

基于保偏光子晶体光纤的高性能 光纤激光扭转传感器*

郭玉颖¹⁾ 杜梦珠³⁾ 高炜¹⁾ 王鑫¹⁾ 盛新志²⁾
娄淑琴^{1)†} 廉正刚^{3)‡}

1) (北京交通大学电子信息工程学院, 通信与信息系统北京市重点实验室, 北京 100044)

2) (北京交通大学物理科学与工程学院, 北京 100044)

3) (武汉长盈通光电技术股份有限公司, 武汉 430205)

(2025年7月11日收到; 2025年8月11日收到修改稿)

基于保偏光子晶体光纤提出并构建了一种掺铒光纤激光扭转传感器. 该传感器将基于保偏光子晶体光纤的 Sagnac 干涉仪引入掺铒光纤环形腔中作滤波器和扭转传感器件, 利用光纤激光器线宽窄、信噪比高的优势, 成功实现了高分辨率的光纤扭转传感器. 实验系统研究了激光器的输出特性及扭转响应特性. 研究表明, 该扭转传感器可以实现的最大线性测量范围可达 480° (31.02 rad/m), 最大扭转传感灵敏度为 $0.032 \text{ nm}/(^\circ)$ ($0.5 \text{ nm}/(\text{rad/m})$), 分辨率高达 0.681° (0.06 rad/m). 同时, 在 $20\text{--}95^\circ\text{C}$ 温度变化范围内, 该传感器随温度的变化量仅为 $4\times 10^{-3} \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 温度交叉敏感带来的扭转角度的测量误差仅为 $0.16 (^\circ)/^\circ\text{C}$. 其温度稳定性和温度对扭转角度测量造成的误差分别为现有报道的 $2/73$ 和 $40/333$. 本文提出的光纤激光扭转传感器具有线性响应范围宽、分辨率高、温度稳定性好等显著优势, 在航空航天、医疗微创手术、机械结构形变感知等领域具有巨大的应用潜力.

关键词: 光纤扭转传感器, 光纤激光器, Sagnac 干涉, 温度稳定性

PACS: 06.20.Dk, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.74.20250915

CSTR: 32037.14.aps.74.20250915

1 引言

扭转传感器作为测量物体扭转角度、扭矩或旋转状态的核心器件, 广泛应用于工业监测、交通工程、医疗设备等领域^[1-3]. 光纤扭转传感器凭借其柔性结构、体积小、重量轻以及抗电磁干扰能力强等优势^[4,5], 尤其适用于特殊环境监测及集成系统嵌入. 光纤扭转传感器主要有光纤光栅型^[6-8]、马赫曾德干涉型^[9,10]和 Sagnac 干涉型 (Sagnac interfero-

meter, SI)^[11-14] 光纤扭转传感器, 其中 SI 型光纤扭转传感器凭借其紧凑的结构、高灵敏度、高稳定性、较低的制造复杂度等优势, 成为光纤扭转传感器的主要发展方向. 近年来, 研究者们通过光纤结构和传感器结构的创新, 大幅度提升了 SI 型光纤扭转传感器的性能. 2011 年, 为提高传感灵敏度, Chen 等^[15] 利用侧漏光子晶体光纤构建 Sagnac 扭转传感器, 将扭转传感灵敏度提升至 $0.9354 \text{ nm}/(^\circ)$. 2018 年, Huang 和 Shu^[16] 利用在单模光纤上刻栅的方法构建 Sagnac 扭转传感器, 将扭转传感灵敏

* 国家自然科学基金 (批准号: 12174022) 和北京市自然科学基金 (批准号: 1232028) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: lianzhenggang@yoec.com.cn

度提升至 $3.2562 \text{ nm}/(^{\circ})$. 2020 年, Htein 等^[17] 利用双半圆孔光纤构建了一种 SI 型光纤扭转传感器, 将灵敏度进一步提升至 $5.01 \text{ nm}/(^{\circ})$. 虽然灵敏度有所提升, 但大多数 SI 扭转传感器扭转响应呈现出非线性响应, 从而导致测量范围受限; 同时, 宽半高全宽与低信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 特性也限制了扭转角度的测量分辨率.

掺铒光纤环形激光器 (fiber ring laser, FRL) 具有窄线宽 (line width, LW)、高信噪比等优点^[18], 因此, 构建基于 SI 的掺铒光纤环形激光器的扭转传感器可以有效提升传感器的分辨率, 并增加传感器的线性响应区间以扩大测量范围. 2019 年, Liu 等^[19] 提出了一种基于 SI 的光纤激光扭转传感器, 该传感器的灵敏度为 $0.043 \text{ nm}/(^{\circ})$, 分辨率可达 1.05° , 线性响应范围可达 300° , 由于采用传统保偏光纤构建 SI, 在 $25\text{--}35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 其温度导致最大灵敏度变化量为 $0.003 \text{ nm}/(^{\circ})$. 2025 年, Cao 等^[20] 使用单应力光纤构建 SI, 所搭建的光纤激光扭转传感器最大灵敏度为 $1.97 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$, 分辨率为 $0.015 \text{ rad}/\text{m}$ (使用光纤长度为 55 cm , 对应灵敏度为 $0.0625 \text{ nm}/(^{\circ})$, 分辨率为 4.73°), 但这项工作并没有讨论温度对扭转传感带来的影响. 同年, Ma 等^[21] 用椭圆芯光纤构建 SI, 将光纤激光扭转传感器的扭转灵敏度及分辨率分别提升至 $0.1 \text{ nm}/(^{\circ})$ 和 0.46° , 但该光纤在 $35\text{--}95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内激光峰波长随温度的漂移为 $-0.15 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 温度带来的交叉敏感问题限制了其在极端环境中的应用. 因此, 如何在保证大测量范围、高分辨率的基础上解决温度交叉敏感问题, 仍然是基于 SI 的光纤激光扭转传感器面临的挑战.

本文利用自研的保偏光子晶体光纤 (polarization-maintaining photonics crystal fiber, PM-PCF) 优异的温度稳定性, 提出并构建了一种基于 PM-PCF 的 SI 光纤激光扭转传感器. 由于光纤激光器的 0.05 nm 窄线宽和 40 dB 高信噪比, 该扭转传感器的分辨率可高达 0.681° ($0.06 \text{ rad}/\text{m}$), 同时该传感器能够实现 -260° ($-16.8 \text{ rad}/\text{m}$) 到 220° ($14.22 \text{ rad}/\text{m}$) (共 480° ($31.02 \text{ rad}/\text{m}$)) 的超宽测量范围. 值得强调的是, 该传感器在 $20\text{--}95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内波长漂移量仅为 0.405 nm , 即平均每摄氏度带来的波长漂移量仅为 $4 \times 10^{-3} \text{ nm}$, 平均每摄氏度带来的扭转角度误差仅为 0.16° . 其温度稳定性和温度对扭转角度测量造成的误差分别为现有报道的 $2/73$ 和 $40/333$. 该扭转传感器实现了高分辨率及大测量范围的扭转传感的同时, 有效抑制了温度带来的交叉敏感, 因此, 在航空航天、机器人等需要在特殊环境下精确测量微小扭转运动的场景中有着重要应用价值.

2 传感器的结构及传感原理

本团队自研的 PM-PCF 是基于具有高保偏性能的纯石英光子晶体光纤, 如图 1(a) 所示, 在 1550 nm 波长处其双折射为 5.5×10^{-4} . 与传统 PMF 相比, PM-PCF 具有良好温度稳定性, 其双折射随温度变化为 $5 \times 10^{-8} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ^[22]. 为了抑制温度对扭转传感器性能的影响, 同时提升扭转传感器的分辨率和扩大传感器的测量范围, 利用 PM-PCF 提出了一种基于 SI 的掺铒光纤激光扭转传感器, 传感器的结构示意图如图 1(b) 所示, 基于 PM-PCF 的 SI

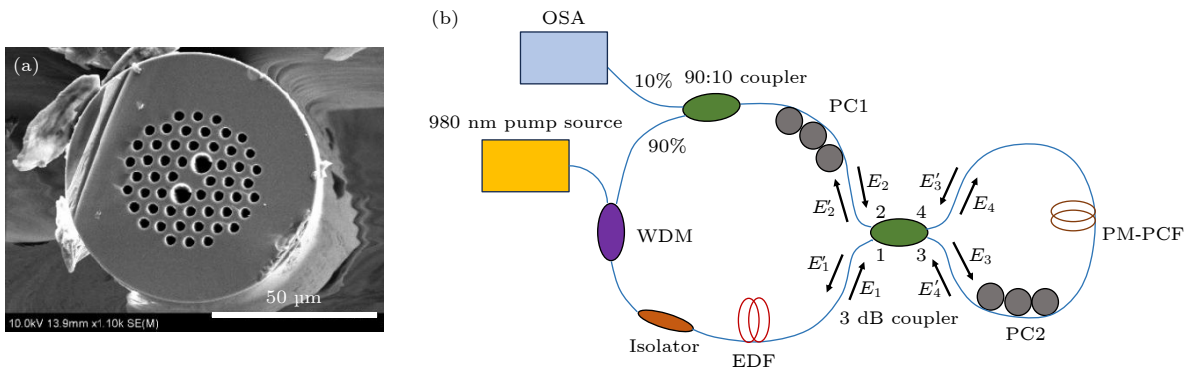


图 1 基于 PM-PCF-SI 的光纤环形激光器 (a) 自研 PM-PCF 扫描电镜端面图; (b) 基于 SI 的掺铒光纤环形激光器原理示意图
 Fig. 1. Fiber ring laser based on PM-PPCF-SI: (a) SEM diagram of the cross section of homemade PM-PCF; (b) schematic diagram of Erbium-doped fiber ring laser based on PM-PCF-SI.

作为激光器中的滤波器,用于激光输出波长的调整,中心波长为 980 nm 的泵浦光通过 980/1550 nm 波分复用器注入环形激光谐振腔. 隔离器可确保激光在腔体中的单向传播,防止反向散射光和寄生激光传回泵浦源. 一段 6.5 m 长的掺铒光纤用作增益介质,在泵浦光的激励下,实现光放大而形成具有平坦的、高增益的增益谱. 偏振控制器 (polarization controller, PC)² 用于优化滤波谱的峰谷比. PC1 用于调节环形腔内光的偏振态,通过引入部分偏振依赖效应,抑制模式竞争,以实现单波长的稳定输出. 激光输出通过 90:10 光纤耦合器的 10% 端口进行提取,经光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA) 进行光谱特性表征. 耦合器剩余的 90% 光功率在谐振腔内维持循环,保障激光的连续稳态输出.

在整个光纤环形激光器系统中,SI 作为滤波器和扭转敏感元件起到了重要作用. 当一束电矢量为 E_1 的入射光从端口 1 入射时,即 $E_1 \neq 0, E_2 = 0$,经过耦合器以后分成两束光,端口 3 处的入射光场 E_3 在 Sagnac 环中逆时针传播,经过 PC 和 PM-PCF 到达端口 4 处时的光场为 E'_3 ,端口 4 处的入射光场 E_4 在 Sagnac 环中顺时针传播,经过 PM-PCF 和 PC 到达端口 3 处时的光场为 E'_4 , E'_3 和 E'_4 分别从端口 4 和端口 3 处返回到耦合器,相干叠加后再从端口 1 反射和端口 2 透射输出,输出光场为 E'_1 和 E'_2 . 应用传输矩阵法可以推得 SI 透射率 T 的输出函数表达式为^[20]

$$T = (1 - 2k)^2 + 4k(1 - k) \sin^2 \theta \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

其中, k 是耦合器的交叉功率耦合比,SI 中常使用的光纤耦合器是 3 dB 耦合器,其 k 值为 0.5. θ 为当一束单色偏振光入射到 PC 后,偏振方向逆时针旋转的角度, $\varphi = 2\pi BL/\lambda$ 为光波在 PM-PCF 中传播时快慢轴两个偏振方向上的分量在传播相同距离时产生的相位差,其中 B 为 PM-PCF 的双折射, L 为 PM-PCF 的长度, λ 为传输波长. 透射谱的谐振峰对应于透射率 T 的极大值,即 $\varphi = 2m\pi$ ($m = 1, 2, 3, \dots$),由此可以计算出第 m 干涉级次谐振峰的波长:

$$\lambda_{\max} = \frac{BL}{m}. \quad (2)$$

因此,可以推导出两个相邻干涉峰间的波长间隔,即自由光谱范围 (free space range, FSR) 为^[23]

$$\text{FSR} = \lambda_{m-1} - \lambda_m \approx \frac{\lambda^2}{BL}. \quad (3)$$

当在 PM-PCF 上施加扭转时,由扭转产生的双折射变化为 ΔB ,则扭转后的谐振峰波长为

$$\lambda_{\max, \Delta\theta} = \frac{1}{m} (B + \Delta B) L. \quad (4)$$

根据上述理论推导,当对 PM-PCF 施加扭转时,在不同扭转角度下的 SI 透射谱,如图 2(a) 所示. 从图 2 可以看出,随着扭转角度从 0° 增至 220° ,SI 透射谱的谐振峰位置逐渐向短波长方向偏移. 在模式竞争过程中,这些谐振峰所在位置,由于具有高的增益,易于产生激光输出,因此随着扭转角度的改变,激光的输出波长也会相应产生偏移. 从图 2(b) 可以看出,谐振峰波长随扭转角度的变化呈现出良好的线性关系,因此输出激光波长也将随扭转角度产生线性变化,从而可以利用基于 SI 的光纤环形激光器实现对扭转角度的测量. 图 2(c), (d) 为实验获得的 SI 透射光谱随扭转角度的变化情况和谐振峰波长随扭转角度的变化,可以看出,对于该扭转传感器的灵敏度、波长偏移趋势及滤波谱的 FSR 及形状,实验和仿真基本一致,但实验中扭转造成的损耗会对滤波谱的强度产生影响.

由于该传感器使用的是线性区间进行传感,因此该传感器的测量范围定义为最大的线性响应区间,该指标依赖于 Sagnac 干涉环输出干涉谱的 FSR.

传感器的波长灵敏度 S 定义为单位扭转角度导致的谐振峰波长偏移量,可以表示为

$$S = \frac{d\lambda_{\max, \Delta\theta}}{d\Delta\theta} = \frac{L}{m} \left(\frac{d\Delta B}{d\Delta\theta} \right) = \frac{\lambda_{\max}}{2m\pi} \left(\frac{d\Delta\varphi}{d\Delta\theta} \right) = \frac{\lambda_{\max}^2}{2BL\pi} \left(\frac{d\Delta\varphi}{d\Delta\theta} \right), \quad (5)$$

其中, $\Delta\varphi$ 为扭转引入的相位差,可以通过以下公式计算^[24]:

$$\Delta\varphi = 2\sin^{-1} \left(\frac{\rho}{\sqrt{1 + \rho^2}} d \sin \gamma \right), \quad (6)$$

$$\rho = \frac{B}{2(\Delta\theta - \alpha)}, \quad (7)$$

$$\gamma = \sqrt{(B/2)^2 + (\Delta\theta - \alpha)^2}, \quad (8)$$

其中, d 为扭转夹具之间的距离, $\alpha = g\Delta\theta$, g 是由材料的弹光系数决定的常数, $\Delta\theta$ 为施加的扭转角度,对于二氧化硅, g 值为 0.08^[15].

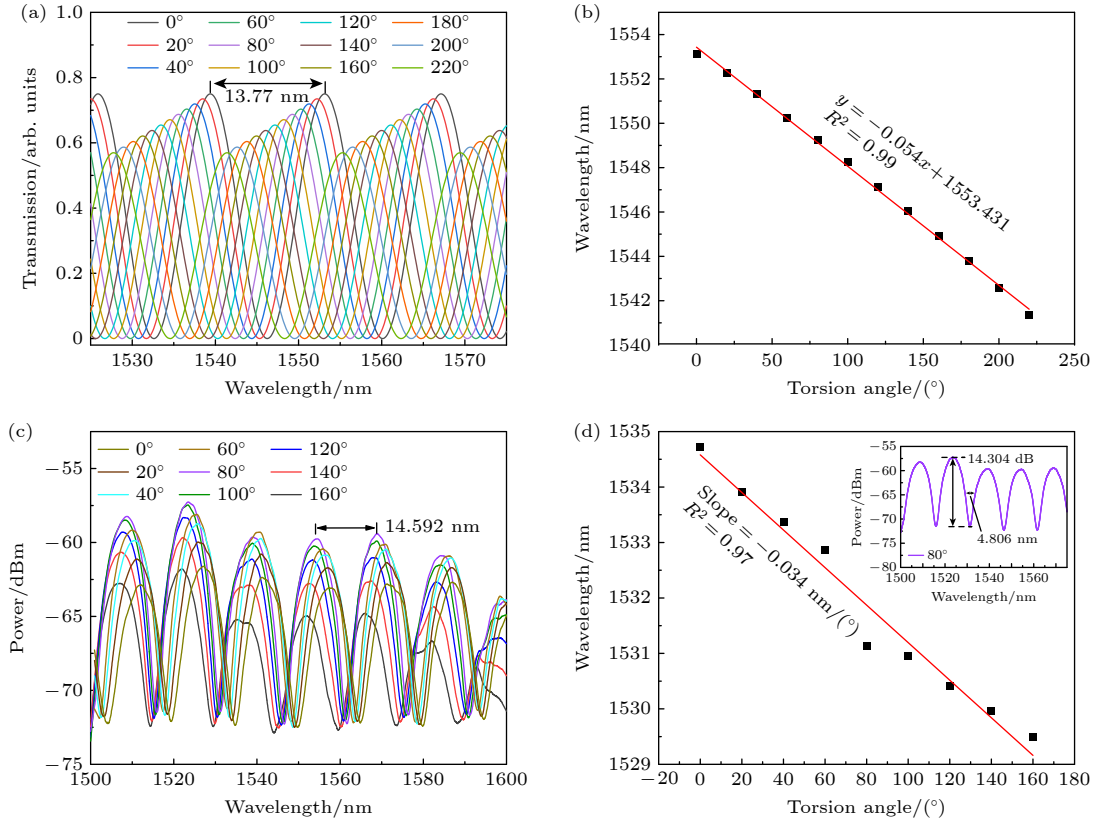


图 2 SI 滤波器的扭转响应光谱 (a) 滤波谱随扭转角度的变化 (仿真); (b) 滤波器谐振峰波长随扭转角度的变化 (仿真); (c) 滤波谱随扭转角度的变化 (实验); (d) 滤波器谐振峰波长随扭转角度的变化 (实验)

Fig. 2. The torsion response spectrum of the SI filter: (a) Variation of the filter spectrum with the torsion angle (simulation); (b) variation of the peak wavelength of the filter with the torsion angle (simulation); (c) variation of the filter spectrum with the torsion angle (experiment); (d) variation of peak wavelength of the filter with torsion angle (experiment).

传感器的分辨率定义为传感装置能够分辨的扭转角的最小变化, 可以通过下式计算^[25]:

$$R = \frac{\sigma}{S} = \frac{3 \times \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_t^2 + \sigma_s^2}}{S}, \quad (9)$$

其中, S 为扭转传感器的扭转灵敏度, σ 是综合考虑振幅噪声 (σ_a)、系统热变化 (σ_t) 和系统设置的光谱分辨率 (σ_s) 计算得出的. 对于输出的激光, 幅值噪声 σ_a 与 LW 和 SNR 有关, 可表示为

$$\sigma_a \approx \frac{LW}{4.5 \times (SNR)^{0.25}}. \quad (10)$$

一般情况下, 在室温下 σ_t 可以忽略, 系统设置的光谱分辨率为 $\sigma_s = R_w / (2 \times \sqrt{3})$, 其中 R_w 为 OSA 的波长分辨率, 故 σ_a 为主要噪声.

3 实验装置与结果

3.1 实验装置及单波长激光输出

根据图 1(b) 所示的原理图, 搭建了一个基于 SI

的光纤激光扭转传感器的实验装置, 如图 3 所示. 激光器采用环形腔构建, 基于 PM-PCF 的 Sagnac 干涉仪作为激光器中的滤波器, 用于激光输出波长的选择, 其中, PM-PCF 两端用旋转器 A 和 B 固定, 旋转器 A 固定, 通过旋转旋转器 B 施加扭转. 为了降低外界环境对激光稳定性的影响, 除了 PC 以外的光纤器件都固定在实验平台上. 输入泵浦光源 (PUMPL-974-600-09-2-1-B) 为 980 nm 泵浦光, 最大输出功率为 600 mW; 输出的激光光谱由 OSA (MS9740A, Anritsu) 采集, OSA 的波长分辨率为 0.02 nm.

在搭建好的实验系统的基础上, 选取 PM-PCF 长度为 27 cm, 在室温 (25 °C) 下, 设置泵浦电流为 320 mA, 调整 PC1 和 PC2, 可以获得稳定的单波长输出, 在 60 min 内每隔 5 min 记录 1 次输出激光光谱, 如图 4(a) 所示. 从图 4 可以看出, 该激光器在波长 1563.45 nm 处, 可以实现稳定的单波长激光输出, 输出激光的最高信噪比为 40 dB, 最窄线宽为 0.05 nm. 图 4(b) 所示为 60 min 内激光

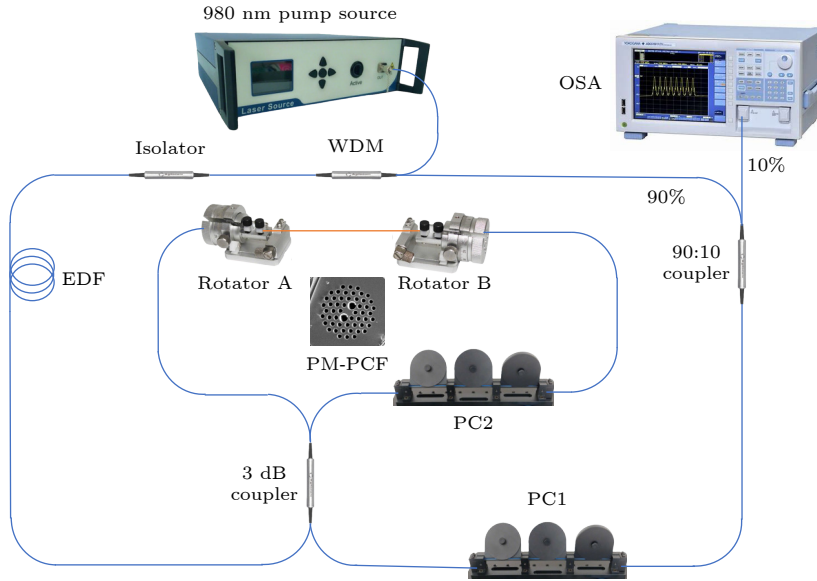


图 3 基于 SI 的激光器扭转传感器实验装置示意图

Fig. 3. Schematic of the experimental device for the laser torsion sensor based on SI.

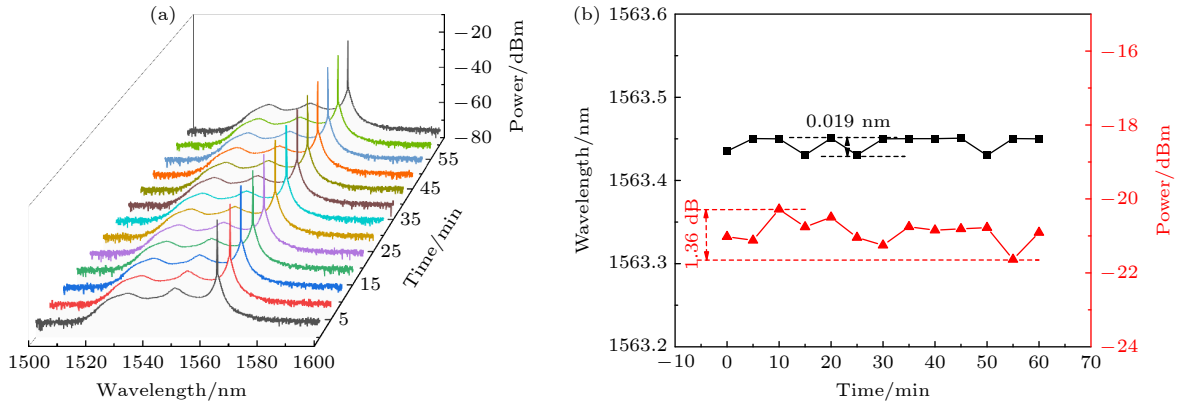


图 4 单波长激光输出及其稳定性 (a) 60 min 内输出激光光谱; (b) 60 min 内激光功率和波长随时间的变化

Fig. 4. Single wavelength lasing output and output stability: (a) Single wavelength lasing output spectrum within 60 min; (b) the variation of laser power and wavelength within 60 mins.

功率和波长随时间的变化. 从图 4(b) 可以看出, 最大波长偏差仅为 0.019 nm, 最大功率波动仅为 1.36 dB. 这意味着该基于 PM-PCF-SI 的光纤环形激光器具有很高的稳定性, 可以用于扭转角度的测量.

3.2 扭转传感响应特性

基于以上高质量的输出激光进行扭转传感实验. 以 20° 为步进将 PM-PCF 沿顺时针 (扭转角度为正值) 方向扭转 160° , 获得基于 PM-PCF-SI 的激光器扭转传感器在不同扭转角度下的输出光谱, 如图 5 所示. 可以看出, 随着施加在 PM-PCF 的扭转角度的增大, 输出激光峰值波长逐渐向短波长方向移动. 通过追踪输出激光波长随扭转角度的变

化, 并进行线性拟合, 可以得到激光输出波长随扭转的响应灵敏度为 $-0.020 \text{ nm}/(^{\circ})$, R^2 为 0.99. 实验结果显示, 通过追踪激光波长随扭转角度的变化, 可以实现扭转角度的测量.

为了实现扭转测量分辨率的提升, 需要对 PM-PCF 的长度进行优化. 图 6 给出在接入不同长度 PM-PCF 时基于 SI 的激光器扭转传感器的输出光谱. 输出激光的初始波长位置可通过调节 PC 进行调整. 在扭转测量过程中, 基于 SI 的激光器扭转传感器输出光谱中存在两条边界线. 长虚线表示的边界 1 对应激光输出的最短波长, 实线表示的边界 2 对应激光输出的最长波长, 短虚线为两个边界之间的输出激光. 输出激光的可调谐波长范围定义为边界 1 和边界 2 之间的波长区间. 从图 6 可看出,

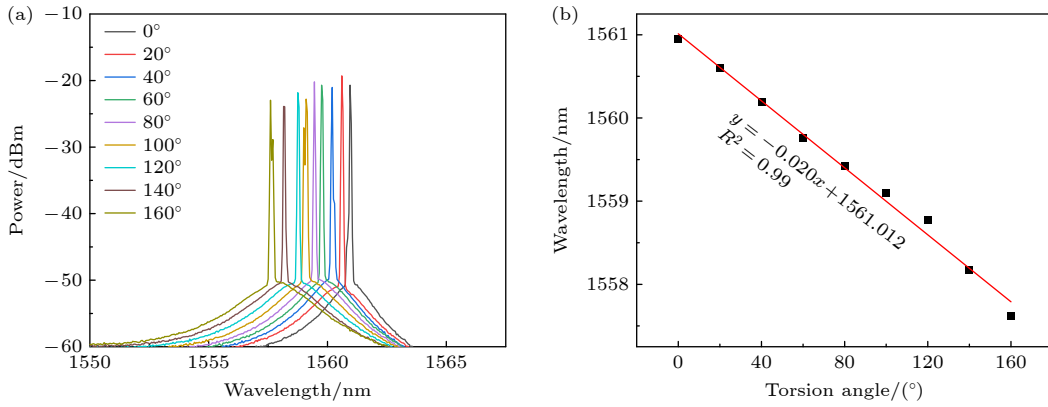


图 5 基于 PM-PCF-SI 的激光器扭转传感器的扭转响应 (a) 不同扭转角度下的激光光谱; (b) 激光波长随扭转角度的变化
Fig. 5. Torsion response of the laser torsion sensor based on PM-PCF-SI: (a) Laser spectra at different torsion angles; (b) the variation of laser wavelength with the torsion angle.

当 PM-PCF 长度分别为 15 cm, 27 cm 和 47 cm 时, 输出激光的可调谐范围分别约为 6.648 nm, 14.520 nm 和 17.013 nm. 可以看出, 激光可调谐范围与滤波器光谱的自由光谱范围之间存在相关性. 激光的可调谐范围被定义为激光能够维持稳定输出的波长范围. 由于模式竞争, 激光器更有可能在增益谱更为平坦的区域实现稳定输出, 而在这些区域之外工作的激光器不能保持稳定的调谐输出. 由于滤波器输出光谱的周期性, 当输出激光位移超过一个 FSR 时, 在初始波长处会产生一个新阶滤波谱峰. 在滤波器输出光谱的两个峰处会产生模式竞争, 输出激光将跃迁到初始位置, 导致可调谐范围接近滤波器输出光谱的 FSR. 这意味着 PM-PCF 的长度会显著影响输出激光的可调谐范围, 从而影响扭转角度的测量范围. 采用较长长度的 PM-PCF (47 cm) 时, 由于传输谱的 FSR 较小, 限制了可调谐波长范围, 从而限制了扭转角的测量范围, 如图 6(a) 所示. 较短的 PM-PCF 长度 (15 cm) 可能导致激光分裂, 如图 6(c) 插图所示, 这不适合精确的扭转角度测量. 这是由于 FSR 过大导致了平坦的干涉谱, 从而引起模式竞争. 另外, 由于 FSR 较大时边界 1 处的滤波谱峰已接近增益谱平坦区域的边界, 不易产生激光, 这也限制了激光峰的可调谐范围. 因此, 在接下来的实验中选择了中等长度 (27 cm) 的 PM-PCF 进行扭转角测量.

基于以上实验得到的较优传感参数即 PM-PCF 长度选择为 27 cm, 接下来对该基于 PM-PCF-SI 的激光器扭转传感器所能实现的最优扭转性能进行研究. 通过调整 PC 将激光峰的输出波长调整至可调谐范围的最右侧, 然后沿顺时针方向对 PM-

PCF 施加扭转, 扭转角度的测量结果如图 7 所示. 从图 7(a) 可以看出, 当沿顺时针方向对 PM-PCF 施加扭转时, 输出激光波长逐渐向短波长方向偏移. 从图 7(b) 可以看出, 输出激光波长随扭转角度的响应呈现良好的线性关系, 即 $R^2 = 0.99$. 因此, 沿顺时针方向施加扭转时, 扭转角度的测量范围为 0° — 280° , 扭转灵敏度为 $-0.028 \text{ nm}/(^\circ)$.

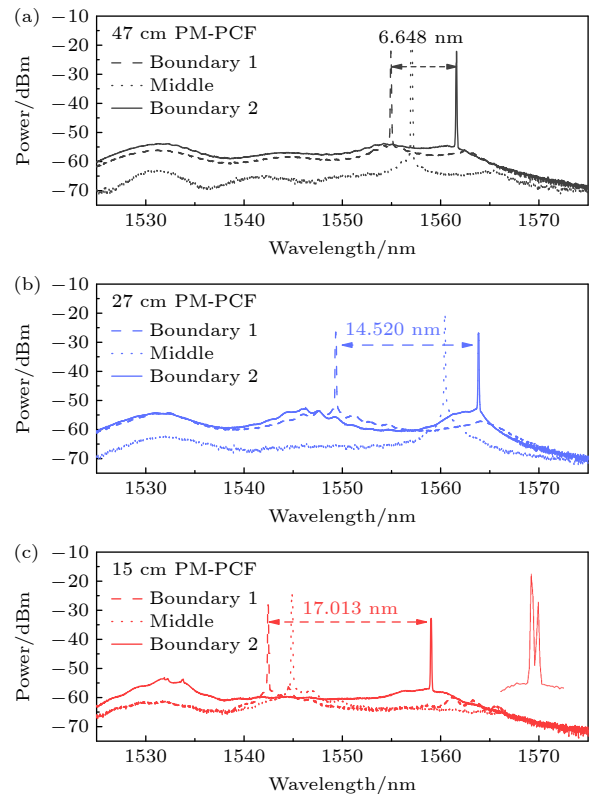


图 6 不同长度 PM-PCF 对应的激光调谐范围 (a) 47 cm; (b) 27 cm; (c) 15 cm
Fig. 6. Corresponding output laser tuning range of different lengths of PM-PCF: (a) 47 cm; (b) 27 cm; (c) 15 cm.

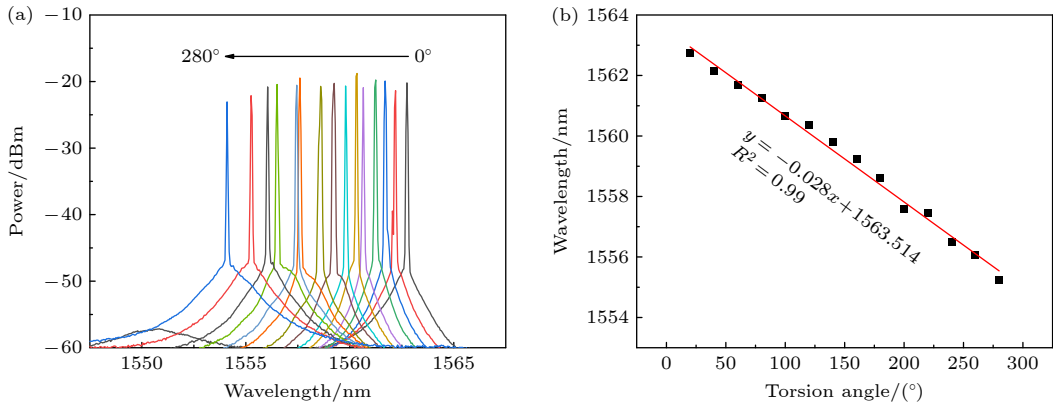


图 7 顺时针施加扭转时, 激光输出波长随扭转角度的变化 (a) 输出激光峰值波长随扭转角度的变化情况; (b) 输出激光波长与扭转角度的关系

Fig. 7. The variation of the lasing wavelength with torsion angle when torsion is applied along clockwise direction: (a) Variation of the output laser wavelength with the torsion angle; (b) the relationship between laser wavelength and torsion angle.

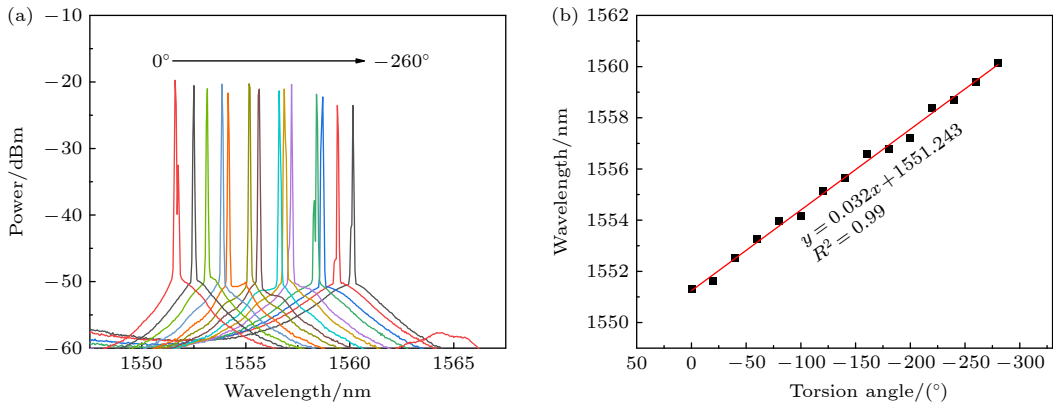


图 8 逆时针施加扭转时, 激光输出波长随扭转角度的变化 (a) 输出激光峰值波长随扭转角度的变化情况; (b) 激光波长与扭转角度的关系

Fig. 8. The variation of the lasing wavelength with torsion angle when torsion is applied along counterclockwise direction: (a) Variation of the output laser wavelength with the torsion angle; (b) the relationship between laser wavelength and torsion angle.

通过调整 PC 将激光峰的输出波长调整至可调谐范围的最左侧, 然后沿逆时针方向对 PM-PCF 施加扭转, 扭转角度的测量结果如图 8 所示。从图 8(a) 可以看出, 当沿逆时针方向对 PM-PCF 施加扭转时, 输出激光波长逐渐向长波长方向偏移。从图 8(b) 可以看出, 输出激光波长随扭转角度的响应呈现良好的线性关系, 即 $R^2 = 0.99$ 。因此, 逆时针施加扭转时, 扭转角度的测量范围为 -260° — 0° , 扭转灵敏度为 $0.032 \text{ nm}/(^{\circ})$ 。

同时, 该扭转传感器可以实现矢量扭转的测量。通过调整 PC 将激光峰的输出波长调整至可调谐范围的中心波长, 可以使输出激光波长随着逆时针扭转方向或顺时针扭转方向变化, 如图 9 所示。从图 9(a) 可以看出, 当 PM-PCF 沿顺时针方向扭转时输出激光波长向短波长方向移动, 扭转角度范围为 0° — 220° 。当光纤沿逆时针方向扭转时输出激

光波长向长波长方向移动, 扭转角度范围为 -260° — 0° 。从图 9(b) 可以看出, 输出激光波长随扭转角度的响应呈现良好的线性关系, 即 $R^2 = 0.98$ 。因此, 该传感器可以实现从 -260° — 220° 范围的矢量扭转测量, 扭转灵敏度为 $-0.024 \text{ nm}/(^{\circ})$ 。由于激光器的激光输出 LW 为 0.05 nm , 信噪比为 40 dB , OSA 的波长分辨率 0.02 nm , 根据 (9) 式可知, $\sigma_a = 4.42 \times 10^{-3} \text{ nm}$, $\sigma_s = 5.77 \times 10^{-3} \text{ nm}$, 取最高灵敏度 $0.032 \text{ nm}/(^{\circ})$, 可得到分辨率为 0.681° 。

4 传感器性能评估

4.1 迟滞性

首先对传感器的迟滞性这一重要指标进行分析。通过调整 PC, 将初始输出激光调整至边界 2, 然后将 PM-PCF 以 20° 的步长从 -260° 扭转至 220° ,

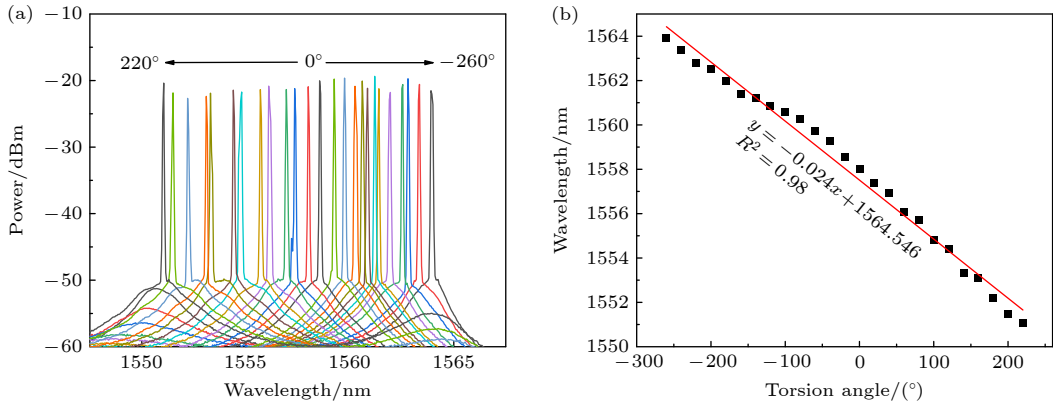


图 9 顺时针及逆时针施加扭转时, 矢量扭转角度的测量 (a) 输出激光峰值波长随扭转角度的变化情况; (b) 激光波长与扭转角度的关系

Fig. 9. Measurement of the vector torsion angle when torsion is applied clockwise and counterclockwise: (a) Variation of the output laser wavelength with the torsion angle; (b) the relationship between output laser wavelength and torsion angle.

并从 220° 返回到 -260°, 以测试该扭转传感器的迟滞性。图 10 展示了测量结果, 可以看出在往复测量的过程中, 输出激光波长保持高度一致性, 平均误差为 7×10^{-3} nm, 最大误差为 0.011 nm, 对应扭转角度测量误差分别为 0.29° 和 0.46°。该结果表明我们制备的扭转传感器在扭转测量方面几乎没有迟滞。这一特性使得该传感器在实际应用场景中, 尤其是针对复杂的往返扭转测量任务, 可以稳定且准确地输出测量结果。

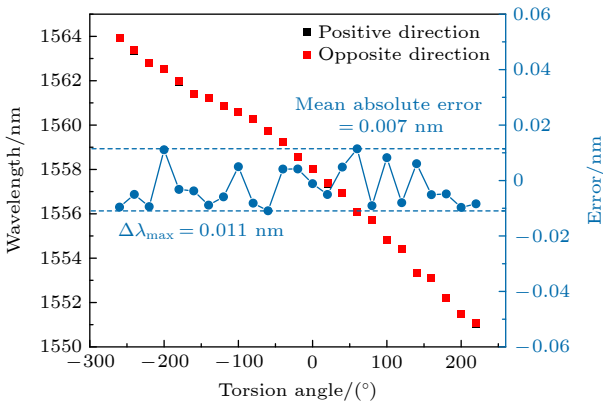


图 10 扭转传感器的迟滞性
Fig. 10. Hysteresis of the torsion sensor.

4.2 温度稳定性

在扭转测量过程中传感器不可避免地会受到外界环境温度的影响, 将该扭转传感器中的传感头部分, 即 PM-PCF 放入水浴加热箱中, 通过调整 PC 将激光输出功率调至最高, 然后将温度从 20 °C 升高至 95 °C, 在此过程中每升高 5 °C 记录一次光谱, 如图 11(a) 所示。从图 11(b) 可以看出, 温度变化

过程中, 输出激光峰波长的最大变化量为 0.405 nm, 因此激光峰波长随温度的变化量为 4×10^{-3} nm/°C, 即温度对扭转角度测量的误差为 0.16 (°)/°C, 与文献 [16] 中报道的温度稳定性 0.15 nm/°C 和温度对扭转角度测量造成的误差 1.5 (°)/°C 相比, 误差

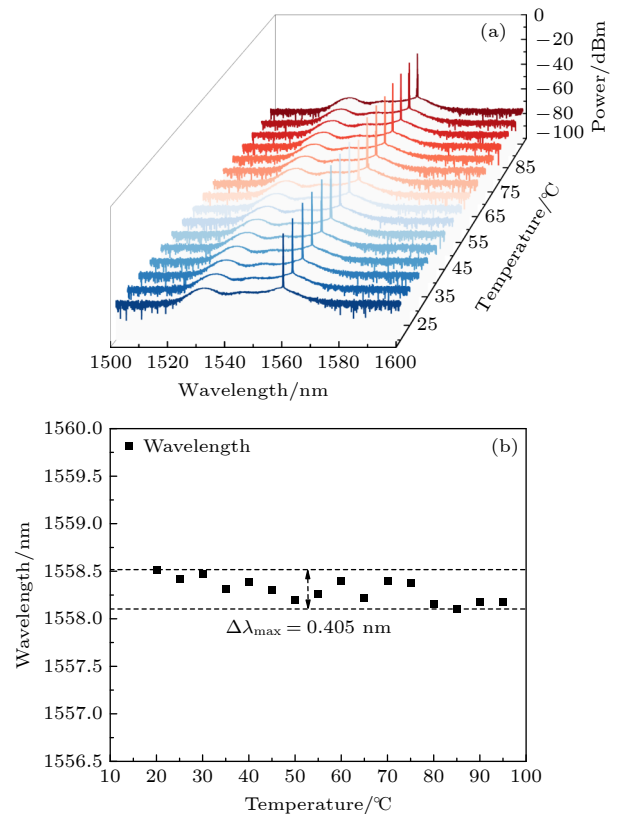


图 11 在 20—95 °C 范围内扭转传感器的温度稳定性 (a) 输出激光光谱; (b) 输出激光波长随温度的波动

Fig. 11. Temperature stability of the torsion sensor in the range from 20 °C to 95 °C: (a) Output laser spectrum; (b) the fluctuation of the output laser wavelength with temperature.

表 1 各类型激光传感器性能对比
Table 1. Performance comparison of various types of laser sensors.

Type	Structures	Linear response range	Sensitivity	Resolution	Direction	Temperature error	Refs.
FRLTS	LPG based FRLRS	47° (-23.5°—23.5°) 200 rad/m (-100—100 rad/m)	0.0062 nm/(°) 0.084 nm/(rad/m)	4.33° 0.12 rad/m	Yes	—	[13]
	PMF based FRLTS	300° (0°—300°)	0.043 nm/(°)	2.45°	Yes	—	[19]
	Side-Polished MZI Fiber based FRLTS	160° (-80°—80°) 11.2 rad/m (-5.6 rad/m—5.6 rad/m)	0.019 nm/(°) 0.27 nm/(rad/m)	—	Yes	—	[23]
	elliptical-core based FRLTS	340° (-340°—0°)	0.1 nm/(°)	0.43°	Yes	1.5°	[21]
	SSAF based FRLTS	380° (-380°—0°) 16.6 rad/m (-16.6 rad/m—0 rad/m)	0.0625 nm/(°) 1.97 nm/(rad/m)	4.73° 0.015 rad/m	Yes	—	[20]
	PM-PCF based FRLTS	480° (-260°—220°) -16.8 rad/m—14.22 rad/m (31.02 rad/m)	0.032 nm/(°) 0.5 nm/(rad/m)	0.681° 0.06 rad/m	Yes	0.16°	This work

分别为文献报道的 2/73 和 40/333. 这是由于我们在 Sagnac 环中采用的高双折射光纤为 PM-PCF, 该光纤采用两种不同尺寸的空气孔获得高双折射, 即通过构建几何不对称结构获得高的双折射, 从而抑制了温度变化对双折射的影响, 有效提高传感器的温度稳定性. 这意味着该传感器具有良好的温度稳定性, 可以抵抗外界环境温度变化带来的交叉敏感问题, 大大提升了传感器的实用性.

表 1 给出了本文提出的传感器与其他相关激光器扭转传感器的比较分析. 本文提出的基于 SI 的激光器扭转传感器实现了 -260°—220°, 共 480° 的最大测量范围. 此外, 与现有报道的激光器扭转传感器相比, 本文所提出的基于 SI 的激光器扭转传感器具有较高的灵敏度 (-0.032 nm/(°)). 当 LW = 0.05 nm, SNR = 40 dB, $R_w = 0.02$ nm 时, 相应分辨率 R 已达到 0.681°. 与基于 PM-PCF 的 SI 传感结构相比, 这一分辨率显著提高了 2 个数量级. 如果采用更高分辨率的 OSA, 扭转测量分辨率还可以进一步提高, 如 (9) 式所示. 最重要的是, 本文提出的传感器实现了最优的温度性能, 在 20—95 °C 输出激光波长随温度的波动量为 4×10^{-3} nm/°C, 即温度对扭转角度测量的误差为 0.16 (°)/°C, 二者误差分别为之前的文献报道的 2/73 和 40/333. 这意味着本文所提出的传感器在不引入其他机制的情况下可以有效抑制温度交叉敏感问题.

5 结 论

本文利用自研的 PM-PCF 提出并构建了一种

基于 SI 的高性能光纤激光扭转传感器, 由于采用具有高温稳定性的 PM-PCF 构建 SI, 作为该传感器的扭转传感元件和滤波器, 有效提升了扭转传感器的分辨率、测量范围和温度稳定性. 实验结果表明, 该传感器的 LW 为 0.05 nm, SNR 为 40 dB, 扭转分辨率可达 0.681°(0.06 rad/m). 此外, 该扭转传感器在矢量扭转测量中实现了从 -260°(-16.8 rad/m) 到 220°(14.22 rad/m), 共 480° (31.02 rad/m) 的最大测量范围. 对传感器的稳定性进行了测试, 结果表明, 在扭转角 -260°—220° 的测量范围内, 往返重复扭转测量的平均绝对误差为 7×10^{-3} nm. 最重要的是, 在 20—95 °C 的温度变化范围内, 输出激光波长随温度的波动量仅为 4×10^{-3} nm/°C, 即温度对扭转角度测量的误差仅为 0.16(°)/°C, 其温度稳定性和温度对扭转角度测量造成的误差分别为文献报道的 2/73 和 40/333. 综上所述, 该扭转传感器具有高分辨率、宽测量范围、高温稳定性等优点, 尤其是在温度稳定性方面具有的巨大优势. 因此, 该扭转传感器在土木工程、航空航天、自动控制、医疗等领域具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Cui J X, Cheng X, Gumawardena D S, Leong C Y, Dash J N, Lau A P T, Tam H Y 2024 *Opt. Laser Technol.* **174** 110548
- [2] Cao J Q, Wang B, Huang B S, Lou S Q, Sheng Z F, Chu P K 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 5743
- [3] López-Higuera J M, Cobo L R, Incera A Q, Cobo A 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 587
- [4] Yin G L, Xu Z, Ma J M, Zhu T 2022 *J. Lightwave Technol.* **41** 1851
- [5] Zheng Y C, Li J J, Liu Y, Li Y, Qu S L 2023 *J. Lightwave*

- Technol.* **42** 2513
- [6] Duan J A, Xie Z, Wang C, Zhou J Y, Li H T, Luo Z, Chu D K, Sun X Y 2016 *Opt. Laser Technol.* **83** 94
- [7] Lin C Y, Wang L A, Chern G W 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1159
- [8] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in Chinese) [朱涛, 饶云江, 莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]
- [9] Ghasemi P, Yam S S H 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 1224
- [10] Yin G L, Fu Q J, Yang P X, Zhu T 2022 *Opt. Laser Technol.* **156** 108461
- [11] Cao J Q, Lou S Q, Huang B S, Gu S, Jia H Q, Sheng X Z, Wang X 2023 *Opt. Fiber Technol.* **80** 103431
- [12] Zhang R W, Liu X J, Shang Q H, Yang J R 2023 *J. Lightwave Technol.* **42** 921
- [13] Shi L L, Zhu T, Fan Y E, Chiang K S, Rao Y J 2011 *Opt. Commun.* **284** 5299
- [14] Lou S Q, Lu W L, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 090701 (in Chinese) [娄淑琴, 鹿文亮, 王鑫 2013 物理学报 **62** 090701]
- [15] Chen W G, Lou S Q, Wang L W, Zou H, Lu W L, Jian S S 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1639
- [16] Huang B, Shu X W 2018 *Opt. Express* **26** 4563
- [17] Htein L, Gunawardena D S, Liu Z Y, Tam H Y 2020 *Opt. Express* **28** 33841
- [18] Lin W H, Shao L Y, Vai M I, Shum P P, Liu S Q, Liu Y B, Zhao F, Xiao D R, Liu Y H, Tan Y D, Wang W Z 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 3350
- [19] Liu X J, Wang F J, Yang J R, Zhang X D, Du X L 2019 *Sensors* **19** 3613
- [20] Cao J Q, Guo Y Y, Gao W, Wang X, Lou S Q, Sheng Z F 2024 *IEEE Sens. J.* **25** 4647
- [21] Ma X K, Lou S Q, Cao J Q, Huang B S 2025 *Infrared Phys. Techn.* **147** 105776
- [22] Guo Y Y, Du M Z, Gao W, Cao J Q, Sheng X Z, Lou S Q, Lian Z G 2025 *Chin. J. Lasers* **52** 1306003 (in Chinese) [郭玉颖, 杜梦珠, 高炜, 曹佳琦, 盛新志, 娄淑琴, 廉正刚 2025 中国激光 **52** 1306003]
- [23] Bo W, Liu B, Liu J, He X D, Yuan J H, Wu Q 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 7779
- [24] Zu P, Chan C C, Jin Y X, Gong T X, Zhang Y F, Chen L H, Dong X Y 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 920
- [25] Chiavaioli F, Gouveia C A J, Jorge P A S, Baldini F 2017 *Biosensors* **7** 23

High-performance fiber ring laser torsion sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fibers*

GUO Yuying¹⁾ DU Mengzhu³⁾ GAO Wei¹⁾ WANG Xin¹⁾ SHENG Xinzhi²⁾
 LOU Shuqin^{1)†} LIAN Zhenggang^{3)‡}

1) (*Key Laboratory of Communication and Information Systems, Beijing Municipal Commission of Education, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

2) (*School of Physical Sciences and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

3) (*Yangtze Optics Electronics Co., Wuhan 430205, China*)

(Received 11 July 2025; revised manuscript received 11 August 2025)

Abstract

Torsion information is important for rotating systems, industrial monitoring, transportation engineering, and medical equipment. Optical fiber torsion sensors have significant advantages, such as immune to electromagnetic interference, small size, and light weight. Sagnac loop interferometer (SI) torsion sensors have attracted much attention due to their compact structure, high sensitivity, excellent stability, and low cost. However, their nonlinear response limits the measurement range, while the wide full width at half maximum and low signal-to-noise ratio (SNR) reduce the resolution of torsion sensors. To solve these problems, a fiber ring laser torsion sensor (FRLTS) based on homemade polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) is proposed in this work. The torsion sensor introduces a PM-PCF based SI into the erbium-doped fiber ring cavity as a filter and torsion sensor device. The interference spectrum of SI is derived by the transmission matrix method and simulated, and then the sensing principle of the sensor is obtained. Subsequently, the experimental system is set up to study the lasing output characteristics and torsion response of the FRLTS. By taking advantage of the narrow linewidth and high signal-to-noise ratio (SNR) of fiber ring lasers, a high-resolution fiber torsion sensor is successfully obtained. The experimental results show that the maximum linear torsion measurement range of the sensor can be extended to 480° (from -260° to 220°), the maximum torsion sensitivity is $0.032 \text{ nm}/(^\circ)$, and the resolution is as high as 0.681° . Furthermore, in a temperature range from 20°C to 95°C , the temperature-induced wavelength variation is only $4 \times 10^{-3} \text{ nm}/^\circ\text{C}$, corresponding to a torsion angle measurement error of $0.16(^\circ)/^\circ\text{C}$. Compared with existing reports, its temperature stability is increased by 37.5 times, while the temperature-induced error in angle measurements is reduced by 9.375 times. The proposed FRLTS not only successfully achieves high-resolution and wide-range torsion sensing, but also effectively suppresses cross-sensitivity caused by temperature. Therefore, the torsion sensor has significant potential applications in fields such as aerospace and robotics where precise measurement of minute torsion angle is required in special environments.

Keywords: fiber torsion sensor, fiber laser, Sagnac loop interferometer, temperature stability

PACS: 06.20.Dk, 07.05.Fb

DOI: [10.7498/aps.74.20250915](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250915)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250915](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250915)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12174022) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 1232028).

† Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: lianzhenggang@yoec.com.cn

基于保偏光子晶体光纤的高性能光纤激光扭转传感器

郭玉颖 杜梦珠 高炜 王鑫 盛新志 娄淑琴 廉正刚

High-performance fiber ring laser torsion sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fibers

GUO Yuying DU Mengzhu GAO Wei WANG Xin SHENG Xinzhi LOU Shuqin LIAN Zhenggang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 200602 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250915

CSTR: 32037.14.aps.74.20250915

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250915>

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

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>

纯四次孤子光纤激光器研究进展

Research progress of pure quartic soliton fiber laser

物理学报. 2023, 72(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230868>

CaZrO₃改性(Na, K)NbO₃基无铅陶瓷电学性能的温度稳定性

Temperature-stable electrical properties of CaZrO₃-modified (Na, K)NbO₃-based lead-free piezoceramics

物理学报. 2021, 70(19): 197701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210440>

基于级联跃迁的2.8 μm低掺铒氟化物光纤激光器数值分析与优化

Numerical analysis and optimization of 2.8 μm lightly-erbium-doped fluoride fiber laser based on cascaded transition

物理学报. 2023, 72(22): 224205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230903>

多孤子和类噪声脉冲共存的锁模光纤激光器

Mode-locked fiber laser with coexistence of multiple solitons and noise-like pulses

物理学报. 2022, 71(13): 134205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220250>

烧结Nd_{25.5}Dy_{6.5}Co₁₃Fe_{bal}M_{1.05}B_{0.98}磁体温度稳定性和力学性能研究

Study on temperature stability and mechanical properties of sintered Nd_{25.5}Dy_{6.5}Co₁₃(Fe, M)_{bal}B_{0.98} magnet

物理学报. 2023, 72(7): 077502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222045>