

# 控制与决策

Control and Decision

## 光纤激光腔内的传感技术研究进展

程同蕾, 曲雨晗, 刘伟, 周雪, 尹智远, 闫欣, 张学楠, 王方

引用本文:

程同蕾, 曲雨晗, 刘伟, 周雪, 尹智远, 闫欣, 张学楠, 王方. 光纤激光腔内的传感技术研究进展[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2253–2264.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0309>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无人系统视觉SLAM技术发展现状简析

A survey of visual SLAM in unmanned systems

控制与决策. 2021, 36(3): 513–522 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1149>

#### 基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

控制与决策. 2021, 36(4): 947–952 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

#### 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

#### 基于超级节点的分布式传感器节点定位算法

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes

控制与决策. 2020, 35(12): 2898–2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

#### 基于操作风险的双模式传感器管理方法

A dual-mode sensor management method based on operational risk

控制与决策. 2020, 35(12): 2993–2998 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541>

# 光纤激光腔内的传感技术研究进展

程同蕾<sup>1,2</sup>, 曲雨晗<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 周雪<sup>1,2</sup>, 尹智远<sup>1,2</sup>, 闫欣<sup>1,2</sup>, 张学楠<sup>1,2</sup>, 王方<sup>1†</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819;

2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

**摘要:** 光纤激光腔内的传感技术已广泛应用于温度、应变、声波、振动、磁场和电压等物理量的检测, 与传统的光纤传感器相比, 光纤激光传感器具有抗电磁干扰、窄线宽和高信噪比等优势, 其应用前景广阔. 在此, 综述激光腔内光纤传感技术的研究进展, 阐述环形腔和线性腔两种不同的腔内结构, 总结基于不同腔内结构光纤激光传感器的工作原理; 此外, 按照温度、溶液、磁场、应力/应变的分类对光纤激光传感器性能进行介绍, 并对未来的应用前景进行展望.

**关键词:** 激光; 光纤传感; 干涉; 光纤光栅

中图分类号: O439

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0309

引用格式: 程同蕾, 曲雨晗, 刘伟, 等. 光纤激光腔内的传感技术研究进展[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2253-2264.

## Research progress of sensing technology in fiber laser cavity

CHENG Tong-lei<sup>1,2</sup>, QU Yu-han<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Xue<sup>1,2</sup>, YIN Zhi-yuan<sup>1,2</sup>, YAN Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xue-nan<sup>1,2</sup>, WANG Fang<sup>1†</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The sensors based on fiber laser cavity have been widely used in the detection of temperature, strain, sound wave, vibration, magnetic field, voltage and other physical quantities, and compared with traditional optical sensors, fiber laser sensors have the advantages of anti-electromagnetic interference, narrow line width and high signal-to-noise ratio, so they have broad application prospects. This paper reviews the research progress of sensing applications in fiber laser cavities. Ring cavity and linear cavity are described, and the working principles of fiber laser sensors based on different cavity structures are summarized; in addition, according to the classification of temperature, solution, magnetic field and stress/strain, the performance of fiber laser sensors are introduced, and the future application prospect is prospected.

**Keywords:** laser; optical fiber sensing; interference; fiber Bragg grating

## 0 引言

随着光纤传感技术的迅速发展, 多种类型的光纤传感器已广泛应用于军事、航天航空、能源环保、工业控制、医药卫生、计量测试、安全监测等领域<sup>[1-6]</sup>. 在实际测量中, 由于带宽较宽、信噪比低以及制备工艺粗糙, 导致光纤传感器精确性较差、损耗较高, 这些问题降低了光纤传感器的性能, 严重影响了其应用. 为了解决上述问题, 基于腔内的光纤激光传感器 (fiber laser cavity sensing, FLCS) 得到迅速发展. FLCS 由光纤激光器、激光检测器和测量电路组成. 与传统光纤传感器相比, FLCS 可以实现无接触远距离测量, 且速度快、精度高、抗光电干扰能力强. 同时, 由于

光纤激光传感器具有超窄线宽、高边模抑制比的特点, 可有效提高传感器的灵敏度和信噪比. 基于以上优势, FLCS 已经被广泛应用于折射率、温度、应变、磁场等测量领域<sup>[7-13]</sup>. 对于上述参数的测量, FLCS 主要通过环形腔或线性腔中, 利用干涉、光纤光栅、散射等方式进行实现<sup>[14-16]</sup>. 本文介绍了激光腔的典型结构及传感原理, 并将各参数测量分类进行举例说明, 最后对光纤激光传感器的发展进行展望. 在第1节中分别按照腔内结构和传感原理的分类方式进行阐述. 第2节中介绍基于温度、溶液、磁场、应力/应变测量的 FLCS, 并简述实验结果和优缺点. 在第3节中对 FLCS 进行简要总结和展望.

收稿日期: 2023-03-20; 录用日期: 2023-05-17.

基金项目: 辽宁省科技计划项目 (ZX20220535); 辽宁省应用基础研究计划青年专项 (2023JH2/101600047).

责任编辑: 刘腾飞.

†通讯作者. E-mail: wangfang@ise.neu.edu.cn.

# 1 激光腔内光纤传感工作原理

基于激光腔内的光纤传感技术可根据腔内结构大体分为环形腔和线性腔. 根据传感原理分为干涉型传感器、光纤光栅型传感器和散射型传感器. 下面按照以上分类对光纤激光传感的工作原理进行总结.

## 1.1 基于腔内的光纤激光传感器

### 1.1.1 基于环形腔的光纤激光传感器

基于环形腔的光纤激光传感器 (fiber ring laser sensing, FRLS) 的典型结构由泵浦源、波分复用器、增益光纤、隔离器、传感结构、耦合器和光谱仪组成, 如图1所示.

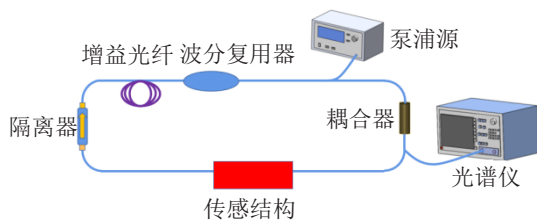


图1 环形腔光纤激光传感器

典型的环形腔激光器由泵浦源 (laser diode, LD) 提供激光, 经波分复用器 (wavelength division multiplex, WDM) 对光路进行整合, 增益光纤对光路进行放大, 隔离器 (isolater, ISO) 使光路进行单向运转, 利用耦合器 (optical circulator, OC) 将光路进行耦合, 当光路在环形腔中循环后, 输出光谱将由光学光谱分析仪 (optical spectral analyzer, OSA) 记录. 传感结构主要包括干涉型传感器、光纤光栅型传感器、散射型传感器以及多种原理共同作用的混合传感器. FRLS 的原理是当传感结构接入环形腔, 泵浦源发射的激光通过增益光纤后发生受激辐射, 产生尖峰状的连续光, 从而激光的中心波长根据外界环境改变而变化<sup>[17]</sup>. 图2显示了放大自发辐射与环形腔内的光纤激光光谱之间的比较<sup>[17]</sup>, 比较结果再次表明, 采用激光腔内的光纤传感器具有窄线宽、高信噪比、抗干扰能力强等优点.

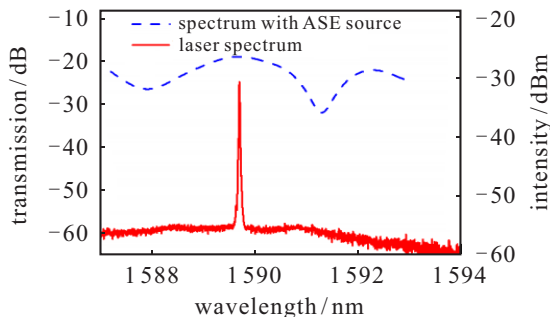


图2 放大自发辐射源和激光光谱的光谱比较

### 1.1.2 基于线性腔的光纤激光传感器

线性腔大多数由放大自发辐射光源发射光后进入传感装置, 再通过光谱仪观察光谱变化. 这种传统的传感器信噪比低, 3 dB 带宽大. 由于传统的传感器存在以上缺点, 基于线性腔的光纤激光传感器在传感检测领域被广泛研究. 图3是基于线性腔的光纤激光传感器. 由LD发射激光, 反射镜用于在线性腔内对光路进行反射, 形成光路循环. WDM在光路进行汇合后进入增益光纤对光路进行放大, 通过OC, 一端进入传感结构, 另一端在OSA上观测光谱. 线性腔体设计的优势在于信号在腔内的往返, 使线性腔中的激光器具有更大的功率, 这提高了激光器的信噪比, 有利于提高光纤传感器的检测极限<sup>[18]</sup>.

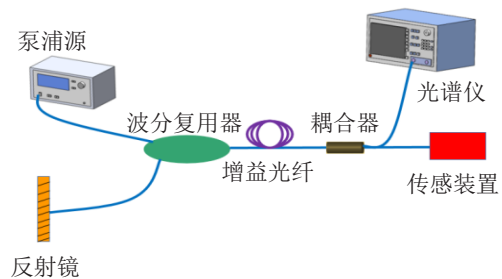


图3 线性腔光纤激光传感器

## 1.2 基于传感原理的光纤激光传感器

### 1.2.1 基于干涉原理的光纤激光传感器

干涉型传感结构主要分为马赫-曾德尔干涉型 (Mach-Zehnder interferometer, MZI)、法布里-珀罗干涉型 (Fabry-Perot interferometer, FPI) 和塞格纳克干涉型 (Sagnac). 其中 MZI 传感器是使用最广泛的光纤传感器之一, 它的工作原理是由两束光之间发生干涉所形成. 来自光源的光被分成两束, 并通过不同的路径进行传播, 当两个光束在某一点处耦合时, 它们将彼此发生干涉. 典型的光束传播路径图如图4所示<sup>[19-21]</sup>.

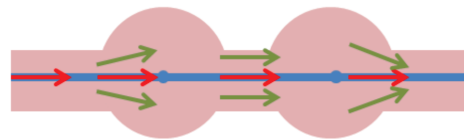


图4 MZI光束传播路径

光在两条路径上传播的长度及周围环境的不同, 造成干涉光场的不同, 从而产生相位的变化. 进一步分析相位差, 可以确定对所研究参数的影响. 干涉强度表达式为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta. \quad (1)$$

其中:  $I_1$  和  $I_2$  分别是两束干涉光的强度;  $\theta$  是两个光

束的相位差,表达式为

$$\theta = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (2)$$

$\Delta n_{\text{eff}}$ 是纤芯模和包层模的有效折射率之差, $L$ 是结构中分路器和合路器之间的光纤长度, $\lambda$ 是波长.因此,包层模与纤芯模第 $m$ 级干涉极小值处的波长为

$$\lambda_{\text{dip}} = \frac{2L\Delta n_{\text{eff}}}{2m+l}. \quad (3)$$

2016年,Li等<sup>[22]</sup>提出了一种基于环形腔内多径马赫-曾德尔干涉仪(m-MZI)的光纤激光传感器.该传感结构由单模光纤与四芯光纤熔接而成,将其插入光纤环形激光腔中充当带通滤波器和传感结构.由于在光纤中嵌入了多径干扰配置,与MZI相比,该传感器可以获得更高的相位灵敏度.

2018年,Zhang等<sup>[23]</sup>成功地研发了一种基于环形激光腔的氢气浓度传感器.如图5所示,该传感器利用1560 nm波段的环形腔,采用涂覆Pd/WO<sub>3</sub>薄膜的单-多-单典型MZI干涉结构作为传感结构.通过氢气浓度由低到高的改变,实现中心波长的蓝移,最终达到1.23 nm/%的高灵敏度和0.017%的检测极限.

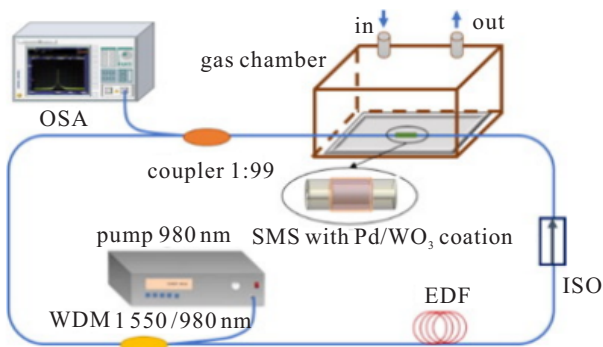


图5 检测氢气浓度环形激光传感器

FPI传感器是由两块平行且内表面具有高反射率的玻璃板组成的多光束干涉仪.入射光在玻璃板之间进行多次反射和折射,从而产生多束相干反射光和透射光.透射光束在透镜的表面上叠加,形成等倾圆环状干涉条纹.常见的FPI传感器的制作方式主要有光纤熔接、镀膜、激光刻蚀、化学蚀刻等<sup>[24-27]</sup>.典型的FPI原理如图6所示.

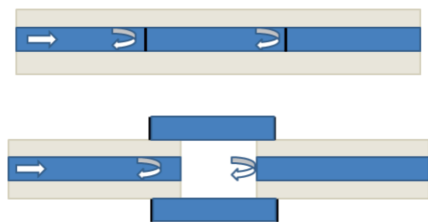


图6 FPI原理

与典型的MZI传感器相比,FPI传感器更容易集

成化,并且可以通过简单的装置获得相对更高的灵敏度<sup>[28]</sup>.但与MZI传感器的缺点相同,使用具有宽带的工作光谱放大自发辐射光源,难以提高其测量精度,而低信噪比也限制了传感器的遥感能力.为了解决上述问题,激光式FPI传感器被广泛研究.

2017年,Shi等<sup>[29]</sup>提出了一种基于FPI的腔内湿度传感器.传感器利用FPI在不同湿度下的反射损耗对光纤激光器的输出功率进行调制,从而感受到腔内湿度的变化.实验结果表明,在3 dB带宽较窄和信噪比较高的情况下,传感器的湿度灵敏度可达到0.202 dB/%RH.此外,该传感器还展现了出色的远程湿度检测能力,表现出快速的时间响应和良好的稳定性.为了更好地让读者理解传感器的结构和原理,提供如图7所示的参考图示.

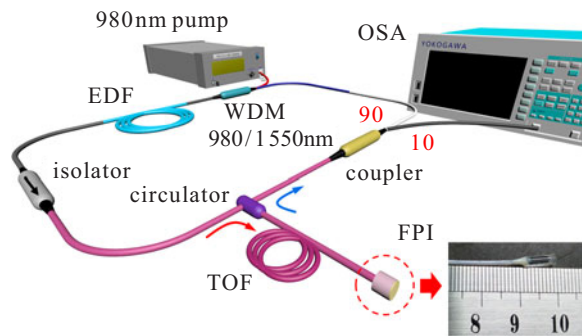


图7 环形腔内光纤激光湿度检测装置

Sagnac传感器的工作原理是将同一光源发出的光分解为两束,使其在同一个环路内沿相反方向循行一周后会合,从而产生干涉.当在环路平面内有旋转角速度时,屏幕上的干涉条纹将会发生移动.典型的Sagnac为光纤环结构,如图8所示.

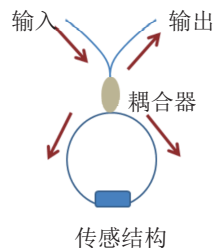


图8 Sagnac传感器

Sagnac的输出<sup>[30-31]</sup>可以描述为

$$I = \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi BL}{\lambda}\right)}{2}. \quad (4)$$

其中: $B$ 是从双折射光纤的快轴到慢轴的折射率变化, $L$ 是双折射光纤的长度, $\lambda$ 是自由空间光束的波长.

2016年,Shi等<sup>[32]</sup>提出了一种基于反射Sagnac环的光纤环形温度传感器.反射Sagnac环用作滤波

器和传感头进行温度检测,其温度灵敏度为1.739 nm/°C,带宽小于0.05 nm,信噪比接近50 dB,其结构如图9所示.

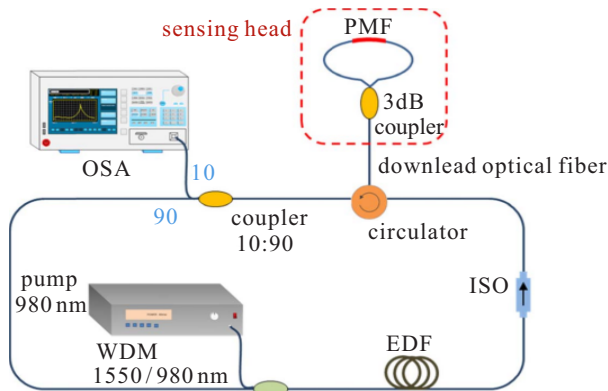


图9 基于Sagnac环的光纤环形温度传感器

### 1.2.2 基于光纤光栅的光纤激光传感器

光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 是指使纤芯的折射率发生轴向周期性调制而形成的衍射光栅,是一种无源滤波器件. FBG具有体积小、熔接损耗小、全兼容于光纤、能埋入智能材料等优点,并且FBG的谐振波长对温度、应变、折射率、浓度等外界环境比较敏感,因此在光纤传感领域得到了广泛的应用<sup>[33-37]</sup>. 在众多的FBG中,布拉格FBG是最常见的传感结构. 反射波长满足布拉格波长 $\lambda_B$ ,有

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (5)$$

其中: $\lambda_B$ 为布拉格波长, $n_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅间距. 由于有效折射率与周围环境有关,外部折射率的变化会引起布拉格波长的偏移. 由式(5)可以得出,无论纤芯的有效折射率还是光栅周期发生变化,即由光纤的伸长引起的任何变化都会造成共振波长的偏移. 因此,环境温度和应变都影响布拉格波长,用公式描述为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon + [(1 - P_e)\alpha + \xi]\Delta T. \quad (6)$$

其中: $\varepsilon$ 为外加应变, $\Delta T$ 为温度变化, $P_e$ 为光纤的光弹性常数, $\alpha$ 为光纤的热膨胀系数, $\xi$ 为热光系数. 这个方程表示了应变和温度对布拉格FBG的影响.

2020年, Jaharudin等<sup>[38]</sup>提出基于线性腔的布拉格FBG光学温度传感器,由布拉格FBG作为温度检测的传感结构. 当温度从25°C升高到55°C时,激光波长从1550.168 nm线性移动到1550.524 nm,灵敏度为11.7 pm/°C,3 dB带宽为0.024 nm,信噪比为55 dB. 实验装置如图10所示.

另外,啁啾FBG、倾斜FBG、长周期FBG等不同种类的FBG也被设计用于实现各类参数的监测.

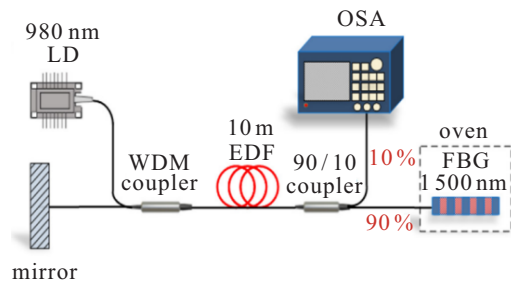


图10 基于线性腔光纤激光温度传感器

2021年, Fukushima等<sup>[39]</sup>提出了一种利用级联啁啾长周期FBG作为波长选择滤光片的新型可调谐掺铒光纤环形激光器,如图11所示. 采用可变光衰减器作为腔内损耗调制器,以改变振荡波长并扩大调谐波长范围. 在测温实验中,实现了12.85 nm波长范围内的激光振荡,相比之前提出的激光器,扩大了3倍以上的调谐范围,具有较大的研究意义.

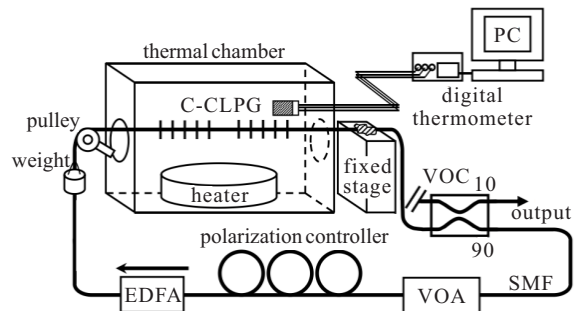


图11 使用C-CLPG滤光片的可调谐的EDFRL

### 1.2.3 基于散射型的光纤激光传感器

散射是指当传播介质不均匀时,光会向周围的各个方向进行传播. 当光在折射率分布不均匀的光纤中传播时会发生散射. 散射主要分为布里渊散射、拉曼散射、瑞利散射,3种散射的光频谱如图12所示<sup>[40-42]</sup>.

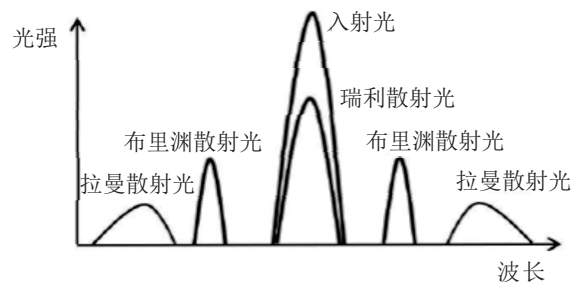


图12 3种散射的光频谱

布里渊散射是指当光在光纤中传播时,光纤内的声学声子与光子进行了能量的交换所形成的散射现象<sup>[43]</sup>. 布里渊散射的光强会受到外界环境参数变化的影响,因此布里渊散射可以应用在温度测量领域和应变测量领域. 拉曼散射是光在光纤中传播时,光纤内分子的热运动与光子进行能量交换,从而形成的

散射现象. 由于拉曼散射光中的反斯托克斯光强度对温度敏感, 拉曼散射也广泛应用于温度测量的领域. 瑞利散射是指光在光纤传播的过程中, 光子与光纤介质内的分子或者原子发生碰撞产生位移导致光纤结构中存在微观折射率的不均匀性, 从而形成的散射现象<sup>[42]</sup>. 然而入射光和光纤介质内的粒子发生弹性散射, 光子的能量不发生改变. 在光纤存在的散射现象中, 若无受激放大, 瑞利散射产生的光强是最强的, 且散射光与入射光的频率相同. 瑞利散射光对振动十分敏感, 可以用来检测振动变化.

2000年, Lecoecuche等<sup>[44]</sup>报告了一种基于光纤中自发布里渊散射的分布式温度测量装置. 他们开发了一种锁模布里渊光纤环形激光器, 利用其产生反向散射信号来检测所需的双频源. 这种相对简单的系统能够以7 m的空间分辨率测量超过20公里的温度.

## 2 激光腔内传感应用研究进展

本节主要利用上节所提到的传感原理进行各参数测量方法的阐述, 主要从温度、溶液、磁场、应变/应力方面进行说明.

### 2.1 温度传感

光纤温度传感器是光纤传感中的重要参数测量方向, 基于光纤自身具有体积小、耐腐蚀、抗干扰能力强等优点, 其与传统温度传感器相比具有优势. 此外, 光纤激光还具有稳定性强、信噪比高等特点, 这使光纤激光温度传感器得以发展. 近年来, 对于光纤激光温度传感器的使用越来越广泛, 在追求功能的基础上, 更加追求高灵敏度、简洁的操作以及多通道测量路径.

2011年, Pinto等<sup>[45]</sup>提出了一种简单的光纤激光温度传感器, 该传感器由分布式反射镜和FPI组合形成. FPI作为激光器的反射镜以及温度传感结构, 具有双重功能, 如图13所示. FPI是将单模光纤拼接至约500 μm的悬浮芯光子晶体光纤形成的. 该光纤激

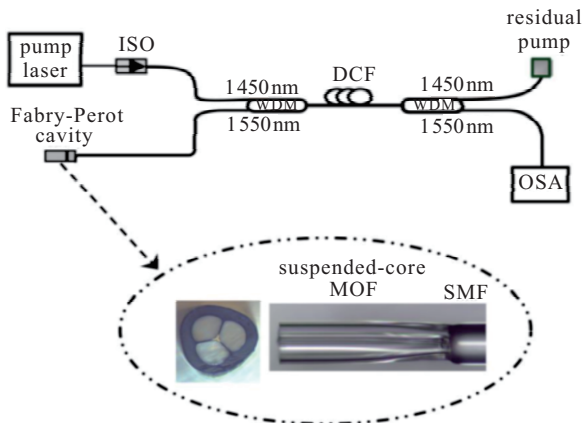


图13 基于FPI的温度传感器

光温度传感器最大输出功率约为2.7 mW, 并且实现了在2000 °C范围内约为6 pm/°C的温度灵敏度. 这项工作所展示的温度灵敏度比前期类似的FPI传感器更高, 为未来FPI传感器提供了新的研究方向.

2015年, Martinez-Rios等<sup>[46]</sup>提出一种基于浸没在甘油/水溶液中的腔内激光温度传感器, 传感结构由双锥光纤MZI组成, 并作为光纤滤波器. 经过实验验证该传感器的灵敏度为1089 pm/°C, 信噪比为50 dB, 适合于实际应用. 这种温度测试方法虽然在灵敏度、温度和波长操作范围之间存在差异, 但结构简单、操作方便, 并且还有其他分散特性的液体可以被探索, 具有广泛的研究前景.

2019年, Madry等<sup>[47]</sup>实现了同时测量温度和相对湿度的双波长FRLS. 如图14所示, 该传感器利用布拉格FBG实现双参数测量, 其中一个布拉格FBG涂有聚酰亚胺, 以实现相对湿度的检测, 另一个裸露的布拉格FBG用于温度传感. 实验结果表明, 聚酰亚胺涂层的FBG对相对湿度和温度的灵敏度为3.6 pm/% RH和12.15 pm/°C, 裸布拉格FBG的温度灵敏度为9.6 pm/°C. 该传感器的灵敏度虽然较低, 但主要优点是光信噪比高于55 dB, 同时3 dB带宽小于0.02 nm, 这为精确传感和远程探测提供了新思路, 并提供了多通道测量的新方法.

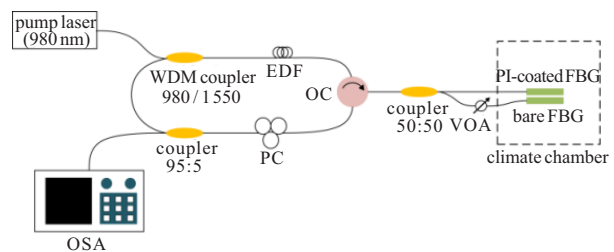


图14 基于FBG的温、湿度测量结构

为了进一步扩大传感器在温度领域的应用, 2021年, Lin等<sup>[48]</sup>提出了一种基于级联Sagnac光纤结构的温度FRLS, 并进行了如图15所示的实验验证. 传感结构由级联Sagnac环组成, 并利用双折

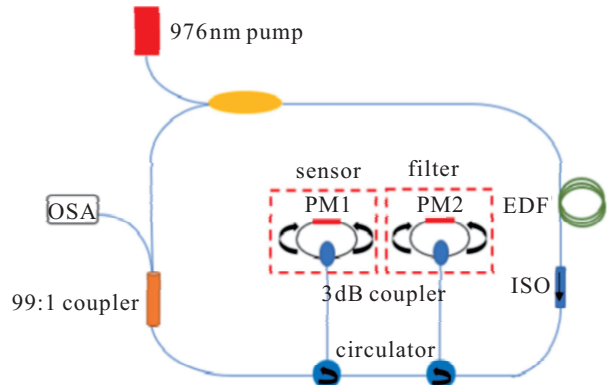


图15 具有级联Sagnac的FRLS

射效应引起相移来提高灵敏度. 通过构造游标效应, 该传感器在 25°C 到 31°C 内的检测灵敏度达到了  $-4.031 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 是基于单 Sagnac 环形传感器的 5 倍. 该技术为光纤温度传感器的应用提供了新的解决方案, 并有望在相关领域发挥重要作用.

2022 年, Guo 等<sup>[49]</sup> 利用飞秒激光技术制造了一种集成超短 II 型 FBG, 如图 16 所示. 该 FBG 长度仅为  $80 \mu\text{m}$ , 由 6 个相同的 FBG 在同一截面上的不同径向位置平行嵌入纤芯组成. 该器件通过双波长差分检测实现了线性的高温测量范围, 可达 25°C 到 1000°C. 所提出的集成超短 II 型 FBG 可用于大规模光纤传感器网络, 特别是在将来高空间分辨率的分布式温度测量中具有广泛的应用前景.

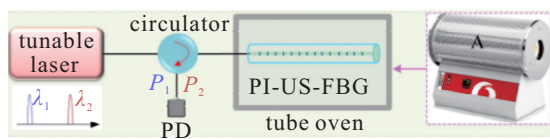


图 16 集成超短 II 型 FBG 测高温检测装置

近年来, 对于光纤激光温度传感器的参数对比如表 1 所示.

表 1 光纤激光温度传感器参数对比

传感结构	灵敏度	范围/ $^\circ\text{C}$	信噪比
法布里-珀罗干涉仪 <sup>[45]</sup>	$6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$	50 ~ 450	
马赫-曾德尔干涉仪 <sup>[46]</sup>	$1089 \text{ pm}/^\circ\text{C}$	20 ~ 110	50 dB
光纤光栅 <sup>[47]</sup>	$12.15 \text{ pm}/^\circ\text{C}$	5 ~ 45	>55 dB
塞格纳克干涉环 <sup>[48]</sup>	$-4.031 \text{ nm}/^\circ\text{C}$	25 ~ 31	30 dB
光纤光栅 <sup>[49]</sup>	$0.00945 \text{ dB}/^\circ\text{C}$	25 ~ 1000	

### 2.2 溶液传感

对于溶液的检测, 主要集中在液体折射率、液位的测量, 它们在实际生活中有着广泛的应用. 下面介绍折射率、液位传感器在腔内光纤激光方面的应用. 2011 年, Wong 等<sup>[50]</sup> 提出了一种倾斜布拉格反射光纤激光器, 可用于环境折射率和温度测量. 传感结构是由倾斜 FBG 构成的, 既充当谐振腔, 又充当传感元件. 倾斜布拉格反射光纤激光器具有独特的光谱特征, 即存在其他类型激光器中没有的光栅倾斜诱导包层模式谱, 这提供了一种额外的传感机制. 此外, 该研究组还采用离散波变换的解调技术, 通过测量和分析激光输出和平均包层模式的波系数位移, 实现对温度和折射率的同时感知. 具体装置如图 17 所示.



图 17 基于 FBG 的双参数测量传感装置

2016 年, Zhang 等<sup>[51]</sup> 提出了一种基于光纤环形腔的新型折射率传感器. 整个结构由弯曲的光纤组成, 其中弯曲的光纤在该结构中既充当光纤滤波器, 又作为光学传感器件, 实验装置如图 18 所示. 选取不同弯曲半径的光纤进行比较, 研究表明, 弯曲半径为 4 mm 时, 传感器的最大灵敏度可达到  $124 \text{ nm}/\text{RIU}$ . 该传感器相较于以往的传感器具有带宽窄、结构简单、成本低、稳定性好、易于制造等独特优点, 应用前景广泛, 但在传感器性能优化和封装方面还需进一步提高.

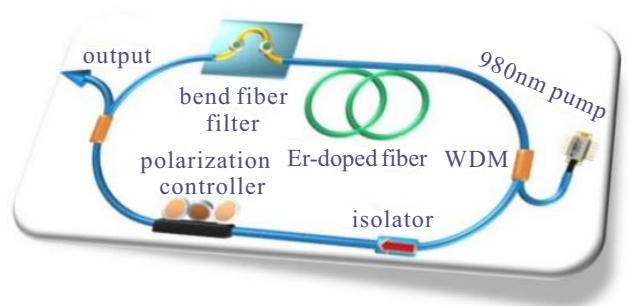


图 18 光纤环形激光器

2017 年, Cai 等<sup>[52]</sup> 利用纤芯错位熔接的单模光纤作为 MZI 实现了温度和折射率的双参数测量, 如图 19 所示. 该传感器与其他纤芯偏移式的传感器相比具有更高的检测极限及品质因数, 品质因数与其他同类型传感器相比高出约两个数量级, 而温度和折射率测量的检测极限为  $0.35^\circ\text{C}$  和  $4.54 \times 10^{-4}$ , 是传统 MZI 的 10 倍左右.

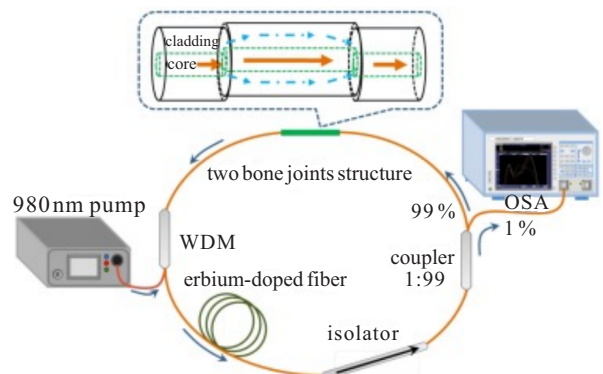


图 19 双参数激光腔传感器

2018 年, Sun 等<sup>[53]</sup> 提出基于光纤激光环形腔的液位和温度传感器. 传感结构包含一个布拉格 FBG 和一个由单模光纤-无芯光纤-单模光纤组成的 MZI. 当改变传感结构的液位或温度时, 多模干涉滤波器和布拉格 FBG 滤波器的峰值会发生变化, 激光器的两个输出波长也会相应偏移. 双参数测量的液位和温度传感器如图 20 所示.

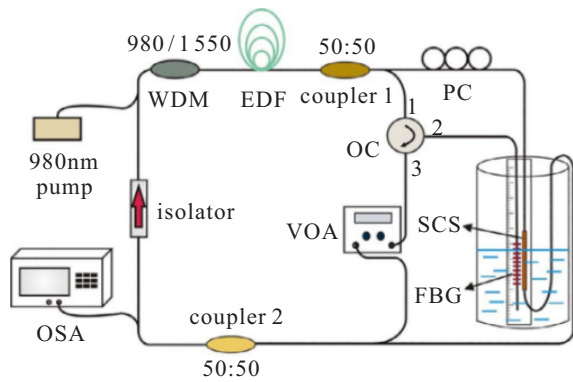


图 20 液位与温度检测装置

上述报道均在 1560 nm 波段进行实验,在 2 μm 波段很少被报道. 2021 年, Wang 等<sup>[54]</sup>利用弱耦合锥形七芯光纤结构制成传感器,用于检测在 2 μm 波段的折射率和温度. 实验表明,当氯化钠溶液的折射率为 1.3325 ~ 1.3793 时,灵敏度为 549.599 nm/RIU; 对于温度测量,在 35 °C ~ 70 °C 中灵敏度为 -4 pm/°C. 2022 年, Catalano 等<sup>[55]</sup>根据布里渊光学频域分析制备了分布式液位传感器. 通过分布式温度传感,定位液/气界面上发生的温度突变,从而确定液位位置. 在实际生活中光学加热和分布式温度传感都采用单个激光源,而该传感器没有使用单独的激光源进行加热,易与其他监测要求相结合.

### 2.3 磁场传感

近年来,磁场传感在科学研究及工程应用等领域发挥出重要作用. 光纤激光中的磁场传感器,由于其不受电磁信号干扰、体积小、成本低、远程可控等优点,受到越来越多关注. 2015 年, Nascimento 等<sup>[56]</sup>开

发了一种用于磁场测量的光纤环形激光器. 实验装置如图 21 所示,传感结构由高双折射 FBG 制成,该装置仅采用一个 FBG,结构简单. 其中,磁场信息通过 FBG 上的磁致伸缩元件转换为波长变化. 对于输出功率稳定性也进行检测,实验测得在 1 小时内的最大误差为 3.4 %.

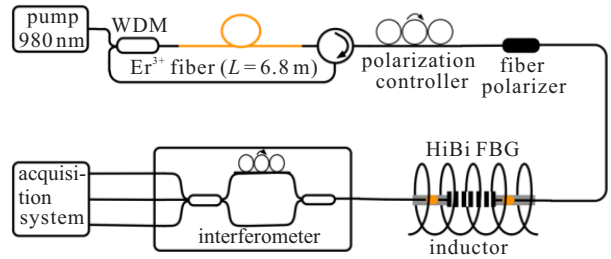


图 21 基于 FBG 的磁场传感器

2017 年, Wei 等<sup>[57]</sup>提出了一种基于掺铒光纤激光环形腔的磁场传感器. 该传感结构结合了布拉格 FBG、Sagnac 环以及耦合器,除了可以监测磁场,还可以提供温度信息,其结构为典型的环形腔结构,为基于磁场的双参数测量提供了新思路. 2021 年, Tian 等<sup>[58]</sup>提出基于保偏光纤 Sagnac 环的光纤激光振荡电路的磁场测量,如图 22 所示. 保偏光纤的 Sagnac 环与光纤激光振荡电路的组合显著提高了系统反射光谱的信噪比. 实验结果表明,该装置可以产生良好的反射干涉光谱,最高强度的反射干扰峰超过 40 dB, 3 dB 带宽约 0.03 nm. 该传感器具有成本低、灵敏度高、结构紧凑、反射光谱精细稳定等优点,但该装置测量范围较小,仅适用于小范围磁场测量.

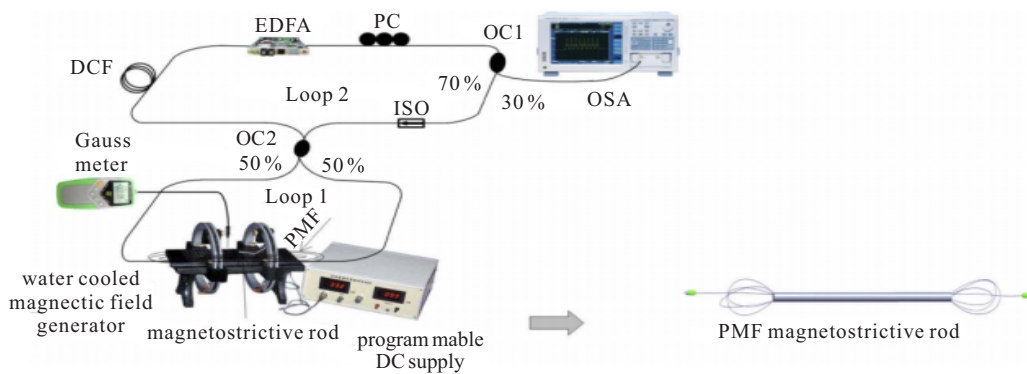


图 22 基于 Sagnac 环、FBG 的磁场传感装置

2022 年, Maia 等<sup>[59]</sup>提出了基于单模-多模结构的磁场和电流传感器,所采用的方法基于多模干涉效应,多模光纤部分涂覆碳钢,使用中心波长为 1550 nm 的连续光激光器给传感器供电,多模光纤输出端的信号由光电二极管捕获,最后使用数字万用表测量电压方面的信号. 随着磁场的增加,可在传感

器输出处观察到信号强度的增加. 将线圈放置在距离光纤 2 cm 和 4 cm 处来测试传感器的性能,灵敏度分别为 78.13 mV/mT 和 79.80 mV/mT,光透射变化情况与磁场强度之间的线性关系达到 98.297 %. 对于光纤激光磁场传感器的参数对比如表 2 所示.

表2 磁场传感器参数对比

传感结构	灵敏度	测量范围/mT	3 dB 带宽
光纤光栅 <sup>[56]</sup>	14.72±0.12 pm/mT	0~18	
塞格纳克干涉环 <sup>[57]</sup>	15 pm/mT	0~100	0.26 nm
塞格纳克干涉环 <sup>[58]</sup>	0.076 nm/mT	9~30	0.03 nm
马赫-曾德尔干涉仪 <sup>[59]</sup>	78.13 mV/mT	0~28	

2.4 应变/应力传感

为了对大型工程结构中的负荷进行实时监控与评估,结构小巧、轻便的光纤激光应变/应力传感器引起了学者的重视. 2014年, Bai等<sup>[60]</sup>利用光子晶体光纤与单模光纤连接制备了一种新型的曲率传感器. 这种结构不仅可以用作光学带通滤波器,还可充当应变传感的组件,实现了在弯曲应变方面的测量. 图23展示了实验装置和传感结构,将传感结构接入由980 nm LD作为光源的环形腔内,经过光路的循环运转,实现了在0~2 100 με 范围内2.1 pm/με 的高灵敏度曲率传感器. 同时,与基于光子晶体光纤直列型MZI的应变测量结果相比,基于光纤环形腔激光曲率传感器呈现出大于9倍的Q值,证明这种环形腔的激光传感具有较大的优势性能.

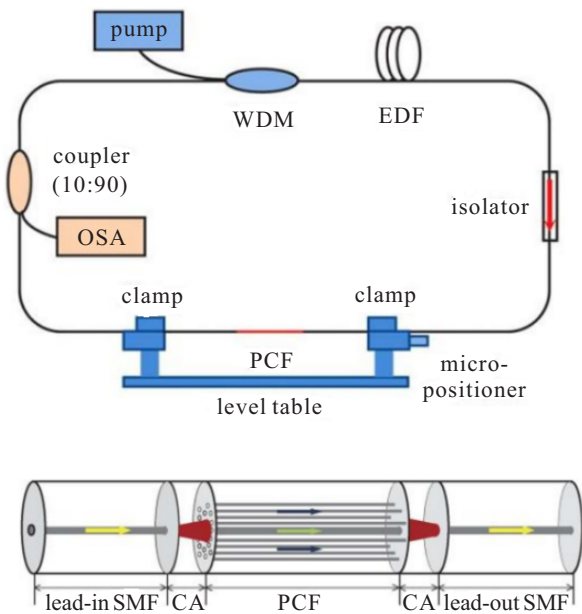


图23 基于直列型MZI的应变传感器及传感结构

2016年, Zhao等<sup>[61]</sup>研制了一种利用熔接技术形成的级联型光纤传感器,可测量温度、折射率以及应变. 将传感结构嵌入激光腔内,通过改变测量参数,在光谱仪上可观察到中心波长的移动,实验装置如图24所示. 实验结果表明,最终测试温度、折射率和应变的灵敏度分别为92.1 pm/°C、44.8 nm/RIU、-0.34 pm/με.

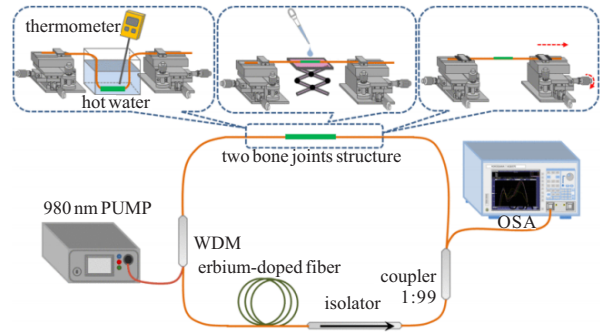


图24 温度、折射率及应变三参数传感装置

2018年, Zhu等<sup>[62]</sup>报告了一种光纤应变传感器,可以同时实现高分辨率和大动态范围测量<sup>[62]</sup>. 该传感结构是由具有相反啁啾方向的级联高反射布拉格FBG形成,传感器解调方式是通过电流注入对分布式反馈激光二极管进行波长扫描,可通过其独特的光谱间距明确识别光谱凹口,无需条纹计数即可实现较大的测量范围,证明了传感器的线性轴向应变响应,在1 000 με 的范围内应变分辨率为0.033 με.

2021年, 江旭海等<sup>[63]</sup>利用基于半导体放大器的光纤环形激光器实现了光纤动态应变传感系统,并采用光折变自适应双波混频技术对其进行解调,解调过程中无需对静态应变和温度进行任何主动补偿. 当FBG传感器的反射光谱因动态应变发生改变时,激光输出的波长会相应移动,随后转换为相应的相移并由InP: Fe光折变晶体双波混频干涉仪解调. 实验结果表明,该传感器能够测量50 Hz~464 kHz之间的动态应变,且灵敏度高于0.5 με/Hz. 同年, Guo等<sup>[64]</sup>制备了可穿戴的应变传感器,提出一种基于可拉伸布拉格FBG的光学应变传感器,实验装置如图25所示. 该传感器具有皮肤顺应性,可用于人类活动监测,其传感结构由弯曲形状的布拉格FBG制成,该布拉格FBG与可拉伸基底结合,基底通过应变使布拉格波长移动. 这种结构的设计能够在高达50%的大感应范围内测量与张力、弯曲和扭转相关的动态应变. 研究表明,该应变传感器可用于检测各种人类活动,例如呼吸、发声、面部表情等.

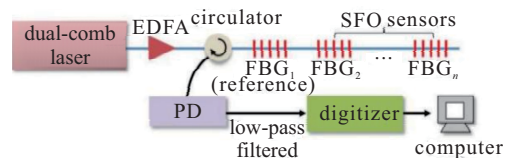


图25 可拉伸光学传感器的实验装置

2021年, Yang等<sup>[65]</sup>对光纤环形激光传感器的应变和温度参数特性进行了一项全面的研究. 该反射式传感结构由球形FPI与光纤布拉格FBG连接而成,实验装置如图26所示. 通过将级联式传感结构插入

环形腔中,作为激光强度调制器和波长选择器,最终实现了双参数解调.实验结果表明,在应变和温度实验中,传感器分别检测到  $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $24.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  的灵敏度,检测极限为  $0.87 \mu\epsilon$  和  $0.035^\circ\text{C}$ ,高  $Q$  因子为 1140 和  $7.07 \times 10^5$ .该传感器具有简单的结构和窄线

宽的特点,非常适合于远距离传感系统的应用.虽然这种传感器为多参数测量提供了方向,但在灵敏度上还有待进一步提高.

在应力应变测量中,曲率也被大家广泛研究.在2022年,Yi等<sup>[66]</sup>利用无芯光纤制备了基于光纤环形激光腔内的曲率传感器.该传感结构简单,仅通过对无芯光纤进行弯曲,监控波长移动来实现传感功能.

综上所述,光纤激光传感可用于高精度、远距离的参数测量.为了更好地比较不同原理传感器的特点及应用场合,本文以温度参数为例,总结了MZI、FPI、Sagnac、FBG、散射型传感器的适用范围及优缺点比较,具体内容如表3所示.

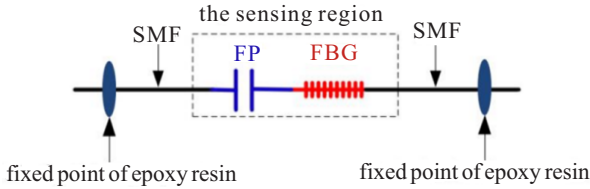


图 26 级联FPI和FBG的温度、应变传感结构

表 3 基于温度测量的各类型传感器对比

传感类型	适用范围	优点	缺点	最高灵敏度	测量范围/ $^\circ\text{C}$
马赫-曾德尔干涉型 <sup>[46]</sup>	适用于多种场合	灵活性高、成本低廉,灵敏度较高	通常情况灵敏度和结构简单不能兼得	$1089 \text{ pm}/^\circ\text{C}$	20~110
法布里-珀罗干涉型 <sup>[45]</sup>	对于结构需求精细,灵敏度要求不高	结构简单、小巧	灵敏度低	$6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$	50~450
塞格纳克干涉型 <sup>[32]</sup>	对于灵敏度需求较高	灵敏度较高,可以级联多个结构	结构复杂	$1.739 \text{ nm}/^\circ\text{C}$	30~40
光纤光栅 <sup>[49]</sup>	对于测量范围要求广泛	测量范围大	结构单一,不易进行修改	$0.00945 \text{ dB}/^\circ\text{C}$	25~1000
散射 <sup>[67]</sup>	用于大型设备的远程监控	实现全分布式测量	过程复杂	$10.829 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$	0~1000

### 3 总结与展望

本文总结了基于光纤激光腔内传感器的产生机制及工作原理,按照腔内结构可分为环形腔和线性腔,按照传感原理可分为干涉型传感器、光纤光栅型传感器、散射型传感器,并介绍了基于上述原理在温度、液体、磁场、应力/应变方面的应用.由于光纤激光传感具有不易受电磁干扰、窄线宽、高信噪比等独特优势而被学者广泛研究.但是,FLCS在如下几个方面仍存在挑战:1)大多数光纤激光腔内的双参数及多参数传感器如何避免由于交叉敏感所带来影响的问题亟待解决.2)在具体的实际应用,例如电路板温度测量、有机化学物品毒性检测、供水系统的压力监测等方面研究较少,如何将制备的传感器应用在生活中实际值得进一步探索.3)在光纤传感器的工作过程中,通常采用光谱仪作为信号的读取装置,但受光谱仪自身解调速度和分辨率较低的限制,对实时变化的参数不够敏感.因此,探究实时监测的高分辨率读取装置成为热点话题.4)现阶段所研究的FLCS大多数为连续光传感器,相比于连续光传感器,脉冲光传感器具有更大的能量以及更窄的脉宽,特别是锁模激光的脉宽可以达到飞秒量级.如何将脉冲激光与传感装置相结合将成为新的重要课题.

### 参考文献(References)

- [1] 陈浩,刘月明,邹建宇,等.光纤水质检测技术的研究现状与发展趋势[J].激光与光电子学进展,2015,52(3):030006.  
(Chen H, Liu Y M, Zou J Y, et al. Research status and development trends of fiber optical technology for water quality monitoring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030006.)
- [2] 王茂宁.基于分布式光纤传感的高速公路车辆检测与轨迹预测关键技术研究[D].成都:四川大学,2021.  
(Wang M N. Research on key technologies of expressway vehicle detection and trajectory prediction based on distributed optical fiber sensing[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.)
- [3] Chen W M, Zhu Y, Fu Y M, et al. Fiber optic sensors for safety control of civil structures[C]. Optics and Optoelectronic Inspection and Control: Techniques, Applications, and Instruments. Beijing, 2000: 4222.
- [4] 李可.光纤传感结构在人体心肺生理参数测量中的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2019.  
(Li K. Study on the application of optical fiber sensing structure in the measurement of human cardiopulmonary physiological parameters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.)
- [5] Cole J H, Bucaro J A, Kirkendall C K, et al. The origin, history and future of fiber-optic interferometric acoustic sensors for US Navy applications[C]. 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. Ottawa, 2011: 775303.

- [6] 刘统玉, 王兆伟, 李振, 等. 激光/光纤传感技术研究及其在煤矿安全监测预警中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306016.  
(Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Research on laser/optical fiber sensing technology and its application in coal mine safety monitoring and early warning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306016.)
- [7] Wong A C L, Chung W H, Tam H Y, et al. Single tilted Bragg reflector fiber laser for simultaneous sensing of refractive index and temperature[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 409.
- [8] Shi J, Wang Y Y, Xu D G, et al. Remote gas pressure sensor based on fiber ring laser embedded with fabry-Pérot interferometer and Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-8.
- [9] Diaz S, Fabian N S, Socorro-Leranz A B, et al. Temperature sensor using a multiwavelength erbium-doped fiber ring laser[J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017: 8187451.
- [10] Xiong H, Xu B, Wang D N. Temperature insensitive optical fiber laser bend sensor with a low detection limit[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2599-2602.
- [11] Shi J, Xu D G, Xu W, et al. Humidity sensor based on fabry-perot interferometer and intracavity sensing of fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4789-4795.
- [12] Lalam N, Lu P, Lu F, et al. Measurement of CO<sub>2</sub> and ultrasonic vibration based on tunable fiber ring laser[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 193340-193346.
- [13] Xiong C, Zhou J T, Liao C R, et al. Fiber-tip polymer microcantilever for fast and highly sensitive hydrogen measurement[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(29): 33163-33172.
- [14] Khaleel W A, Ai-Janabi A H M. High-sensitivity sucrose erbium-doped fiber ring laser sensor[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 026116.
- [15] Huang F Q, Chen T, Si J H, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 233-237.
- [16] Ososkov Y Z, Chernutsky A O, Dvoretzkiy D A, et al. Fiber optic Raman distributed temperature sensor based on an ultrashort pulse mode-locked fiber laser[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2019, 127(4): 664-668.
- [17] 蔡露. 基于模间干涉与回音壁模式共振原理的全光纤结构传感器研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
(Cai L. Research on all-fiber structure sensor based on the principle of inter-mode interference and echo wall mode resonance[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.)
- [18] Xie W G, Zhang Y N, Wang P Z, et al. Optical fiber sensors based on fiber ring laser demodulation technology[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 505.
- [19] 李雪刚. 微结构光纤内嵌式干涉仪原理及其传感技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.  
(Li X G. Research on principle and sensing technology of embedded interferometer with micro-structured fiber[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.)
- [20] 彭慧杰. 基于模间干涉仪的光纤氢气传感方法及关键技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
(Peng H J. Research on fiber-optic hydrogen sensing method and key technology based on multimode interferometer[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.)
- [21] 赖明彬, 耿敏明, 谭伊璇, 等. 基于级联微环辅助 Mach-Zehnder 干涉仪的带宽可调谐光滤波器的设计[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1113003.  
(Lai M B, Geng M M, Tan Y X, et al. Design of bandwidth-tunable optical filter based on cascaded microring assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 1113003.)
- [22] Li C, Ning T G, Li J, et al. Fiber-optic laser sensor based on all-fiber multipath Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(18): 1908-1911.
- [23] Zhang Y N, Zhang L B, Han B, et al. Erbium-doped fiber ring laser with SMS modal interferometer for hydrogen sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 262-267.
- [24] Liu L L, Ren Y Q, Wang M, et al. Optical fiber fabry-perot interferometer sensor fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2020, 208(1): 55-59.
- [25] Wang P, Zhang L C, Chen F F, et al. Photonic crystal fiber micro pressure sensor based on an extrinsic Fabry-Perot interferometer fabricated by femtosecond laser[C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Manufacturing Science and Engineering*. Zhuhai, 2017: 445-450.
- [26] Meng D J, Zhang X M, Wang D H, et al. Gas pressure sensor with low detection limit based on fabry-perot interferometer and intracavity sensing of fiber ring laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 6606-6611.
- [27] Qian J, Jia P G, Liu H, et al. A MEMS fiber-optic fabry-perot vibration sensor for high-temperature applications[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 42908-42915.
- [28] 谷江瑾. 干涉型光纤湿度传感器的设计与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
(Gu J J. Design and research of interferometric optical fiber humidity sensor[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.)
- [29] Shi J, Xu D G, Xu W, et al. Humidity sensor based on fabry-perot interferometer and intracavity sensing of fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4789-4795.
- [30] Zhang Y N, Peng H J, Qian X L, et al. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 244: 393-416.
- [31] 吴迪. 基于磁流体的光子晶体光纤磁场传感特性及关键技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
(Wu D. Study on magnetic field sensing characteristics and key technologies of photonic crystal fiber based on magnetic fluid[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.)
- [32] Shi J, Wang Y Y, Xu D G, et al. Temperature sensor based

- on fiber ring laser with Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7): 794-797.
- [33] Shao L Y, Liang J W, Zhang X P, et al. High resolution refractive index sensing with dual-wavelength fiber laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(23): 8463-8467.
- [34] Madry M, Alwis L, Binetti L, et al. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity using a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20): 9215-9220.
- [35] Sa'ad M S M, Ismail M F, Zaini M K A, et al. Temperature-independent vibration sensor based on Fabry-Perot interferometer using a fiber Bragg grating approach[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(3): 037101.
- [36] Zhang W, Tuerdahong N, Zhu L Q, et al. Temperature and refractive index measurement using an optical fiber sensor featuring PCF-FP and FBG inscribed by femtosecond laser[J]. *Optik*, 2019, 194: 163095.
- [37] 王英永. 基于FBG的新型扭转振动传感器[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(4): 123-125.  
(Wang Y Y. Novel torsional vibration sensor based on FBG[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(4): 123-125.)
- [38] Jaharudin N A N, Cholan N A, Omar M A, et al. Fiber Bragg grating based linear cavity fibre laser temperature sensor with enhanced optical signal-to-noise ratio[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(1): 015101.
- [39] Fukushima K, Guterres Soares M, Wada A, et al. Loss-modulation-based wavelength-range shifting of tunable EDF ring laser with cascaded-chirped long-period fiber grating for temperature measurement[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2342.
- [40] 孙安, 陈嘉琳, 李国扬, 等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 503-506.  
(Sun A, Chen J L, Li G Y, et al. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(4): 503-506.)
- [41] 吕月兰, 行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0819001.  
(Lv Y L, Xing Y W. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0819001.)
- [42] 黄茜, 王京, 曹丽冉, 等. 纳米Ag材料表面等离子体激元引起的表面增强拉曼散射光谱研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 1980-1986.  
(Huang Q, Wang J, Cao L R, et al. Research of surface enhanced Raman scattering caused by surface plasmon of Ag nano-structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1980-1986.)
- [43] 刘建霞.  $\Phi$ -OTDR分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 199-204.  
(Liu J X. Research progress of  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber sensing monitoring technology[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2013, 50(8): 199-204.)
- [44] Lecoche V, Hathaway M W, Webb D J, et al. 20-km distributed temperature sensor based on spontaneous Brillouin scattering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(10): 1367-1369.
- [45] Pinto A M R, Lopez-Amo M, Kobelke J, et al. Temperature Raman laser sensor based in a suspended-core Fabry-Perot cavity and cooperative Rayleigh scattering[C]. *Proceedings of 21st International Conference on Optical Fiber Sensors*. Ottawa, 2011: 77531A.
- [46] Martinez-Rios A, Anzueto-Sanchez G, Selvas-Aguilar R, et al. High sensitivity fiber laser temperature sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2399-2402.
- [47] Madry M, Alwis L, Binetti L, et al. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity using a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20): 9215-9220.
- [48] Lin W H, Shao L Y, Liu Y B, et al. Temperature sensor based on fiber ring laser with cascaded fiber optic Sagnac interferometers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 1-12.
- [49] Guo K K, He J, Li H, et al. High-spatial-resolution high-temperature sensor based on ultra-short fiber Bragg gratings with dual-wavelength differential detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(7): 2166-2172.
- [50] Wong A C L, Chung W H, Tam H Y, et al. Single tilted Bragg reflector fiber laser for simultaneous sensing of refractive index and temperature[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 409.
- [51] Zhang X P, Liu Z G, Xie L X, et al. Refractive index sensor based on fiber ring laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 524-527.
- [52] Cai L, Zhao Y, Li X G. A fiber ring cavity laser sensor for refractive index and temperature measurement with core-offset modal interferometer as tunable filter[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 242: 673-678.
- [53] Sun C R, Dong Y, Wang M G, et al. Liquid level and temperature sensing by using dual-wavelength fiber laser based on multimode interferometer and FBG in parallel[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 41: 212-216.
- [54] Wang Y, Chen Z H, Chen W J, et al. Refractive index and temperature sensor based on fiber ring laser with tapered seven core fiber structure in 2  $\mu$ m band[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61: 102388.
- [55] Catalano E, Vallifuoco R, Zeni L, et al. Distributed liquid level sensor based on Brillouin optical frequency-domain analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 6601-6605.
- [56] Nascimento I M, Baptista J M, Jorge P A S, et al. Magnetic field measurement using a fiber laser sensor in ring arrangement[C]. *SPIE Optics + Optoelectronics*. Prague, 2015: 95061M.
- [57] Wei F F, Mallik A K, Liu D J, et al. Simultaneous measurement of both magnetic field strength and temperature with a microfiber coupler based fiber laser sensor[C]. *25th International Conference on Optical Fiber Sensors*. Jeju, 2017: 103230H.
- [58] Tian J, Zuo Y W, Hou M J, et al. Magnetic field measurement based on a fiber laser oscillation circuit

- merged with a polarization-maintaining fiber Sagnac interference structure[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8763.
- [59] Maia L S P, Miranda M A R, de Souza I M X, et al. Optical current and magnetic field sensor using multimodal interference in fiber optics with carbon steel[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 12877-12885.
- [60] Bai X K, Fan D F, Wang S F, et al. Strain sensor based on fiber ring cavity laser with photonic crystal fiber In-line Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 1-8.
- [61] Zhao Y, Cai L, Li X G. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on up-taper fiber structure with Er3 doped fiber ring laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(15): 3475-3481.
- [62] Zhu Y P, Zhang Q, Liu G G, et al. Fabry-perot sensor using cascaded chirped fiber Bragg gratings with opposite chirp directions[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(16): 1431-1434.
- [63] 江旭海, 陶传义, 肖建军, 等. 基于双波混频干涉解调的光纤环形激光应变传感系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306021.  
(Jiang X H, Tao C Y, Xiao J J, et al. Fiber ring laser strain sensing system based on double-wave mixing interference demodulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306021.)
- [64] Guo J J, Zhao K J, Zhou B Q, et al. Wearable and skin-mountable fiber-optic strain sensors interrogated by a free-running, dual-comb fiber laser[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(12): 1900086.
- [65] Yang X C, Liu Y H, Sun X H, et al. Strain- and temperature-sensing characteristics of fiber ring laser sensor with cascaded fabry-perot interferometer and FBG[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-7.
- [66] Yi L, Xue Z F, Ding Y Y, et al. Surface curvature sensor based on intracavity sensing of fiber ring laser[J]. *Photonics*, 2022, 9(10): 781.
- [67] 贾青松, 王天枢, 王振, 等. 基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 585-589.  
(Jia Q S, Wang T S, Wang Z, et al. Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 585-589.)

### 作者简介

程同蕾(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性光纤光学、特种光纤传感技术等研究, E-mail: chengtonglei@ise.neu.edu.cn;

曲雨晗(1999—), 女, 硕士生, 从事脉冲激光器及传感特性的研究, E-mail: 2170927@stu.neu.edu.cn;

刘伟(1994—), 男, 博士生, 从事硝酸盐光纤及其传感特性的研究, E-mail: 2010270@stu.neu.edu.cn;

周雪(1991—), 女, 硕士生, 从事表面等离子体共振、特种光子晶体光纤制备等研究, E-mail: zhouxue@ise.neu.edu.cn;

尹智远(1999—), 男, 硕士生, 从事硝酸盐光纤及其传感特性的研究, E-mail: 2100704@stu.neu.edu.cn;

闫欣(1978—), 女, 教授, 博士, 从事光纤光波导器件、基于碳纳米管/石墨烯的电子器件等研究, E-mail: yanxin@ise.neu.edu.cn;

张学楠(1983—), 男, 讲师, 博士, 从事微纳光子学及其应用等研究, E-mail: zhangxuenan@ise.neu.edu.cn;

王方(1988—), 男, 博士, 从事超快脉冲激光器特性的研究, E-mail: wangfang@ise.neu.edu.cn.



**特邀专家** 程同蕾, 东北大学教授, 博士生导师, 研究方向为特种光纤传感技术. 国家高层次青年人才, 辽宁省红外光电材料及微纳器件重点实验室主任, 辽宁省“百千万人才工程”人才工程入选者, 辽宁省“兴辽英才计划”入选者, 沈阳市高层次“领军人才”入选者, 日本学术振兴会(JSPS) invitational fellowship 和 postdoctoral fellowship, 日本丰田奖学基金研究奖获得者, IEEE IMS TC-42 委员会委员和纤维光学与集成光学专委会委员. 长期从事非线性光纤光学、特种光纤及传感技术相关领域的研究, 目前以第1作者(含通讯)共发表SCI论文119篇, 参加国际学术会议30余次, 大会特邀报告15次, 获授权发明专利26项.

**专家寄语** 百年校庆, 欣逢盛世. 同心同德, 上下协力. 校园如画, 盎然春意. 莘莘学子, 奋发向  
进. 继往开来, 再接再厉. 愿东北大学蒸蒸日上, 再创辉煌!