先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022072801

基于光纤环形激光器的传感技术研究与应用

林伟浩，孙思明，胡　杰，赵　方，邵理阳*

（南方科技大学 工学院 电子与电气工程系，广东 深圳 518055）

摘　要： 基于光纤环形激光器的新一代光纤传感系统通过解调激光波长偏移来检测外界参量变化，得利于激光光谱窄线宽及高信噪比的特性，可实现高分辨率、高灵敏度、大动态范围的传感监测。文章介绍了包括基于光纤光栅、迈克尔逊干涉仪、法布里-珀罗腔、萨格奈克环以及马赫-曾德尔干涉仪等多种结构的光纤传感器工作原理，以及进一步构成光纤环形激光传感器的特性和多种应用案例，并对未来该领域的关键技术发展进行了分析。

关键词： 光纤传感；光纤光栅；迈克尔逊干涉仪；法布里-珀罗腔；萨格奈克环；马赫-曾德尔干涉仪；光纤环形激光腔

中图分类号： TN212；TN365　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0728－10

Research and Application of Sensing Technology Based on Fiber Ring Laser

LIN Weihao, SUN Siming, HU Jie, ZHAO Fang, SHAO Liyang

(Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, CHN)

Abstract: The new generation of optical fiber sensing system based on fiber ring laser (FRL) cavity detects the changes of external parameters by demodulating the laser wavelength shift, which benefits from the characteristics of narrow line-width and high signal-to-noise ratio of the laser, and can realize high-resolution and large-scale dynamic monitoring. This paper introduced the basic working principle of fiber ring laser cavity sensing technology, and summarized the most mature fiber microstructure sensors in recent years, including fiber grating, Michelson interferometer (MI), Fabry Perot (FP) cavity, Sagnac loop and Mach Zehnder interferometer (MZI). The principle of each structure and the specific application scenarios in the field of optical fiber sensing were described. Finally, the development and application of optical fiber sensing technology based on fiber ring laser cavity were summarized and prospected.

Key words: fiber sensing; fiber Bragg gratings; Michelson interferometers; Fabry-Perot cavities; Sagnac rings; Mach-Zehnder interferometers; fiber ring laser cavities

0　引言

近年来光纤传感器因其体积小、质量轻、结构简单及抗电磁干扰等优点，被广泛应用于海洋资源勘探、电池原位监测、周界安防及生物医学工程中。不同结构的光纤传感器被设计及应用于如电场、磁场、气体、温度和折射率等物理参量的测量，这些结构包括：光纤布拉格光栅、迈克尔逊干涉仪、法布里-珀罗腔以及马赫-曾德尔干涉仪。然而，传统的点式光纤传感通过宽带光源携带外界调制信息的光传入光谱仪进行解调，通过分析波长的偏移来分析外界环境的变化，存在较大的光强损耗、低的信噪比以及很宽的带宽等问题，对传感器本身性能造成极大的影响，降低了系统的可使用性。

基于光纤环形激光腔(FRL)的传感技术是一种

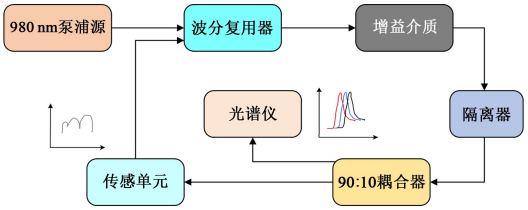
收稿日期：2022－07－28.

* 通信作者：邵理阳　E-mail：shaoly@sustech.edu.cn

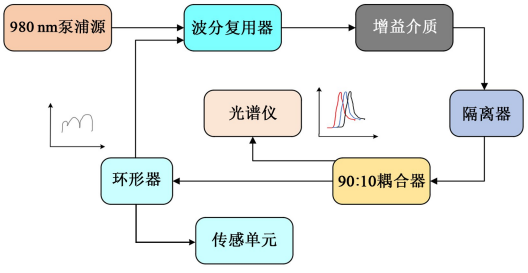
利用激光在光纤传输过程中受到滤波器的调制产生的波长偏移来获取外界环境物理量变化的新型传感技术方案，得利于激光光谱高信噪比、窄带宽、高品质因子等优点，相较光纤光栅类无源光谱传感器，可实现高分辨率、高灵敏度、大动态范围的传感监测。

1　FRL 传感原理

基于光纤环形激光腔的传感结构如图 1 所示。由 980 nm 泵浦光源、波分复用器、增益介质（掺杂光纤）、隔离器、耦合器、传感单元及光谱仪组成。由 980 nm 半导体激光器产生的泵浦光经波分复用器进入环形腔内。在腔内泵浦光激发增益介质，如掺铒光纤、掺镱光纤等，发生下转换产生激光。光纤环形腔中内置隔离器，用于激光单向传输，避免后向散射光破坏器件。激光受滤波器（传感单元）调制经 90∶10 耦合器传输到光谱仪中。受外界参量影响，滤波器的干涉峰会随环境（温度、折射率、应变等）变化而变化，因此被调制的激光输出波长也会发生偏移，即为 FRL 传感的基本工作原理。



（a）　内部探测



（b）　外部探测

图 1　光纤环形激光器传感结构示意图

其中，品质因子 Q 用于表征光纤传感器的光谱质量。它是一个归一化值，可以表示为

$$Q=\frac{K\cdot S^2\cdot V}{FWHM} \tag{1}$$

式中，K 为单位系数，用于归一化物理维度，S 表示传感器的灵敏度，V 是光谱的可见性，$FWHM$ 表示光谱的 3-dB 带宽。由式（1）易得，在灵敏度等同的情况下，以激光作为光源的传感系统的品质因子比宽带光源高出 3 个数量级。

另一个评价传感器综合性能的指标为探测极限（DL），其表达式为

$$DL=R/S \tag{2}$$

式中，R 是传感器的分辨率，由振幅噪声、热变化和系统设置的光谱分辨率等三个因素决定，具体的表达式为

$$R=3\sqrt{\sigma^2_{\text{ampl-noise}}+\sigma^2_{\text{temp-induced}}+\sigma^2_{\text{spec-tes}}} \tag{3}$$

温度诱导的热变化通常很小，可以忽略，光谱分辨率对于激光和宽带光源而言是等同的。根据式（2）和（3），可以计算得到 FRL 结合前后的传感器灵敏度没有变化，但探测灵敏度大大提高。

2　光纤传感器结构设计

2.1　光纤光栅传感器

光纤布拉格光栅（FBG）传感发生在周期光栅区域。光栅的折射率与纤芯不同。当光注入纤芯时，波长信号发生扰动。只有一个特定的波长被反射回来，而另一个波长继续通过。反射波长满足布拉格方程：

$$\lambda_B=2n_{\text{eff}}\Lambda \tag{4}$$

式中，n_{eff} 是光通过光纤传播时的折射率，Λ 是折射率调制周期，也称为光栅轮廓，λ_B 是布拉格波长。原理如图 2 所示，当光栅区域变形时，布拉格光栅间距受到调制，反射光的波长将发生偏移，这是将光纤光栅用作传感器的基本原理。通常，FBG 可以用于检测应变、温度和其他物理参数[1-4]。

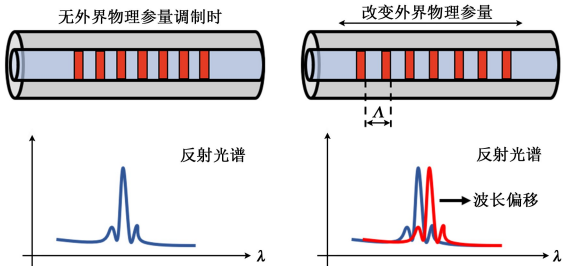
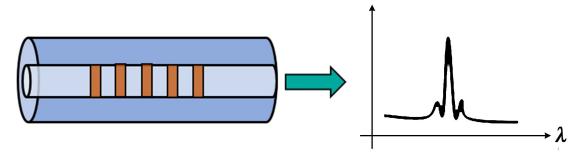


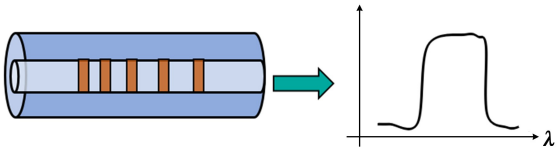
图 2　光纤布拉格光栅传感基本原理示意图

基于此，不同种类的光纤光栅被设计用于实现更高灵敏度的监测，如啁啾光纤光栅、倾斜光栅、长周期光栅等，如图 3 所示，其具有不同形状的反射光谱。2015 年，北京交通大学的简水生教授团队提出了一种全光纤激光传感结构[5]，用基于内嵌 FBG 的双芯光纤（TCF）对应变和温度进行同步解耦，并进行了实验验证，结果显示其信噪比高于 40 dB。由

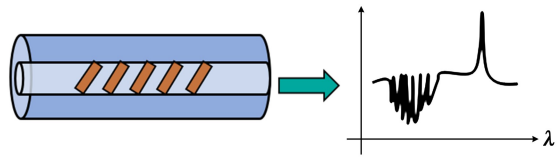
于 TCF 和 FBG 对应变和温度均匀变化的光谱响应不同，通过实时监测中心波长偏移和峰值功率变化，可以实现这两个测量值的解耦测量。此后，该课题组在基于前述工作的基础上又实现了液位和温度的同时测量[6]。



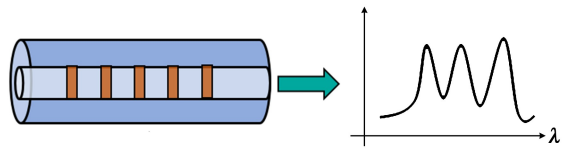
（a） 光纤布拉格光栅(FBG)



（b） 啁啾光纤光栅(CFBG)



（c） 倾斜光纤光栅(TFG)



（d） 长周期光栅(LPFG)

图 3 不同类型的光纤光栅及其反射光谱示意图

在前人基础上，本课题组于 2016 年提出双 FBG 滤波器，基于简单的双波长光纤环形激光器，实现温度补偿下的折射率传感(RI)。如图 4 所示，光栅滤波器由两个不同包层厚度的 FBG 制成。通过在光纤环形腔中插入滤波器，可以在室温下实现稳定的双波长光纤激光器。覆层蚀刻的 FBG 作为 RI 传感元件，而正常的 FBG 作为温度基准。随着 RI 的增加，对应于减薄 FBG 的激光波长向长波移

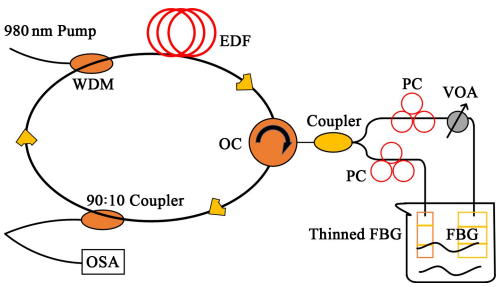


图 4 光纤环状激光传感示意图[7]

动，而对应于正常 FBG 的激光波长不变。通过测量两个激光波长的分离来确定 RI 变化。此外，与传统传感器相比，光纤激光传感器具有较窄的带宽，该传感器的 RI 测量分辨率约为 1.44×10^{-5} RIU[7]。基于此机理，中国海洋大学的尹彬教授及波兰弗罗茨瓦夫科技大学的马特伍兹教授几乎同一时间实现了湿度和温度的同时检测[8-9]。

2.2 马赫-曾德尔干涉仪

光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)是使用最为广泛的一种光纤传感器[10-14]。在 MZI 传感器中，一束光注入到光纤中，光纤平均分成传感臂和参考臂。两束光经过传感结构之后重新结合以实现干涉。传感臂长度的变化，以及周围材料的变化，会改变干涉光场性质，从而产生相位差。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

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\varphi \tag{5}$$

式中，I_1 和 I_2 是两束干涉光的强度，φ 是两个光束的相位差，表达式为

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda} \tag{6}$$

式中，Δn_{eff} 是芯模和包层模的有效折射率之差，L 是结构的分路器和合路器之间的光纤长度，λ 是所用的光波长。因此，包层模与纤芯模第 m 级干涉极小值处波长为

$$\lambda_{\text{dip}} = 2L\Delta n_{\text{eff}}/(2m+1) \tag{7}$$

自由光谱范围(FSR)可表示为

$$FSR = \frac{\lambda_{\text{dip}}^2}{\Delta n_{\text{eff}} L} \tag{8}$$

外界参量变化将引起光纤 MZI 透射光谱的变化，从而实现感知，常见的结构如图 5 所示。其均是通过对光纤结构进行设计，将多段光纤进行组合，从而在光纤中将入射光先分束再合束，以达到干涉的目的。

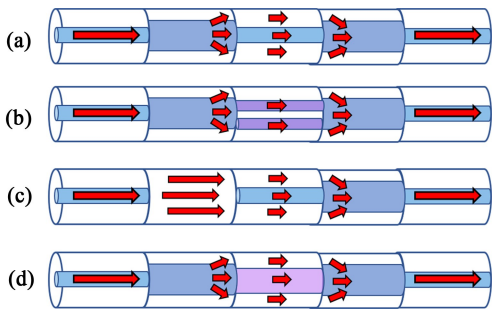
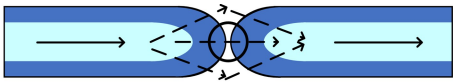


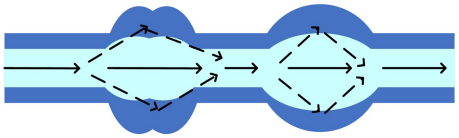
图 5 不同结构的 MZI 光纤传感器示意图

本课题组于 2021 年，提出并演示了一种基于光纤环形激光器中稀土光纤花生形状结构的新型温度

传感器[15]。采用单模稀土掺杂光纤制作花生结构，制作马赫-曾德尔干涉仪。利用稀土离子在光纤中的强热光效应，实现了高灵敏度的温度测量。更重要的是，与传统光纤激光传感器相比，不需要额外的滤波器。进一步，测量了折射率(RI)的灵敏度，以进一步验证 MZI 的传感性能。实验结果表明，与外部传感单元相比，掺铒光纤花生(EDFP)结构具有更高的热光效应系数和更高的温度灵敏度。EDFP 的温度和 RI 灵敏度分别为 0.158 nm/℃和－19.55 nm/RIU。进一步地，通过改善干涉仪结构，将温度灵敏度提升到 0.301 nm/℃[16]。其结构图分别如图 6(a)和图 6(b)所示。



(a)　单模稀土掺杂光纤的花生结构



(b)　新型掺铒光纤花生形上锥结构

图 6　掺铒花生状结构传感器

2.3　迈克尔逊干涉仪

光纤迈克尔逊干涉仪(MI)与 MZI 非常相似，但是 MI 利用光的反射产生干涉模式而非传输模式，其应用十分广泛[17-20]。其主要通过芯层和包层光产生的累计相位差形成干涉，如图 7 所示。MI 输出处的光强度可以用等式(5)表示，其中 I_1 和 I_2 分别是纤芯和高阶主包层模式的强度，而φ是纤芯和包层模式的累积相位差，由下式得出：

$$\varphi=\frac{4\pi\Delta n_{\mathrm{eff}}L}{\lambda} \tag{9}$$

2016 年简水生教授团队提出了一种基于单模偏置无芯单模光纤结构的新型反射式液位传感器[21]，并进行了实验验证。理论分析和实验结果表明，偏移融合可以显著提高传感器的灵敏度。末端反射结构使传感器结构紧凑，易于部署。将 SOCS 结构同时用作传感头和激光滤波器。探测灵敏度高达 73.60 pm/mm，获得了高光信噪比(－30 dB)和窄 3 dB 带宽(－0.15 nm)的激光光谱。该团队同时使用多芯光纤制作类似 MI 传感器进行液位测量[22]，实现灵敏度高达 50.6 pm/mm 的液位监测。

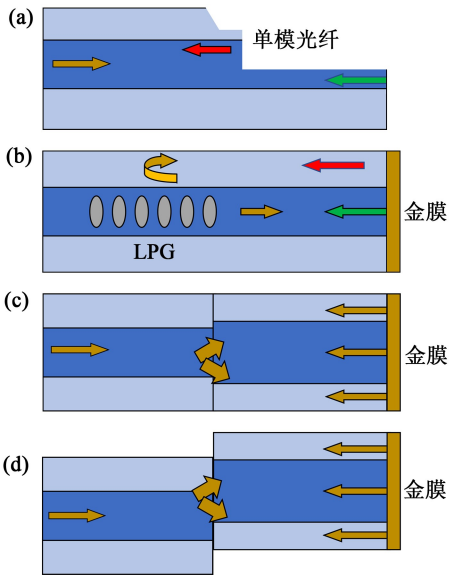


图 7　不同结构的 MI 光纤传感器示意图

2.4　法布里-珀罗干涉仪

法布里-珀罗干涉仪(FPI)通常由两个平行反射面组成，两个反射面之间相隔一定距离。反射和透射光束在两个平行表面多次叠加，从而产生干涉[23]。通过在光纤内部或外部建立反射器可快速简单地形成 FPI。FPI 传感器大致可分为两类：一类是外置传感器，另一类是内腔传感器。非本征 FPI 传感器使用外置反射镜实现反射[24]。

图 8(c)显示了外部 FPI 传感器结构，其中空气腔由支撑结构形成。另一方面，内腔 FPI 光纤传感器在光纤本身中具有反射组件。例如，当通过任何方式在光纤内形成反射器时，如图 8(a)和(b)所示，可以获得 FP 干涉单元。本征 FPI 的局部腔可以通过许多方法形成，例如激光刻蚀[25]、化学蚀刻[26]和光纤熔接[27]等。相位差表达式为

$$\varphi=\frac{4\pi nL}{\lambda} \tag{10}$$

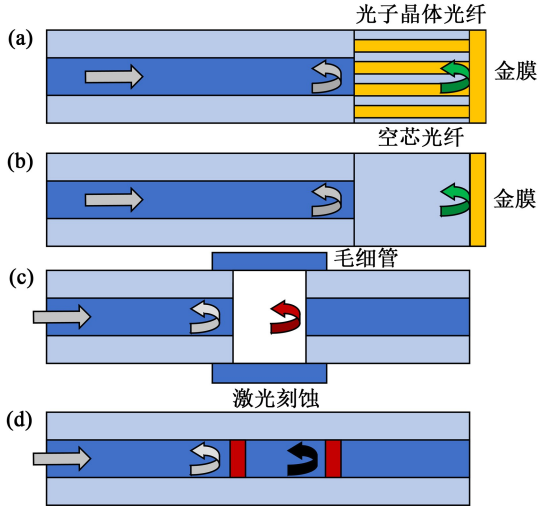


图 8　不同结构的 FP 光纤传感器示意图

其中，n 是腔中介质的反射指数，L 为反射器分离的法布里-珀罗腔的长度，λ 是使用的光波长。

2016 年天津大学姚建铨院士团队提出了一种基于嵌入法布里-珀罗干涉仪和萨格纳克环的光纤环形激光器的远程气体压力传感器[28]。在光纤激光器中插入一个紧凑的光纤 F-P 干涉仪，作为气体压力检测的传感头。光纤激光器中使用了基于光纤 Sagnac 环路的波长选择滤波器。其获得的灵敏度为 9.69 nm/kPa，3 dB 带宽小于 0.02 nm，证明了此类型传感器用于远程检测气体压力的优异性能。在此基础之上，将 FBG 放入激光腔做滤波器，控制输出波长，实现了从功率谱测量气体压强，其结构如图 9 所示[29]。此后，美国西北大学的 Krishnaswamy 提出了基于环形激光腔内的 FP 应变传感[30]。类似的报道先后可见于参考文献[30-31]。

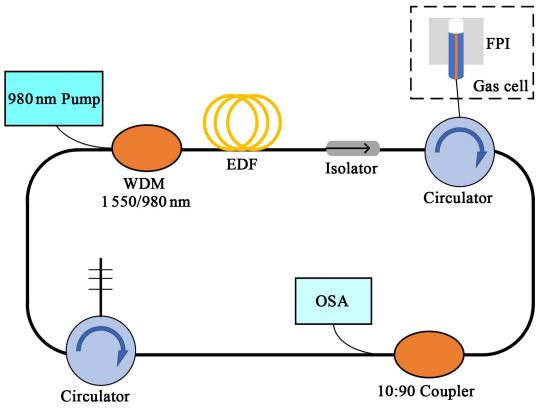


图 9 基于 FPI 的腔内传感系统的实验装置[29]

2.5 萨格奈克干涉仪

萨格纳克型传感器是基于萨格纳克效应设计的，萨格纳克效应是由旋转引起的干涉测量中遇到的一种现象。通常，典型的萨格纳克干涉仪是一个光纤环结构，如图 10 所示，其中插入一段双折射光纤[32-35]。双折射光纤用于使两个反向传播波产生路径差和相位差，从而产生可在光谱仪上监测的干扰效应。萨格纳克干涉仪的输出可以描述为

$$I=\frac{\left[1-\cos\left(\frac{2\pi BL}{\lambda}\right)\right]}{2} \tag{11}$$

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，λ 是自由空间光束的波长。

2016 年天津大学的徐德刚教授提出了一种基于反射式萨格纳克环的光纤环形激光器的温度传感器[36]。通过插入光纤环形激光器的反射 Sagnac 环用作滤波器和传感头，以提供高温度灵敏度。随着温度的变化，Sagnac 环路的透射光谱发生变化，导致光纤环形激光器的发射波长发生偏移。其温度灵敏度高达 1.739 nm/℃，3 dB 带宽窄于 0.05 nm，信噪比约 50 dB。

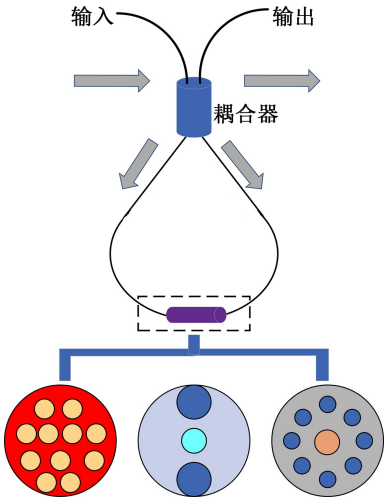


图 10 基于 Sangnac 的光纤传感器示意图

3 基于 FRL 的光纤传感应用进展

3.1 温度传感

温度监测与人们的日常生活息息相关，人的生命体征、食品的存储、设备的正常运行都离不开对温度的监测。然而，现有监测手段多采用电偶传感，其探测距离近、响应范围小，难以实现高精度检测，不利于大范围应用。光纤传感因为其体积小，质量轻等优点，可作为传统电子式传感器的替代品。

近年来，学者们开展了一系列相关研究。2020 年，厦门大学的付红燕教授及其团队提出了一种基于混合增益介质和萨格纳克干涉仪用于温度测量的多波长光纤环形激光器，并进行了实验验证[37]。在 1 560 nm 波段成功实现了稳定的多波长振荡，波长不稳定性为±0.08 nm，信噪比为 42 dB。其温度灵敏度为 1.806 3nm/℃。在此基础上，本课题组提出

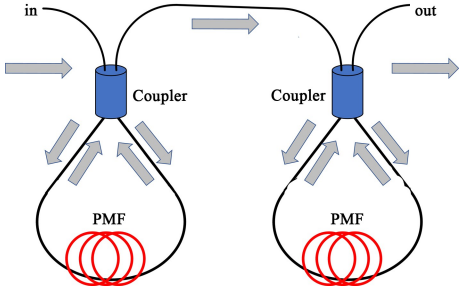


图 11 基于游标效应的光纤温度传感器示意图

表 1　温度传感器参数对比

参考文献	结构	灵敏度/(nm/℃)	温度范围/℃	信噪比/dB
[16]	MZI	0.301	0～50	50
[36]	Sagnac	1.739	30～40	50
[37]	Sagnac	1.806 3	23～33	42
[38]	Sagnac	4.031	25～31	—
[40]	Sagnac	1.65	25～33	—
[41]	MZI	0.039	35～70	—
[42]	Tapered fiber	0.034	30～150	—

基于游标效应的级联 Sagnac 环温度传感器[38]，实现了探测灵敏度高达 4 nm/℃，其结构如图 11 所示。不同构型的光纤温度传感器先后被提出并报道，如高热光系数液体填充的光子晶体光纤[39,40]、错位熔接[41]、光纤拉锥[42]等。近年来报道的温度传感器基本参数对比如表 1 所示。

3.2　折射率传感

折射率的测量广泛应用于化学分析、环境污染评价、医疗诊断和食品工业等领域。目前，光纤传感器因其稳定性好、不受电磁干扰等优点，被认为是一种很有前途的 RI 传感解决方案，并引起了人们的极大兴趣。

2017 年，北京交通大学的简水生教授团队基于一种特殊设计的单模少模结构，提出了一种新型的用于折射率测量的掺铒光纤环形腔激光传感器，并进行了实验验证[43]。少模光纤支持两种标量模式。因此，出现了稳定的模式干扰，在 1.333～1.363 范围内其灵敏度为 45.429 nm/RIU，光信噪比(OSNR)约为 45 dB，3 dB 带宽约为 0.1 nm。这表明光纤环形激光传感系统可实现高分辨率和高精度 RI 测量。在此之前，华南师范大学的蒙红云等提出并设计了一种错位 MZI 和 FBG 级联结构[44]，实现了温度和折射率的同时测量，该传感器的 RI 灵敏度和温度灵敏度分别为 13.759 2 nm/RI 和 0.046 2 nm/℃。此外，不同结构的传感器相继被报道，其折射率灵敏度不断获得突破[45-47]。这些折射率传感器的参数对比如表 2 所示。

表 2　折射率传感器参数对比

参考文献	结构	灵敏度/(nm/RIU)	折射率范围	信噪比/dB
[7]	FBG	14.4	1.333～1.442	60
[43]	FMF-SMF-FMF	45.429	1.333～1.363	45
[44]	MZI&FBG	13.759 2	1.323～1.352	25
[45]	LPG	1 210.20	1.325～1.452	35
[46]	MZI	108.6	1.335～1.375	—

3.3　应力/应变传感

应变的准确检测和监测在土木工程、航空航天、海洋、工业、地质灾害等领域广泛应用的材料健康检测中具有重要意义。光纤传感器作为一种实现实时、原位应变检测的有效方法，由于其固有的微观尺寸、鲁棒性强等优点，引起了人们的广泛关注和研究[48-50]。

2021 年，天津大学姚建铨院士及其团队全面研究了光纤环形激光器(FRL)传感器的应变和温度传感特性[51]。反射传感头由球面法布里-珀罗干涉仪和光纤布拉格光栅串联搭载在悬臂梁上而成，如图 12 所示，插入 FRL 腔中作为激光强度调制器和波长选择器。激光强度对温度变化敏感，而对应变不敏感，通过检测激光波长偏移和激光强度变化，实现了无需多变量矩阵的双参数解调。在应变和温度的实验中分别检测到 1 μm/με 和 24.9 μm/℃ 的可比灵敏度，低检测限(DL)分别为 0.87 με 和 0.035 ℃，Q 因子分别为 1 140 和 7.07×10^5。传感器的高强度和窄线宽使其在长距离传感系统中具有潜在的巨大应用价值。此前，马来西亚大学的 Jaddoa 等在激光器环形回路中集成 MZI 作为腔内滤波器，并记录了 103.5 pm/μm 的灵敏度[52]。

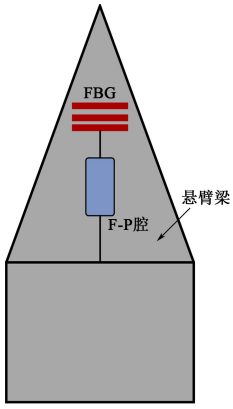


图 12　基于悬臂梁结构的应变传感器示意图

3.4　电场传感

近几年来，光纤电场传感器在强分布电磁场中有着巨大的潜在需求。强功率电机与分布式电磁场相连，使得传统电子式传感器无法在工作状态下测量电场。

有关基于光纤环形激光腔的电场监测的报道较少。2021 年，本课题组提出了一种基于光纤环形激光器系统中液晶填充侧孔光纤的新型可调谐电光调制器(如图 13 所示)并进行了实验验证[53]。由于电光效应，当施加外部电场时，液晶被穿透到自蔓延光纤的气孔中，液晶的折射率会发生变化。自蔓延光纤在激光腔内同时用作滤波器和传感头。同时，该

传感器具有高消光比(大于 42 dB)和窄的 3 dB 带宽(小于 0.08 nm)等良好性能。测量结果显示,其电场灵敏度为 0.604 nm/V。此后,利用光子晶体光纤对系统进行了进一步改进,有效提升了系统灵敏度[54]。

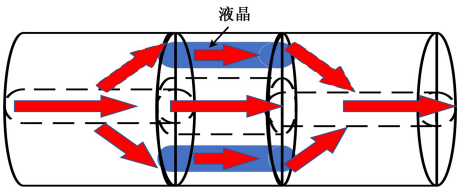


图 13 基于液晶填充的边孔光纤

3.5 磁场传感

磁流体是一种稳定的胶体系统,由表面活性剂包裹的磁性纳米粒子分散在合适的液体载体中组成。作为一种光子学功能材料,磁流体具有法拉第效应、可调折射率、双折射、光学各向异性、场相关传输等独特的磁光特性。这些磁光特性可以通过外磁场来调节[55]。

2015 年上海大学的曾祥龙提出了一种基于磁流体的光纤环形腔激光器磁场传感器[56],并进行了实验验证。在光纤环形激光腔中插入了 MF 涂覆的单模无芯单模光纤结构,该结构同时充当带通滤波器和磁场传感元件。具有高边模抑制比(14 dB)和约−1.03 dB 的小插入损耗的出色带通滤波是由自成像效应引起的。实验结果表明,随着外磁场的增加,激光波长向蓝色方向移动。在 15.9～222.32 Oe 的范围内,磁场感应灵敏度达到 12.05 pm/Oe。这种结构在激光输出光谱的高可见度(～40 dB)和相对较窄的 3 dB 带宽(～0.19 nm)方面显示出明显的优势。因此,其 Q 值比其他磁场传感结构的 Q 值大 10 倍以上。一年后,类似的基于无芯光纤结构的磁场传感器被报道[57]。此后,基于 Sagnac 环等结构的基于光纤环形激光腔的磁场传感器被先后提出[58-60]。近年来报道的磁场传感器参数对比如表 3 所示。

表 3 磁场传感器参数对比

参考文献	结构	灵敏度/(pm/Oe)	磁场范围/Oe	信噪比/dB
[57]	SMF-NCF-SMF	12.05	15.9～222.2	40
[58]	SMF-NCF-SMF	52.1	0～120	40
[59]	twisted-fiber	7.09/(KHz/Oe)	0～437	—
[60]	Sagnac&FBG	102	0～60	—
[61]	Sagnac	176	0～45	40

3.6 气体传感

气体压力测量在许多重要领域都是不可或缺的,尤其是在生物医学、医疗保健、自动控制、人工智能、石油、民用工业等行业中。光纤气体压力传感器具有灵敏度高、抗干扰、响应速度快等优点,受到人们的广泛关注。

2022 年天津大学姚建铨院士团队在之前研究的基础上,提出了一种基于法布里-珀罗干涉仪和光纤环形激光器内腔传感的低检测限气体压力传感系统[61]。采用聚酰亚胺薄膜和 3D 打印树脂外壳制作了一种小型压敏光纤法布里-珀罗干涉仪。然后,将其耦合到光纤环形激光器中。法布里-珀罗干涉仪的反射损耗在不同气压下进行调制。通过感应内腔气体压力传感,可以通过光纤环形激光器的输出功率测量气体压力。气体压力传感系统的检测极限已从 0.155 kPa 大幅优化至 0.01 kPa。分析了气体压力传感系统的温度交叉灵敏度和测量稳定性。该传感方法可应用于类似传感器,以优化测量检测极限,如图 14 所示。

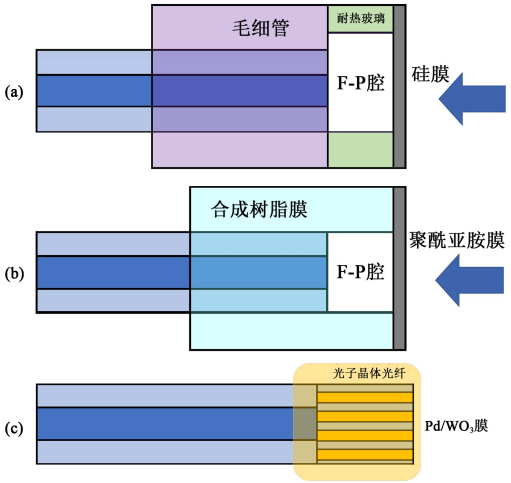


图 14 不同结构的光纤气体传感器

此外,东北大学的张亚男教授提出基于光子晶体光纤模式干涉仪的光纤环形激光器的新型氢传感器[62]。反射式光子晶体光纤模式干涉仪用作传感头和滤波器,该干涉仪通过熔合放电技术在光子晶体光纤两端形成两个塌陷区而制成,在 PCF 上涂覆 Pd/WO_3 氢敏薄膜用于氢传感,如图 14(c)所示。此外,不同构型的气体传感器被设计[63-66]用于实现高灵敏快速响应气体测量。

4 总结与展望

本文总结了 FRL 传感技术的传感物理机制,包括基于光纤光栅、迈克尔逊干涉仪、法布里-珀罗腔、

萨格奈克环以及马赫-曾德尔干涉仪多种结构结合的方案，重点介绍了在温度监测、电场分析、磁场监测和气体成分和浓度测量等各种场景中应用的FRL传感技术。新一代智能感知技术向着高速、高灵敏度、多参量、大动态范围的方向发展，以期提供更简易、高效、精确的测量方案。FRL传感技术凭借其窄线宽、高信噪比等特性在智能感知领域具有很强的实用性及应用价值。该领域的研究热点主要集中在以下三个方面：(1)多参量测量。激光传感受其本身特性的影响存在交叉敏感问题，如何通过结构设计，避免交叉敏感从而实现多参量解耦是值得进一步探究的课题；(2)扩大测量范围。受限于激光器的放大波段，激光传感动态范围相比传统的点式光纤传感而言较小，如何设计宽带的掺杂光纤实现大动态范围下的激光输出引人关注；(3)提高解调速度。受限于光谱仪的解调速度，其很难实现实时在线参量监测，探寻新的解调方案势在必行。

参考文献：

[1] Zhong J W, Zhang Y, Zhong Q Z, et al. Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication[J]. ACS Nano, 2014, 8(6): 6273-6280.

[2] Woyessa G, Nielsen K, Stefani A, et al. Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor[J]. Opt. Express, 2016, 24(2): 1206-1213.

[3] Liu Z, Gu X Y, Wu C Y, et al. Studies on the validity of strain sensors for pavement monitoring: A case study for a fiber Bragg grating sensor and resistive sensor [J]. Construction and Building Materials, 2022, 321: 126085.

[4] Sun L, Li C, Zhang C, et al. The strain transfer mechanism of fiber Bragg grating sensor for extra large strain monitoring [J]. Sensors, 2019, 19(8): 1851.

[5] Kang Z X, Sun J, Bai Y L, et al. Twin-core fiber-based erbium-doped fiber laser sensor for decoupling measurement of temperature and strain[J]. IEEE Sensors J., 2015, 15(12): 6828-6832.

[6] 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 Technol., 2018, 41: 212-216.

[7] Shao L Y, Liang J W, Zhang X P, et al. High-resolution refractive index sensing with dual-wavelength fiber laser[J]. IEEE Sensors J., 2016, 16(23): 8463-8467.

[8] Yin B, Sang G F, Yan R, et al. Wavelength- and intensity-demodulated dual-wavelength fiber laser sensor for simultaneous RH and temperature detection [J]. IEEE Access, 2020, 8: 52091-52099.

[9] 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 J., 2019, 19(20): 9215-9220.

[10] Li L C, Xia L, Xie Z H, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. Opt. Express, 2012, 20(10): 11109-11120.

[11] Gu S F, Feng D Q, Zhang T H, et al. Highly sensitive magnetic field measurement with taper-based in-line Mach-Zehnder interferometer and Vernier effect [J]. J. of Lightwave Technol., 2022, 40(3): 909-917.

[12] Liu Y X, Li X G, Zhang Y N, et al. Fiber-optic sensors based on Vernier effect [J]. Measurement, 2021, 167: 108451.

[13] Liu Y, Chen Y F, Zhou S P, et al. Fiber-optic meta-tip with multi-sensitivity resonance dips for humidity sensing [J]. Sensors and Actuators: Chemical, 2022, 352: 130957.

[14] He X L, Zhou J, Ma C, et al. Bend sensor based on Mach-Zehnder interferometer using single-mode fiber with helical structure[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2022, 34(1): 15-18.

[15] Lin W H, Shao L Y, Vai M I, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer sensor based on Er doped fiber peanut structure in fiber ring laser[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39(10): 3350-3357.

[16] Lin W, Zhou S, Shao L Y, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on Er doped up-taper and peanut-shaped fiber structure in fiber ring laser[J]. IEEE Access, 2021, 9: 128126-128132.

[17] Zhao Y F, Dai M L, Chen Z M, et al. Ultrasensitive temperature sensor with Vernier-effect improved fiber Michelson interferometer[J]. Opt. Express, 2021, 29(2): 1090-1101.

[18] Shao M, Zhang R, Gao H, et al. A high-sensitivity low-temperature sensor based on Michelson interferometer in seven-core fiber[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(23): 1293-1296.

[19] Deng M, Zhang T H, Nan X H, et al. Enhanced sensitivity of optical fiber vibration sensor based on radio-frequency Michelson interferometer[J]. Opt. Lett., 2021, 46(24): 6079-6082.

[20] Guo J H, Lian S P, Zhang Y, et al. High-temperature measurement of a fiber probe sensor based on the Michelson interferometer[J]. Sensors, 2022, 22(1): 289.

[21] Wang Z X, Tan Z W, Xing R, et al. Liquid level sensor based on fiber ring laser with single-mode-offset coreless-single-mode fiber structure[J]. Opt. and Laser Technol., 2016, 84: 59-63.

[22] Liang X, Liu Z B, Wei H, et al. Detection of liquid level with an MI-based fiber laser sensor using few-mode EMCF [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(8): 805-808.

[23] Li J, Yan H, Dang H T, et al. Structure design and application of hollow core microstructured optical fiber gas sensor: A review[J]. Optics and Laser Technol., 2021, 135: 106658.

[24] Zhou C, Zhou Q, Wang B, et al. High-sensitivity relative humidity fiber-optic sensor based on an internal-external Fabry-Perot cavity Vernier effect[J]. Opt. Express, 2021, 29(8): 11854-11868.

[25] Cui Y, Jiang Y, Zhang Y T, et al. Sapphire optical fiber high-temperature vibration sensor[J]. Opt. Express, 2022, 30(2): 1056-1065.

[26] 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.

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

[28] Shi J, Wang Y Y, Xu D G, et al. Remote gas pressure sensor based on fiber ring laser embedded with Fabry-Perot interferometer and Sagnac loop[J]. IEEE Photon. J., 2016, 8(5): 6804408.

[29] 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 J., 2022, 22(7): 6606-6611.

[30] Wei H M, Krishnaswamy S. Adaptive fiber-ring lasers based on an optical fiber Fabry-Perot cavity for high-frequency dynamic strain sensing[J]. Appl. Opt., 2020, 59(2): 530-535.

[31] 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 Trans. on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9512407.

[32] Ruan J. Fiber curvature sensor based on concave-heterotypic cascaded fiber Sagnac interferometer[J]. Microwave and Optical Technol. Lett., 2020, 62(11): 3645-3649.

[33] Cai X, Luo J, Fu H Y, et al. Temperature measurement using a multi-wavelength fiber ring laser based on a hybrid gain medium and Sagnac interferometer[J]. Opt. Express, 2020, 28(26): 39933-39943.

[34] Chen H L, Zhu X P, Jiang C, et al. High sensitivity temperature and pressure sensor based on cascaded Fabry-Perot and Sagnac interferometers[J]. Instrumentation Science & Technol., 2022, 50(4): 422-436.

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

[36] Shi J, Wang Y Y, Xu D G, et al. Temperature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2016, 28(7): 794-797.

[37] Cai X, Luo J, Fu H Y, et al. Temperature measurement using a multi-wavelength fiber ring laser based on a hybrid gain medium and Sagnac interferometer[J]. Opt. Express, 2020, 28(26): 39933-39943.

[38] 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 Photon. J., 2021, 13(2): 1-12.

[39] Cui Y, Shum P P, Hu D J J, et al. Sagnac interferometer based temperature sensor by using selectively filled photonic crystal fiber[C]// Proc. of the 25th IEEE Photon. Conf. (IPC), 2012.

[40] Li X G, Zhao Y, Zhou X, et al. High sensitivity all-fiber Sagnac interferometer temperature sensor using a selective ethanol-filled photonic crystal fiber[J]. Instrumentation Science & Technol., 2018, 46(3): 253-264.

[41] Liu C, Zhang W, Dong M, et al. Dual-parameter sensing characterisitics of long period fiber grating cascaded with fiber MZ structure fabricated by CO_2 laser[J]. Infrared and Laser Engin., 2017, 46(9): 0922001.01-0922001.07.

[42] Yadav T K, Mustapa M A, Abu Bakar M H, et al. Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor [J]. J. of the European Optical Society-Rapid Publications, 2014, 9: 14024.

[43] Liu J X, Wang M G, Liang X, et al. Erbium-doped fiber ring laser based on few-mode-singlemode-few-mode fiber structure for refractive index measurement[J]. Opt. and Laser Technol., 2017, 93: 74-78.

[44] Yao Q Q, Meng H Y, Wang W, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2014, 209: 73-77.

[45] Zhao Y Y, Liu S, Luo J X, et al. Torsion, refractive index, and temperature sensors based on an improved helical long period fiber grating[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(8): 2504-2510.

[46] Zheng J W, Liu B, Zhao L L, et al. An optical sensor designed from cascaded anti-resonant reflection waveguide and fiber ring-shaped structure for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. IEEE Photon. J., 2022, 14(1): 6812406.

[47] Chen T, Zhang H, Lin W, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on Vernier effect in coupled micro-ring resonators[J]. J. of Lightwave Technol., 2022, 40(4): 1216-1223.

[48] Nan T, Liu B, Wu Y F, et al. Ultrasensitive strain sensor based on Vernier-effect improved parallel structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. Opt. Express, 2019,

27(12)：17239-17250.

[49] Pan R，Yang W L，Li L J，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 Sensors J.，2021，21(19)：21577-21585.

[50] Xiong L，Guo Y X，Jiang G Z，et al. Six-dimensional force/torque sensor based on fiber Bragg gratings with low coupling [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics，2021，68(5)：4079-4089.

[51] Zhang W J，Wu X Q，Li S L，et al. Highly sensitive strain sensing using a polarization-maintaining photonic crystal fibre based Mach-Zehnder interferometer [J]. J. of Modern Optics，2022，69(4)：192-199.

[52] Jaddoa M F，Razak M Z A，Salim M A M，et al. Tunable single wavelength erbium-doped fiber ring laser based on in-line Mach-Zehnder strain[J]. Optik，2016，127(20)：8326-8332.

[53] Lin W，Sun S，Shao L-Y，et al. Tunable electro-optical and thermal optical modulator based on a liquid crystal-filled side hole fiber in fiber ring laser[J]. IEEE Sensors J.，2021，21(24)：27510-27517.

[54] Lin W H，Zhao F，Shao L Y，et al. Temperature sensor based on Er-doped cascaded-peanut taper structure in-line interferometer in fiber ring laser[J]. IEEE Sensors J.，2021，21(19)：21594-21599.

[55] Mak K F，Shan J，Ralph D C. Probing and controlling magnetic states in 2D layered magnetic materials[J]. Nature Rev. Phys.，2019，1(11)：646-661.

[56] Bai X K，Yuan J，Gu J，et al. Magnetic field sensor using fiber ring cavity laser based on magnetic fluid [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2016，28(2)：115-118.

[57] Shi J，Wang Y Y，Xu D G，et al. Remote magnetic field sensor based on intracavity absorption of evanescent field[J]. IEEE Photon. J.，2016，8(2)：6801067.

[58] Deng M，Liu D H，Huang W，et al. Highly-sensitive magnetic field sensor based on fiber ring laser[J]. Opt. Express，2016，24(1)：645-651.

[59] Wei F F，Liu D J，Mallik A K，et al. Temperature-compensated magnetic field sensing with a dual-ring structure consisting of microfiber coupler-Sagnac loop and fiber Bragg grating-assisted resonant cavity[J]. Appl. Opt.，2019，58(9)：2334-2339.

[60] 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]. Opt. Express，2021，29(6)：8763-8769.

[61] 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 J.，2022，22(7)：6606-6611.

[62] Zhang Y N，Zhang A Z，Han B，et al. A reflective hydrogen sensor based on fiber ring laser with PCF modal interferometer[J]. J. of Optics，2018，20(6)：605401.

[63] Lin H F，Xu Y Y，Mumtaz F，et al. Cascaded Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for gas pressure measurement[C]// Proc. of the 18th Inter. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOCN)，2019.

[64] Cheng X，Dash J N，Gunawardena D S，et al. Silicone rubber based highly sensitive fiber-optic Fabry-Perot interferometric gas pressure sensor[J]. Sensors，2020，20(17)：4927.

[65] Guo X S，Ye W H，Jiang C，et al. High sensitivity gas pressure sensor based on two parallel-connected Fabry-Perot interferometers and Vernier effect[J]. Measurement Science and Technology，2021，32(12)：125124.1-125124.10.

[66] Li J L，Hong W L，Zhao C L，et al. Multi-point optical fiber hydrogen sensor with Fabry-Perot interferometers using arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica，2021，41(13)：125124.

作者简介：

林伟浩(1996－)，男，博士研究生，2019年毕业于南方科技大学光电信息科学与工程专业，现为澳门大学-南方科技大学联合培养博士研究生，主要研究方向为光纤传感和光纤激光传感；

孙思明(1998－)，男，2020年毕业于华中科技大学光电信息科学与工程专业，现为硕士研究生，主要研究方向为分布式光纤传感；

邵理阳(1979－)，男，浙江省金华市人，2008年获得浙江大学光学工程专业博士学位，现为研究员；主要研究方向包括分布式光纤传感技术及工程应用、天地海一体化智能网联关键技术及应用等；已在国际重要期刊及会议上发表学术论文共200余篇，其中被SCI检索147篇(第一作者及通信作者论文73篇)，Google Scholar总引5309次，H因子41；授权发明专利10余项；主持科技部、基金委、省市和企业研发课题10余项。