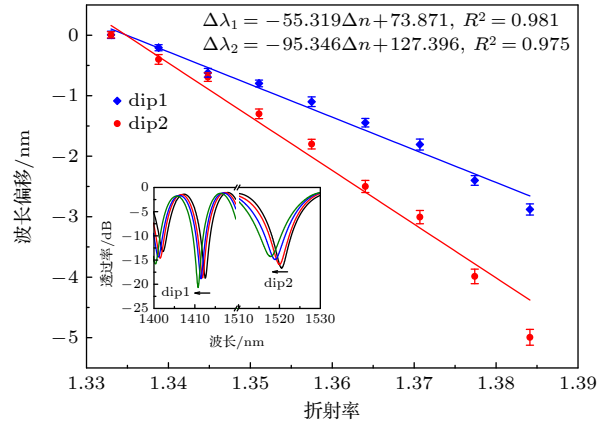


图 6 传感器对 SRI 变化的响应特性

Fig. 6. Sensing characteristics to SRI variation.

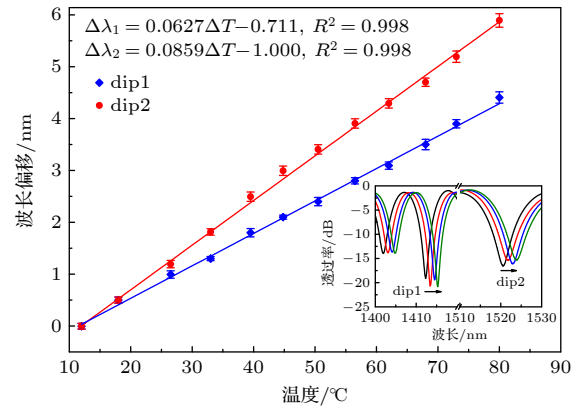


图 7 传感器对温度变化的响应特性

Fig. 7. Sensing characteristics to temperature variation.

环境折射率和温度检测的实验结果显示了对称啁啾 LPFG 的干涉条纹图谱中 dip1 和 dip2 对于相同环境参量的差异化响应特性. 对于 SRI 和温度的双参量传感, dip1 和 dip2 的波长偏移 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 与 SRI 和温度的变化量 Δn , ΔT 之间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{n1} & K_{T1} \\ K_{n2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中, K_{n1} 和 K_{n2} 是 dip1 和 dip2 对 SRI 的响应灵敏度系数; K_{T1} 和 K_{T2} 是 dip1 和 dip2 对温度的响应灵敏度系数. 对未知的 SRI 和温度测量时, SRI 和温度的变化量即可通过相应的矩阵计算得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{n1} & K_{T1} \\ K_{n2} & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

需要特别指出的是, 液体的折射率随温度的上升而减小, 因此液体温度变化引起的条纹移动实际上是由直接的温度变化和间接的液体折射率变化共同作用的结果. 假设传感器对 SRI 变化的响应与温度无关, 则实验测得的温度灵敏度可以表示为^[27]

$$K_{Tj} = \hat{K}_{Tj} + K_{nj}R_{n,T} \quad (j = 1, 2), \quad (12)$$

式中, \hat{K}_{Tj} 为传感器单独受温度影响时的灵敏度; K_{nj} 为 20 °C 时的 SRI 响应灵敏度, $R_{n,T}$ 为液体的温度系数, 对实验中用作溶剂的清水, 该温度系数为 $R_{n,T} = 1.02 \times 10^{-4}$ ^[27], 因而 (11) 式中的温度灵敏度 K_{Tj} 应修正为 \hat{K}_{Tj} . 根据 (12) 式及图 6 和图 7 的拟合结果, 条纹中 dip1 和 dip2 对温度单独响应的灵敏度可以计算得到, 分别为 57.1 pm/°C 和 84.9 pm/°C. 进而, (11) 式可以被明确表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -55.319 & 0.0571 \\ -95.346 & 0.0849 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

温度和液体折射率同时变化时, 温度和 SRI 的变化量可以通过测量 dip1 和 dip2 的波长偏移量并代入 (13) 式计算得到. 需要特别说明的是, 上述理论分析和实验测试只是以温度和 SRI 双参量的同时测量为例概念性地验证和展示对称啁啾 LPFG 的多参量传感能力, 由于对称啁啾 LPFG 的干涉条纹中包含多个不同 FSR 的干涉谷, 从原理上讲, 该光栅结构完全可以被拓展用于对 3 个及以上参量的同时测量. 此外, 该传感器的折射率灵敏度 -55.319 nm/RIU 和 -95.346 nm/RIU 是在 1.3333—1.3841 的低 SRI 范围内的测量结果, 在接近包层折射率的 SRI 范围内可以达到更高的灵敏度^[1], 而且还可以通过包层腐蚀^[27]、镀高折射率纳米薄膜^[23,26]、设计在色散转折点附近^[2,24] 或采用特种光纤^[19-22] 等手段提高传感器对环境折射率的响应灵敏度.

4 结 论

本文提出并实现了一种基于对称啁啾长周期

光纤光栅的双参量传感器, 对称啁啾的光栅结构使透射光谱表现为频率渐变的非均匀条纹结构, 不同波长位置干涉谷的波长偏移对同一环境参量的变化具有显著差异的响应灵敏度, 这使得对称啁啾 LPFG 具有多参量传感能力. 对对称啁啾 LPFG 的条纹光谱特性进行了理论和数值分析, 利用紫外光逐点曝光法刻制了对称啁啾 LPFG 结构, 并以环境折射率和温度检测为例, 验证了对称啁啾 LPFG 的双参量传感能力, SRI 和温度的响应灵敏度分别为 -95.316 nm/RIU 和 0.0849 nm/°C. 需要特别指出的是, 对称啁啾 LPFG 结构中 MZI 的干涉臂长度随波长变化, 利用单个光栅结构本身产生的特殊光谱特性实现对同一参量的差异化响应, 通过矩阵解调实现多参量传感, 与其他基于多个光纤结构组合或单个光栅结构结合偏振控制等多参量传感技术不同, 该传感器只需在普通单模光纤中用紫外光照射方法即可制成, 结构原理简单而多参量传感特性优越. 更为重要的是, 对称啁啾 LPFG 的干涉条纹图谱中不同波长位置存在对应于不同干涉臂长度的多个干涉谷, 因而完全可以将其拓展应用于对 3 个及以上参量的同时测量, 在以折射率响应为基础的光纤传感领域具有重要的实际应用价值.

参考文献

- [1] Gao S, Liu Y, Yang J, Duan Z Y, Yin T A, Liu Z H, Shi J H, Yuan L B, Guan C Y 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 1696
- [2] Liu S, Zhou M, Zhang Z, Sun Z Y, Bai Z Y, Wang Y P 2022 *Opt. Lett.* **47** 2602
- [3] Hao J Q, Han B C 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 0206002 (in Chinese) [郝晋青, 韩丙辰 2020 *光学学报* **40** 0206002]
- [4] Tian T, Li M, Ma Y W, Geng T, Yuan L B 2023 *Opt. Lett.* **48** 2785
- [5] Wang J B, Hao J Y, Zhou J, Wang A Z, Zeng X Z, Yang X Y, Meng H R, Li S, Yang Q, Sun W M, Geng T 2023 *Sens. Actuators, A* **359** 114465
- [6] Yang Y, Xu B, Liu Y M, Li P, Wang D N, Zhao C L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 094205 (in Chinese) [杨易, 徐贵, 刘亚铭, 李萍, 王东宁, 赵春柳 2017 *物理学报* **66** 094205]
- [7] Chen P Y, Zhong N B, He X F, Xie Q H, Wan B, He Y Y, Wu L, Liu Y, Lai D 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0428003 (in Chinese) [陈鹏宇, 钟年丙, 何雪丰, 解泉华, 万波, 贺媛媛, 吴磊, 刘洋, 赖东 2024 *光学学报* **44** 0428003]
- [8] Chen H Y, Gu Z T, Gao K 2014 *Sens. Actuators, B* **196** 18
- [9] Ding Y L, Chen Y, Luo S, Ling Q, Zhang Y S, Yu Z W, Guan Z G, Chen D R 2024 *Opt. Laser Technol.* **171** 110414
- [10] Chen Y, Luo W X, Jiao B B, Yan Y X, Ling Q, Chen H Y, Yu Z W, Guan Z G, Chen D R 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 463
- [11] Yue Y, Hu X X, Zhou R, Wang R H, Qiao X G 2023 *J. Lightwave Technol.* **41** 2578
- [12] Zhu X S, Ling Q, Ren Z Y, Chen H Y, Zhou R J, Wang Y,

- Lou G, Luo S, Yu Z W, Guan Z G, Chen D R 2025 *Opt. Laser Technol.* **182** 112232
- [13] Ghosh S, Dissanayake K, Asokan S, Sun T, Rahman B M A, Grattan K T V 2022 *Sens. Actuators, B* **364** 131818
- [14] Li X L, Zhao H Y, Wu W J, Jiang W F, Zheng J J, Zhang Z X, Yu K H, Wei W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 050702 (in Chinese) [李醒龙, 赵浩兴, 武文杰, 蒋卫峰, 郑加金, 张祖兴, 余柯涵, 韦玮 2022 物理学报 **71** 050702]
- [15] Liu Y G, Yang D Q, Wang Y X, Zhang T, Shao M, Yu D, Fu H W, Jia Z N 2019 *Opt. Commun.* **443** 166
- [16] Zhang P, Tang M, Gao F, Zhu B P, Fu S N, Ouyang J, Shum P P, Liu D M 2014 *Opt. Express* **22** 19581
- [17] Zhao Y, Zhao J, Wang X X, Peng Y, Hu X G 2022 *Sens. Actuators, B* **353** 131134
- [18] Bhatia V, Campbell D, Claur R O 1997 *Opt. Lett.* **22** 648
- [19] Ling Q, Gu Z T, Pang B 2020 *Opt. Fiber Technol.* **58** 102264
- [20] Zhao Y, Chen S, Guo Y, Jiang Y, Chen S, Mou C, Liu Y, He Z 2024 *Opt. Laser Technol.* **175** 110879
- [21] Zhang S, Geng T, Sun W M 2022 *Opt. Lett.* **47** 2266
- [22] Esposito F, Srivastava A, Iadicco A, Campopiano S 2019 *Opt. Laser Technol.* **113** 198
- [23] Urrutia A, Goicoechea J, Ricchiuti A, Barrera D, Sales S, Arregui F 2016 *Sens. Actuators, B* **227** 135
- [24] Liu T, Li Y W, Dai X Y, Gan W B, Wang X S, Dai S X, Song B A, Xu T F Zhang P Q 2023 *J. Lightwave Technol.* **41** 5169
- [25] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1277
- [26] James S W, Ishaq I, Ashwell G J, Tatam R P 2005 *Opt. Lett.* **30** 2197
- [27] Yan J H, Zhang A P, Shao L Y, Ding J F, He S L 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 1360

Dual-parameter sensing based on symmetrically chirped long-period fiber grating*

HUANG Qiuping¹⁾ ZHU Xiaoshuai¹⁾ REN Ziyang¹⁾ CHEN Haiyun^{1)2)†}
 LING Qiang³⁾ PENG Baojin¹⁾²⁾ CHEN Daru³⁾

1) (*College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)

2) (*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)

3) (*Hangzhou Institute of Advanced Studies, Zhejiang Normal University, Hangzhou 311231, China*)

(Received 7 April 2025; revised manuscript received 1 June 2025)

Abstract

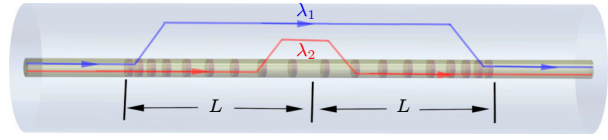
A dual-parameter sensor based on a symmetrically chirped long-period fiber grating (SCLPFG) is proposed and demonstrated. The SCLPFG consists of two segments of long-period fiber gratings (LPFGs) with the same length and average period but opposite chirp coefficients, forming an in-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI). Due to the chirping effect of the LPFG, the core mode at different wavelength couples to the cladding modes at different positions within the positively chirped LPFG. Integrated with the symmetry of the SCLPFG, the stimulated cladding mode recouples to the core at the symmetrical position in the negatively chirped LPFG. Consequently, in this MZI configuration, the effective length of the interference arm is not fixed but varies with wavelength. As a result, the transmission spectrum of the SCLPFG is characterized by a nonuniform fringe pattern where the free spectrum range (FSR) increases with wavelength increasing. For the MZI-based fiber sensor, the phase difference between the core and cladding modes, influenced by environmental parameters, plays a crucial role in determining sensitivity, as this phase difference is directly proportional to the length of the interference arm. Therefore, for a specific measurand, the sensitivities interrogated by the dips at different wavelengths in the fringe pattern are inherently different, which leads to the possibility of multi-parameter sensing through a differential modulation method.

The fringe characteristics and sensing mechanism are systematically investigated through theoretical analysis and numerical simulation. In the experimental section, the SCLPFG structure is engraved on a Corning

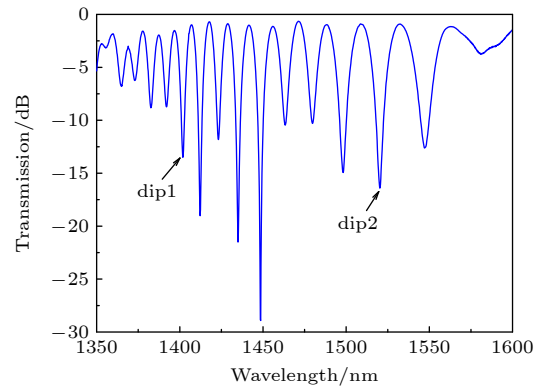
* Project supported by the Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province, China (Grant No. LGF19F050001).

† Corresponding author. E-mail: chy@zjnu.cn

single-mode fiber by irradiating photosensitive core with point-by-point UV pulsed laser. The grating exhibits an average period of 321 μm and a chirping coefficient of $\pm 21.9 \mu\text{m}/\text{cm}$, with the total length of the symmetrically chirped grating determined to be 4.34 cm. Experimental implementation of simultaneous dual-parameter sensing for surrounding refractive index (SRI) and temperature is conducted, verifying the differential response of distinct fringe dips to SRI and temperature variations. A 2×2 sensitivity coefficient matrix is established by linearly fitting the SRI and temperature response data, which are obtained by interrogating two dips at different wavelengths. Thus, the variations of SRI and temperature are determined by multiplying the inverse sensitivity coefficient matrix with the wavelength shift array. Furthermore, temperature sensitivities are corrected by considering the thermal effect on the refractive index of the liquid. Finally, the maximum sensitivity of the sensor to SRI is $-95.316 \text{ nm}/\text{RIU}$ and a maximum sensitivity to temperature is $0.0849 \text{ nm}/\text{C}$, both of which have excellent linearity. This sensing scheme features a compact structure, high sensitivity, and the ability to measure multiple parameters. Moreover, the multi-channel nonuniform fringe characteristics enable the sensor configuration to be extended for simultaneous measurement of three or more parameters, thus providing a promising lab-on-fiber platform for multi-parameter sensing applications.



$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -55.319 & 0.0571 \\ -95.346 & 0.0849 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix}$$



Keywords: symmetrically chirped long-period fiber grating, dual-parameter sensing, refractive index, temperature

PACS: 42.81.-i, 07.07.Df, 42.25.Hz

DOI: [10.7498/aps.74.20250449](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250449)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250449](https://cstr.net.cn/detail/32037.14.aps.74.20250449)

基于对称啁啾长周期光纤光栅的双参量传感

黄秋萍 朱晓帅 任子嫣 陈海云 凌强 彭保进 陈达如

Dual-parameter sensing based on symmetrically chirped long-period fiber grating

HUANG Qiuping ZHU Xiaoshuai REN Ziyan CHEN Haiyun LING Qiang PENG Baojin CHEN Daru

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 164211 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250449

CSTR: 32037.14.aps.74.20250449

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250449>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

离轴螺旋长周期光纤光栅特性研究

Properties of off-axis helical long-period fiber gratings

物理学报. 2023, 72(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230415>

基于飞秒激光加工长周期光栅的全光纤三阶轨道角动量模式的产生

Generation of all-fiber third-order orbital angular momentum modes based on femtosecond laser processing of long-period grating

物理学报. 2023, 72(4): 044201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221928>

一种同步研究透明材料折射率和动力学特性的实验方法

An experimental method of simultaneously studying refractive index and dynamic properties of transparent materials

物理学报. 2021, 70(17): 176201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210414>

具有温度自补偿的保偏光纤布拉格光栅多参量传感器的设计与制备

Temperature-independent multi-parameter sensor based on polarization maintaining fiber Bragg grating

物理学报. 2023, 72(14): 144206 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230478>

不同温度压力对浓度反演精度的定量分析

Quantitative analysis of accuracy of concentration inversion under different temperature and pressure

物理学报. 2021, 70(7): 073201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201672>

延性金属层裂强度对温度、晶粒尺寸和加载应变率的依赖特性及其物理建模

Dependence of spall strength on temperature, grain size and strain rate in pure ductile metals

物理学报. 2022, 71(3): 034601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210702>