光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024071502

基于马赫-泽德干涉仪级联结构的高灵敏度光纤温度传感器

王梓丞*，田凯迪，匡崇葳，赵玉欣，张相军

（哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要： 光纤温度传感器由于其结构的小型化和抗电磁干扰能力强受到了研究者的广泛关注，但目前部分传感器灵敏度无法满足实际需求。针对这一问题，提出了一种基于 Lyot 滤波器和马赫-泽德干涉仪级联的高灵敏度光纤温度传感器。马赫-泽德干涉仪由两个级联的气泡型凸锥组成，因其全保偏光纤结构具有较好的稳定性。同时，作为传感干涉仪的 Lyot 滤波器是通过在两个线偏振器之间以 45°角熔接一段保偏光纤制成。通过调整 Lyot 滤波器中传感部分保偏光纤的长度，使其自由光谱范围接近马赫-泽德干涉仪，从而产生游标效应增强级联传感器的灵敏度。实验结果表明，Lyot 滤波器的灵敏度为－1.4 nm/℃，级联传感器的灵敏度提高到－28.3 nm/℃，灵敏度放大倍数为 20.2。所提出的光纤温度传感器偏振稳定性强、制作简单、灵敏度高，能够满足工业领域中的高精度应用需求。

关键词： 光纤传感器；游标效应；马赫-泽德干涉仪；Lyot 滤波器；温度

中图分类号： TP212.11　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0759－08

Sensitivity-enhanced Optical Fiber Temperature Sensor Based on the Cascaded Lyot Filter and Mach-Zehnder Interferometer

WANG Zicheng, TIAN Kaidi, KUANG Chongwei, ZHAO Yuxin, ZHANG Xiangjun

(School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, CHN)

Abstract: Optical fiber temperature sensors gave attracted significant interest owing to their compact structure and resistance to electromagnetic interference. Nevertheless, it is imperative to enhance the detection sensitivity to adequately fulfill the existing requirements. This study proposes and demonstrates a sensitivity-enhanced optical fiber temperature sensor using the cascaded Lyot filter and Mach-Zehnder interferometer (MZI), based on the Vernier effect. The MZI has two consecutive bubble-type upper tapers and is employed as a reference interferometer, owing to the exceptional stability of its totally polarization-maintaining fiber (PMF) construction. A Lyot filter is created by fusion splicing a segment of PMF at a 45° angle between two linear polarizers, functioning as a sensing interferometer. The sensitivity of the cascaded sensor is improved through the Vernier effect, which is produced when the length of the sensing PMF in the Lyot filter is modified to closely match the free spectral range (FSR) of the MZI. Experimental results reveal the sensitivity of the Lyot filter is －1.4 nm/℃, while the cascaded sensor achieves an increased sensitivity of －28.3 nm/℃, with a sensitivity amplification factor of 20.2. The proposed PMF sensor structure leverages the controllable polarization

收稿日期：2024－07－15.

* **通信作者：**王梓丞

characteristics to enhance system performance, effectively addressing the issue of detection errors that arise from the fluctuating polarization state of the optical signal being transmitted throughout the sensitivity test. This proposed optical fiber temperature sensor, with a robust polarization stability, simple fabrication, and high sensitivity, is suitable for high-precision industrial applications.

Key words: optical fiber sensor; vernier effect; Mach-Zehnder interferometer; Lyot filter; temperature

0 引言

光纤温度传感器因具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、重量轻等优点[1-3]，且非常适合在复杂的条件下运行，而获得了广泛的认可。灵敏度是光纤温度传感器最重要的指标，也是影响测量结果准确性的重要因素。许多研究都致力于更好地设计光纤传感器，以获得更高的灵敏度和更准确的测量结果[4-6]。

光纤温度传感器包括分布式光纤温度传感器[7-8]、光纤光栅温度传感器[9-11]和干涉式光纤温度传感器[12-14]等多种形式。与前两种光纤温度传感器相比，干涉式光纤温度传感器具有达成更高灵敏度的潜质。目前，干涉式光纤温度传感器主要分为马赫-泽德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)[15]、萨格纳克干涉仪(Sagnac Interferometer, SI)[16]、迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer, MI)[17]和法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)[18]。

光学游标效应是提高光纤传感器灵敏度的一种有效方法，近年来被广泛采用。当自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)接近但不相等的两个干涉仪级联或并联时，叠加后的干涉光谱将呈现包络，利用光学游标效应可以将光纤传感器的灵敏度进行放大。Zhou 等[19]提出了一种基于级联 SI 和 FPI 具有游标效应的光纤温度传感器，该结构将温度灵敏度从－1.7 nm/℃提高到 10.28 nm/℃。Jia 等[20]提出了一种基于级联 SI 和 MZI 具有游标效应的光纤温度传感器，SI 的温度灵敏度为－1.68 nm/℃，级联 MZI 后可以将其提高到 14.30 nm/℃。虽然这些基于游标效应的光纤温度传感器能够提高灵敏度，但是参考干涉仪通常不够稳定，容易受温度和应变等因素影响，导致灵敏度的提升效果有限。

本文提出了一种基于 Lyot 滤波器和 MZI 级联的高灵敏度温度传感器，利用了光学游标效应进行灵敏度增强。MZI 是一个全保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)结构，偏振光纤赋予了其较强的稳定性，即使有外界温度或者应力的作用，偏振态的变化对灵敏度测量结果的影响也不再明显，因此被用作为参考干涉仪。Lyot 滤波器用作传感干涉仪，其传感部分的 PMF 具有较高的线性双折射，能够更好地感知温度的变化，通过调控传感部分 PMF 的长度可以得到所需要的游标效果。经过理论分析和实验验证，所提出的光纤温度传感器达到了较高的灵敏度，系统具有高稳定性和可靠性，整体结构易于实现。

1 原理和仿真分析

所提出的基于 Lyot 滤波器与 MZI 级联的光纤温度传感器结构原理如图 1 所示。SLD 宽带光源发出的光经过线偏振器后变为线偏振光，线偏振光经过 MZI 后产生梳状干涉光谱，然后到达 Lyot 滤波器。通过调整 Lyot 滤波器中传感部分 PMF 的长度，使其 FSR 接近 MZI，从而产生光学游标效应，形成干涉光谱包络，最终在光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)上显示。

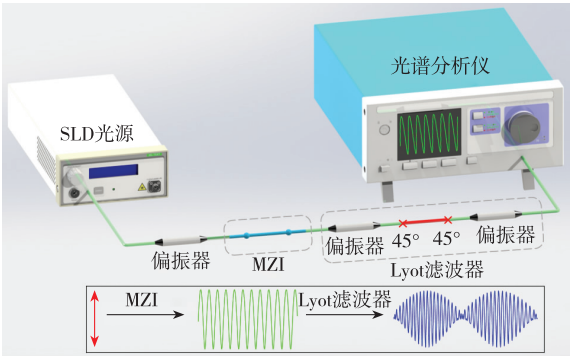


图 1 所提出的级联传感器结构原理图

1.1 基本原理

MZI 由两个级联的气泡型凸锥组成，如图 2 所示。全光纤型 MZI 的基本原理是双光束干涉，利用的是 PMF 纤芯基膜和包层模式之间的干涉。两个

气泡型凸锥分别起着分束器和耦合器的作用，第一个气泡型凸锥作为模式激发区，可以有效地激发出包层模式，将 PMF 纤芯的光功率扩散到纤芯和包层；第二个气泡型凸锥作为模式耦合区，能够将包层中扩散的光功率重新耦合回纤芯。这两部分之间的 PMF 作为偏振模有效干涉区，积累着相位差。这种精密结构可以有效集成和替代大型空间光偏振系统，同时具有强偏振稳定性的优势。

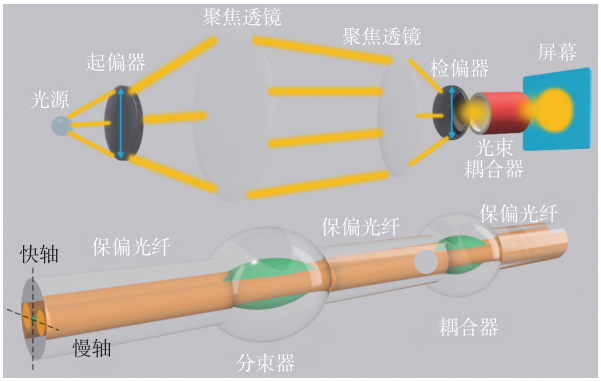


图 2　MZI 原理图

在光纤中通过微加工方式制备出光纤分束器、耦合器来分别实现光功率的分配和耦合作用。对于干涉光谱的效果，主要可以通过透射光谱的 FSR、干涉条纹的消光比和传输损耗三个方面来衡量。对于模式激发区，假设纤芯的分光比为 δ_1，则包层的分光比为 $1-\delta_1$；经过偏振模有效干涉区之后，到达模式耦合区时纤芯的分光比为 δ_2，则包层的分光比为 $1-\delta_2$。因此，在 MZI 输出端形成的透射光谱表达式为：

$$I = I_1\delta_1\delta_2 + I_1(1-\delta_1)(1-\delta_2) + 2\sqrt{I_1^2\delta_1\delta_2(1-\delta_1)(1-\delta_2)}\cos(\Delta\varphi_0) \quad (1)$$

式中，I_1 为入射光强，$\Delta\varphi_0$ 为纤芯基膜与包层模式之间的相位差。

透射光谱所对应的干涉条纹消光比可以表示为：

$$ER = 10\cdot\lg\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 10\lg\left(\frac{1+\sqrt{\delta_1\delta_2/(1-\delta_1)(1-\delta_2)}}{1-\sqrt{\delta_1\delta_2/(1-\delta_1)(1-\delta_2)}}\right) \quad (2)$$

利用琼斯矩阵对全光纤型 MZI 的原理进行量化分析，当光通过 MZI 之后，透射光的琼斯矩阵可以表示为：

$$\begin{bmatrix} E_{\text{core}}^{\text{out}} \\ E_{\text{cladding}}^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(Cl) & -\mathrm{i}\sin(Cl) \\ -\mathrm{i}\sin(Cl) & \cos(Cl) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Delta\varphi_1} & -\mathrm{i}\sin(Cl) \\ -\mathrm{i}\sin(Cl) & \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Delta\varphi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(Cl) & -\mathrm{i}\sin(Cl) \\ -\mathrm{i}\sin(Cl) & \cos(Cl) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中，C 和 l 分别为耦合系数和耦合长度，$\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 分别为光经过 PMF 纤芯和包层所经历的相位变化，可表示为：

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi n_{\text{core}} L_1}{\lambda}$$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi n_{\text{cladding}} L_1}{\lambda} \quad (4)$$

式中，n_{core} 和 n_{cladding} 分别为 PMF 纤芯和包层的折射率，L_1 为传感部分 PMF 的长度，λ 表示入射光的波长。

对于理想的 3 dB 耦合器，$Cl=\pi/4$，透射光的琼斯矩阵可以表示为：

$$\begin{bmatrix} E_{\text{core}}^{\text{out}} \\ E_{\text{cladding}}^{\text{out}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1-\cos(\Delta\varphi_1-\Delta\varphi_2) \\ 1+\sin(\Delta\varphi_1-\Delta\varphi_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

纤芯的最终输出光强表达式为：

$$I_{\text{out}} = E_{\text{core}}\cdot E_{\text{core}}^{*} \quad (6)$$

MZI 的 FSR 可以表示为：

$$FSR_{MZI} = \frac{\lambda^2}{(n_{\text{core}}-n_{\text{cladding}})L_1} \quad (7)$$

可以看出，在入射光波长、PMF 纤芯、包层折射率确定的情况下，MZI 的 FSR 可以通过改变传感部分 PMF 的长度来调控。传感部分的 PMF 长度越长，干涉条纹的 FSR 越小，FSR 与保偏光纤长度成反比。通过调控干涉臂长可以有效掌握干涉条纹的数目和 FSR，这对于将 MZI 干涉结构应用于多波段滤波处理作了很好的指导作用。

如图 3 所示，Lyot 滤波器由两个线偏振器和与偏振轴成 45°角的一段 PMF 组成，而没有采用传统的偏振控制器，该方法缩小了传感器的体积。Lyot

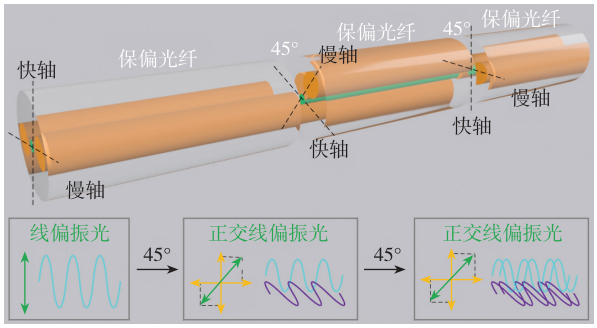


图 3　Lyot 滤波器原理图

滤波器是一种基于偏振干涉的光调制结构，基本原理如下：输入光经过第一个线偏振器后变为线偏振光，然后经过第一个 45°熔接点，被分为沿快轴和慢轴传播的两束光。由于 PMF 固有的线性双折射，两束线偏振光以不同的传播常数沿光纤传输，从而产生相位差。到达第二个 45°熔接点后，两束光被投影到第二个线偏振器的方向，最终在第二个线偏振器发生干涉。

利用琼斯矩阵对 Lyot 滤波器的原理进行量化分析，当光通过 Lyot 滤波器后，透射光的琼斯矩阵可以表示为：

$$\boldsymbol{E}_{\text{out}}=\begin{bmatrix}\cos\alpha_2 & \sin\alpha_2\\ -\sin\alpha_2 & \cos\alpha_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e^{i\Delta\varphi/2} & 0\\ 0 & e^{-i\Delta\varphi/2}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\alpha_1 & \sin\alpha_1\\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_x\\ 0\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中，α_1 和 α_2 分别为传感 PMF 与两个线偏振器的对轴角度，即慢轴或快轴之间的夹角。$\Delta\varphi$ 为 PMF 引起的线性相位延迟，可表示为：

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi BL_2}{\lambda} \tag{9}$$

式中，B 为 PMF 的双折射，L_2 为传感 PMF 的长度，λ 为入射光波长。

则透射光强可以表示为：

$$I_{\text{Lyot}}=\cos^2\alpha_1\cos^2\alpha_2+\sin^2\alpha_1\sin^2\alpha_2+\frac{1}{2}\sin 2\alpha_1\sin 2\alpha_2\cos\Delta\varphi \tag{10}$$

Lyot 滤波器的 FSR 可以表示为：

$$FSR_{\text{Lyot}}=\frac{\lambda^2}{BL_2} \tag{11}$$

可以看出，在入射光波长和 PMF 双折射确定的情况下，Lyot 滤波器的 FSR 可以通过改变传感 PMF 的长度来调控。Lyot 滤波器中传感 PMF 长度越长，干涉光谱的干涉条纹越密，FSR 与 PMF 长度成反比。

为了获得更好的传感性能，需要确定轴向旋转熔接的角度 α_1 和 α_2，该参量将影响游标光谱的外观、条纹对比度和 FSR。根据 Lyot 滤波器偏振特性的理论分析，当 α_1 为 0 或 $\pi/2$ 时，所有的光都被注入到 PMF 的快轴或慢轴上，而当夹角为 $\pi/4$ 时，光被均匀地分散。因此，输出的干涉光谱是对称的，其中 $\alpha_1=\pi/4$ 为对称平面。设置传感 PMF 的初始长度为 94.0 cm，双折射的数值为 8.18×10^{-4}。利用上述参数对 α_2 进行研究，并将 α_1 设为 $\pi/4$。如图 4 所示，随着 α_2 从 0 到 $\pi/2$ 的变化，透射光谱逐渐从载波转换为包络调制。仿真结果显示，初始长度和双折射决定了干涉光谱的 FSR，当对轴角度都为 $\pi/4$ 时透射率最大，因此，实验中两个对轴角度都设置为 $\pi/4$。

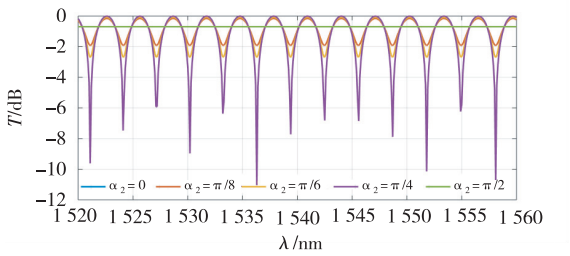


图 4 采用不同对轴角度 Lyot 滤波器的模拟透射谱

1.2 数值仿真

Lyot 滤波器的 FSR 与 MZI 相似但不相等。对于级联结构，得到的频谱是由振幅变化的条纹组成的周期包络。因此，包络的 FSR 可表示为：

$$FSR_{\text{envelope}}=\frac{FSR_{\text{Lyot}}\times FSR_{\text{MZI}}}{|FSR_{\text{Lyot}}-FSR_{\text{MZI}}|} \tag{12}$$

包络的平移量相比 Lyot 滤波器会被放大至某一倍数，即灵敏度放大倍数：

$$M=\frac{FSR_{\text{MZI}}}{|FSR_{\text{Lyot}}-FSR_{\text{MZI}}|} \tag{13}$$

因此，级联传感器的温度灵敏度可以表示为[21]：

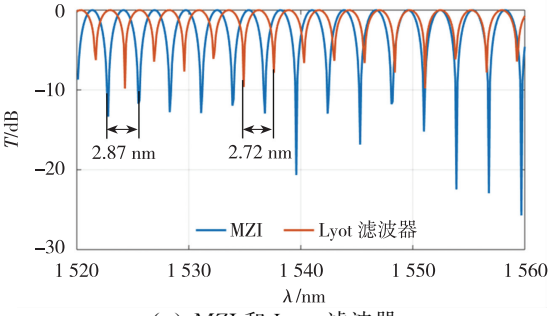
$$S_{\text{envelope}}=M\times\lambda\left(\frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial T}+\frac{1}{L_2}\frac{\partial L_2}{\partial T}\right) \tag{14}$$

式中，$\frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial T}$ 为热光效应引起折射率变化导致的波长移动，$\frac{1}{L_2}\frac{\partial L_2}{\partial T}$ 为热膨胀（弹光效应）引起的光纤长度变化导致的波长移动。显然，干涉光谱包络的温度灵敏度与传感 PMF 双折射和长度有关。

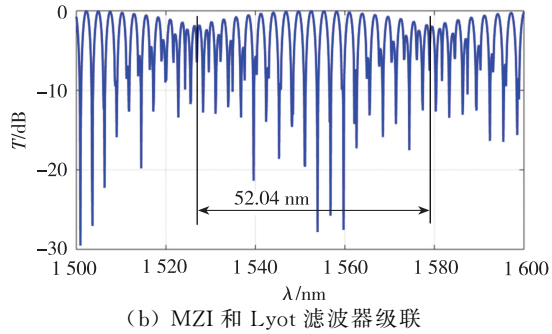
在 MZI 中，PMF 纤芯和包层的折射率分别为 $n_{\text{core}}=1.460$，$n_{\text{cladding}}=1.449$，长度 $L_1=7.6$ cm。Lyot 滤波器中，传感部分的 PMF 与两个线偏振器的对轴角度 $\alpha_1=45°$，$\alpha_2=45°$，双折射 $B=8.18\times10^{-4}$，长度 $L_2=1.078$ m。图 5(a)为 MZI 和 Lyot 滤波器的模拟光谱，FSR 分别为 2.87 和 2.72 nm。将 MZI 和 Lyot 滤波器级联可以产生光学游标效应，形成干涉谱包络，级联的模拟光谱如图 5(b)所示，其 FSR 为 52.04 nm。

当温度发生变化时，PMF 的双折射数值会减小。另外，因为 PMF 的热膨胀系数远小于 PMF 的

双折射系数，所以可以忽略热膨胀引起的波长偏移，即温度升高导致的光纤长度变化可以忽略。仿真温度变化条件下 Lyot 滤波器和级联传感器干涉光谱的平移情况如图 6 所示。从图中可以看出，Lyot 滤波器的干涉光谱平移量为 1.4 nm，级联传感器的干涉光谱平移量为 27.0 nm，灵敏度增强了 19.3 倍，因此，模拟的灵敏度放大倍数为 19.3，与上述的理论分析相符合。通过理论和仿真分析可知，将 MZI 和 Lyot 滤波器级联而产生游标效应，可以大大提高传感器的灵敏度。

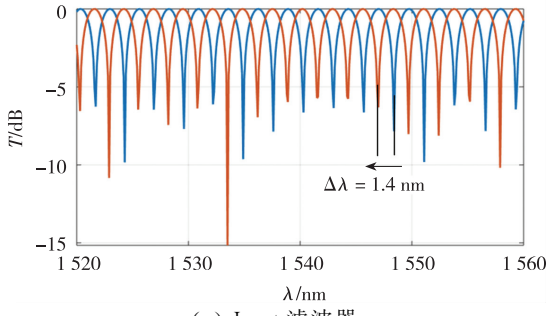


（a）MZI 和 Lyot 滤波器

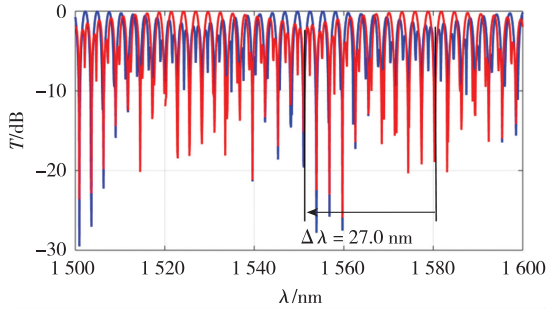


（b）MZI 和 Lyot 滤波器级联

图 5　传感器干涉光谱的仿真



（a）Lyot 滤波器



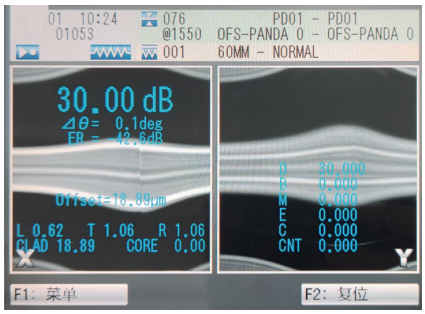
（b）级联传感器

图 6　当温度变化时光谱的平移情况

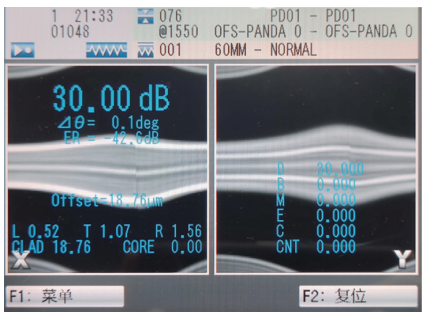
2　实验装置

2.1　传感器制作

MZI 由两个级联的气泡型凸锥组成，该结构在制作中主要通过以下几个步骤进行：首先，将 PMF 的端面经酒精棉擦拭后用切割刀水平切割，其次利用 PMF 熔接机调用相应的熔接模式进行轴向对准。在熔接过程中，放电强度增加到 250 bit，放电持续时间延长至 1 800 ms，重叠设置为 120 μm。通过这种瞬时高放电技术产生了单个气泡型凸锥。在 PMF 的另一端，使用切割刀来实现所需的传感长度，同时使用游标卡尺来调节实验的精度。最后，采用同样的熔接方法制作另一个气泡型凸锥，形成了不同径向长度的气泡型凸锥，如图 7 所示。实验中的 PMF 包层直径为 125 μm，两个气泡型凸锥之间的长度为 7.6 cm。



（a）包层直径为 120 μm



（b）包层直径为 125 μm

图 7　不同径向长度的气泡型凸锥

Lyot 滤波器是由两个线偏振器与一定长度的 PMF 转轴熔接而成的，两个线偏振器的慢轴与 PMF 的慢轴需要成 45°角。使用光纤熔接机熔接时，只需要分别将两个线偏振器的尾纤与一定长度的 PMF 慢轴成 45°熔接即可。

2.2 实验测试

在级联传感器放入温控箱测试温度响应之前，首先研究 Lyot 滤波器的不同传感长度对级联光谱 FSR 的影响。SLD 宽带光源的波长范围为 1 500～1 600 nm，如果 Lyot 滤波器的传感长度过短，则级联光谱的 FSR 会超过 SLD 光源的带宽，导致级联光谱没有完整的周期。如图 8 所示，Lyot 滤波器不同的传感长度将会导致级联光谱的 FSR 有差异，在随后的级联传感器温度实验中，选择传感长度为 107.8 cm 的 Lyot 滤波器与 MZI 级联，以提供该级联结构较大的灵敏度放大倍数和不超过 SLD 光源带宽的 FSR。

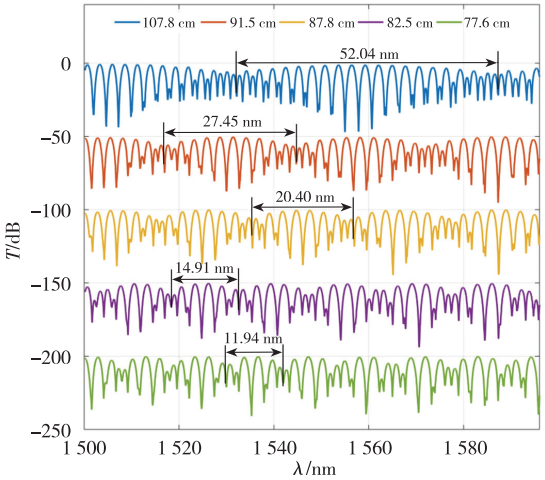


图 8 Lyot 滤波器不同传感长度对级联光谱的影响

如图 9 所示为级联传感器的温度灵敏度测试装置。将制作好的 Lyot 滤波器的传感部分放入温控箱中，两端的线偏振器置于温控箱外部。温度调控范围为 32～34.5 ℃，升温步长为 0.5 ℃。每个温度状态保持 10 min，以确保测量光谱的稳定性。用于参考的 MZI 在温控箱外部，与 Lyot 滤波器输出端相连接的光谱分析仪用于监测级联传感器的透射光谱。通过调控温控箱内的环境温度并监测透射光谱的变化情况来实现级联传感器的温度灵敏度测试。

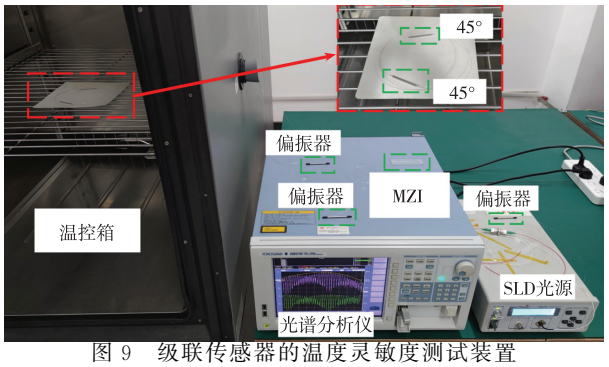
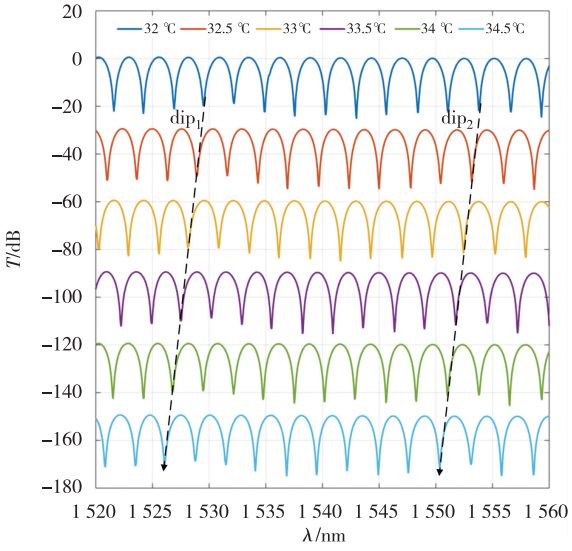
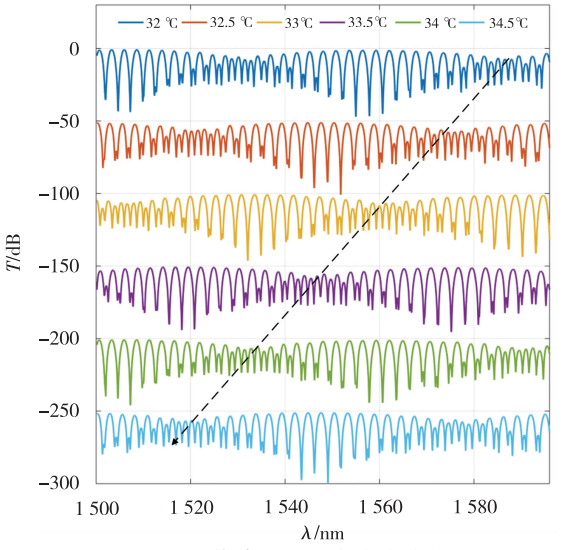


图 9 级联传感器的温度灵敏度测试装置

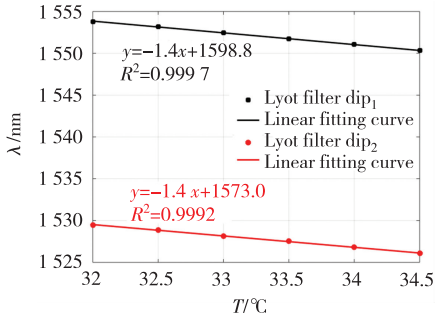
如图 10(a)和(b)分别为环境温度为 32～34.5 ℃时，单个 Lyot 滤波器和级联传感器的温度响应曲线，图 10(c)和(d)分别为通过线性拟合得到的倾角波长与温度的关系。从温度响应曲线可以看出，随着温度的升高，倾角波长向更短的区域移动，Lyot 滤波器和级联传感器的光谱都发生蓝移，波长漂移量与温度的变化近似成线性关系。无游标效应增强的 Lyot 滤波器的 dip_1 和 dip_2 的温度灵敏度均为 −1.4 nm/℃，曲线线性度较好，分别为 0.999 7 和 0.999 2。对于级联传感器的光谱，所选倾角波长的温度灵敏度为 −28.3 nm/℃，线性度为 0.998 9。相比之下，实验测定的温度灵敏度放大倍数为 20.2，与理论模拟值 19.3 比较接近。实验中，OSA 的分辨率为 0.02 nm，温控箱的分辨率为 0.1 ℃。实验



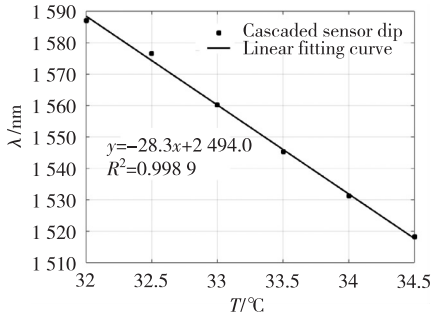
(a) Lyot 滤波器的温度响应曲线



(b) 级联传感器的温度响应曲线



(c) Lyot 滤波器倾角波长和温度之间的拟合曲线



(d) 级联传感器倾角波长和温度之间的拟合曲线

图 10　Lyot 滤波器和级联传感器的温度响应曲线仿真

放大倍数与理论值的差异是由于 OSA 和温控箱的分辨率有限，在识别干涉光谱中波峰或波谷的准确位置时存在一些误差。

将所提出的级联传感器与先前报道的基于游标效应的温度传感器进行比较，其配置和性能参数如表 1 所示。可以清楚地看到，本文提出的级联传感器的灵敏度较高，在有高灵敏度测量需求的相关领域具有一定的优势。

表 1　所提出的级联传感器与同类型传感器的比较

传感器配置	灵敏度/(nm·℃$^{-1}$)	放大倍数	参考文献
级联 SI 和 FPI	10.28	6.05	[19]
级联 SI 和 MZI	14.30	8.51	[20]
级联 Lyot 滤波器和 PMI	26.562	12.168	[22]
级联双 SIs	−13.36	9.15	[23]
级联 PMI 和 FPI	−22.753	20.8	[24]
级联 RLF 和 FPI	−14.63	14.49	[25]
级联 Lyot 滤波器和 MZI	−28.3	20.2	本文

该级联传感器结构具有偏振稳定性强、制作简单、灵敏度高等优点。整个级联传感器结构所用的光纤均为 PMF，具有较好的线偏振态保持能力。随着温度、应变等因素的作用以及使用时间的延长，偏振态的变化对温度灵敏度测量结果的影响变得明显，采用偏振光纤可以提高传感器的稳定性。MZI 和 Lyot 滤波器所涉及的工艺部分均由 PMF 熔接机制作而成，结构制作较为简单。此外，该级联传感器具有较高的灵活性。通过调控 Lyot 滤波器传感部分的长度，结合条纹计数法，可以设计出具有更大灵敏度放大倍数的级联传感器，有利于在大范围内进行高灵敏度的温度测量。

3　结论

综上所述，本文提出了一种基于 Lyot 滤波器和 MZI 级联的高灵敏度光纤温度传感器，利用了游标效应原理进行灵敏度增强，仿真和实验结果吻合良好。MZI 由两个级联的气泡型凸锥组成，该结构是一个全保偏光纤结构，因其稳定性而被用作为参考干涉仪。Lyot 滤波器是通过在两个线偏振器之间以 45°角熔接一段保偏光纤制成，作为传感干涉仪。实验结果表明，单个 Lyot 滤波器的温度灵敏度为 −1.4 nm/℃，MZI 级联 Lyot 滤波器将温度灵敏度提高到了 −28.3 nm/℃，灵敏度放大倍数为 20.2。整个级联传感器具有偏振稳定性强、制作简单、灵敏度高等优点，可以在工业领域进行极好的温度传感。

参考文献：

[1] Liu Q, Wang C, Liu W, et al. Large-range and high-sensitivity fiber optic temperature sensor based on Fabry-Pérot interferometer combined with FBG[J]. Opt. Fiber Technol., 2022, 68: 102794.

[2] Liu M, Wu Y, Song H, et al. Multiparameter measuring system using fiber optic sensors for hydraulic temperature, pressure and flow monitoring[J]. Measurement, 2022, 190: 110705.

[3] Zhao J, Zhao Y, Cai L. Hybrid fiber-optic sensor for seawater temperature and salinity simultaneous measurements[J]. J. Lightwave Technol., 2022, 40(3): 880-886.

[4] Xie L, Sun B, Chen M, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with serial tapered two-mode fibers based on the Vernier effect[J]. Opt. Express, 2020, 28(22): 32447-32455.

[5] Zhang J, Liao H, Lu P, et al. Ultrasensitive temperature sensor with cascaded fiber optic Fabry-Perot interferometers based on Vernier effect[J]. IEEE Photonics J., 2018, 10(5): 1-11.

[6] Gao H, Hu H, Zhao Y, et al. Highly-sensitive optical fiber temperature sensors based on PDMS/silica hybrid fiber structures[J]. Sens. Actuators A, 2018, 284: 22-27.

[7] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Opt. Laser Technol., 2016, 78: 81-103.

[8] Iezzi V L, Loranger S, Kashyap R. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering[J]. Opt. Express, 2017, 25(26): 32591-32601.

[9] Xia X, Zhang Y, Lou X, et al. Half-size metal-packaged fiber Bragg grating for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Opt. Eng., 2019, 58(11): 116104-116104.

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

[11] Huang F, Chen T, Si J, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing [J]. Opt. Commun., 2019, 452: 233-237.

[12] Gao S, Ji C, Ning Q, et al. High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique[J]. Opt. Fiber Technol., 2020, 56: 102202.

[13] Cui Y, Jiang Y, Liu T, et al. A dual-cavity Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80582-80587.

[14] Wang Q, Meng H, Fan X, et al. Optical fiber temperature sensor based on a Mach-Zehnder interferometer with single-mode-thin-core-single-mode fiber structure[J]. Rev. Sci. Instrum., 2020, 91(1): 015006.

[15] Hsu J M, Zheng W H, Chen J Z, et al. Temperature fiber sensors based on Mach-Zehnder interferometer with sturdy structure[J]. IEEE Sens. J., 2015, 15(12): 6995-7000.

[16] Ma M, Chen H, Zhang W, et al. Temperature sensor based on a Sagnac interferometer using a liquid crystal-filled microstructured optical fiber[J]. Mater. Res. Express, 2019, 6(8): 085205.

[17] Hsu J M, Horng J S, Hsu C L, et al. Fiber-optic Michelson interferometer with high sensitivity based on a liquid-filled photonic crystal fiber[J]. Opt. Commun., 2014, 331: 348-352.

[18] Pan R, Yang W, Li L, et al. A high-sensitive fiber-optic fabry-perot sensor with parallel polymer-air cavities based on vernier effect for simultaneous measurement of pressure and temperature[J]. IEEE Sens. J., 2021, 21(19): 21577-21585.

[19] Zhou X, Zhou Y, Li Z, et al. Research on temperature sensing characteristics with cascaded fiber Sagnac interferometer and fiber Fabry-Perot interferometer-based fiber laser[J]. Opt. Eng., 2019, 58(5): 057103.

[20] Jia X, Zhou X, Bi M, et al. High-sensitivity optical fiber temperature sensor of cascaded FSI and MZI based on Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 65: 102625.

[21] Zhang W, Wu X, Zuo C, et al. Highly sensitive temperature and strain sensor based on fiber Sagnac interferometer with Vernier effect[J]. Opt. Commun., 2022, 506: 127543.

[22] Zhao X, Wu X, Zuo C, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor by cascaded configuration of polarization mode interferometer and Lyot filter based on Vernier effect [J]. Opt. Fiber Technol., 2022, 73: 103017.

[23] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect[J]. Opt. Commun., 2015, 336: 73-76.

[24] Liu Y, Wu X, Zhao X, et al. Highly sensitive temperature and strain sensor based on polarization mode interferometer with Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2023, 80: 103393.

[25] Dai M, Chen Z, Zhao Y, et al. Fiber optic temperature sensor with online controllable sensitivity based on Vernier effect[J]. IEEE Sens. J., 2021, 21(19): 21555-21563.

作者简介：

王梓丞(1992—)，男，黑龙江省哈尔滨市人，博士，助理研究员，主要从事光纤惯性传感与系统技术领域的研究。