

引用本文: 贾振安, 张恒, 高宏, 等. 光纤激光传感器结构发展综述[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 1-6.

光纤激光传感器结构发展综述

贾振安^{1, 2, 3, 4}, 张恒^{1, 2, 3, 4*}, 高宏^{1, 2, 3, 4}, 禹大宽^{1, 2, 3, 4}, 刘钦朋^{1, 2, 3, 4}

(1. 西安石油大学 理学院, 西安 710065; 2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 西安 710065;

3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 西安 710065; 4. 中国石油天然气集团有限公司 测井重点实验室, 西安 710065)

摘要: 光纤激光传感技术是光纤传感技术中的重要组成部分。首先介绍了光纤激光传感技术的原理, 然后分析了基于单一结构和双结构的 10 种光纤激光传感器的原理和特性, 并对比了 2 种传感结构的应用情况和温度灵敏度, 最后从解调方式、多参量测量以及提升检测范围等 3 个方面对光纤激光传感技术进行了总结和展望。

关键词: 光纤传感; 光纤光栅; 迈克尔逊干涉仪; 法布里-珀罗干涉仪; 萨格奈克干涉仪; 马赫-曾德尔干涉仪; 光纤激光传感器

中图分类号: TN253 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2024)01-0001-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review on the development of fiber laser sensor structures

JIA Zhen'an^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Heng^{1, 2, 3, 4*}, GAO Hong^{1, 2, 3, 4}, YU Dakuan^{1, 2, 3, 4}, LIU Qinpeng^{1, 2, 3, 4}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. China National Petroleum Corporation Key Laboratory of logging, Xi'an 710065, China)

Abstract: Fiber laser sensing technology is an important part of fiber sensing technology. Firstly, the principle of fiber laser sensing technology is introduced, then the principle and characteristics of ten kinds of fiber laser sensors based on single structure and double structure are analyzed, and the application and temperature sensitivity of two kinds of sensor structures are compared. Finally, the fiber laser sensing technology is summarized and prospected from three aspects, such as demodulation mode, multi-parameter measurement and improved detection range.

Key words: optical fiber sensing, fiber grating, Michelson interferometer, Fabry-Perot interferometer, Sagnac interferometer, Mach-Zendel interferometer, fiber laser sensor

0 引言

随着时代的发展, 光纤传感技术在岩土工程、飞行器结构变形、生物医学工程、海洋物理和油气勘探等领域被广泛应用。光纤传感技术根据不同领域对不同物理量检测的需求, 衍生出不同的传感结构, 包括

收稿日期: 2023-04-28。

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093)资助。

作者简介: 贾振安(1959—), 男, 陕西咸阳人, 教授, 硕士生导师。主持或参加国家自然科学基金项目、国家“863 计划”和陕西省“13115”工程等国家和省部级科研项目共 15 项; 曾荣获国家技术发明奖二等奖、陕西省科学技术一等奖和西安市科学技术一等奖等奖项。

* 通信作者: 张恒(1997—), 硕士, 主要研究方向为光纤光栅传感。



光纤布喇格光栅(FBG)、法布里-珀罗干涉仪(FPI)、萨格奈克(Sagnac)干涉仪、迈克尔逊干涉仪(MI)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)等。随着人们对传感器在各种环境下的分辨率和灵敏度要求的进一步提高, 基于普通光源的光纤传感结构逐渐无法满足要求, 为此基于光纤激光器的传感技术开始得到广泛关注。

光纤激光传感技术是光纤传感技术中的重要组成部分。相较于普通光源, 光纤激光器产生的激光具有信噪比高、光谱线宽窄以及功率大等特点, 可以使传感器实现高灵敏、高分辨率的检测以及传感信号的远距离传输。将不同光纤传感结构与光纤激光器相结合, 可以设计出用于测量不同物理参量且具有高分辨率、高灵敏度、大动态范围等特点的光纤激光传感器,

贾振安, 张恒, 高宏, 等: 光纤激光传感器结构发展综述

在微弱信号的采集与长距离信号的传输上起到重要的作用。本文主要对光纤激光传感器结构发展进行分析研究。

1 光纤激光传感器的原理

光纤激光传感器的原理是将传感单元加入到光纤激光器内, 当外界物理量作用传感单元时, 出射的激光波长、偏振或模式发生改变, 通过检测这些激光参量的变化得到外界物理量的变化情况。

根据光纤激光器的类型, 可以分为光纤线形激光器和光纤环形激光器, 结构分别如图 1、图 2 所示。基于光纤激光器的传感结构主要分为三大模块。模块一为光源模块, 主要用于产生激光, 产生激光的三要素是泵浦源、增益介质、谐振腔; 由波长为 980 nm 的泵浦光为增益介质提供能量, 实现受激辐射和受激吸收, 当光信号在由反射镜和传感单元构成的谐振腔中往返运行多次发生振荡时被放大并产生激光。模块二为检测模块, 主要由光谱分析仪(OSA)构成, 用于检测激光波长的偏移量。模块三为传感模块, 主要由传感单元构成, 该传感单元可以是各种光纤传感结构(如 FBG、MZI、Sagnac 干涉仪等), 用于检测外界环境的变化。传感单元将外界物理量的变化转化为激光波长的变化, 当外界物理量对传感单元作用时, 通过 OSA 对激光波长进行检测就可以得到外界物理量的变化。

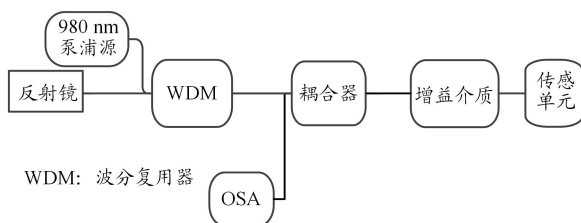


图 1 光纤线形激光器的传感结构图

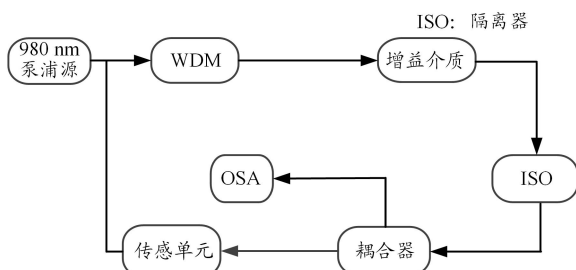


图 2 光纤环形激光器的传感结构图

2 光纤激光传感器结构分析

根据传感器结构数量, 光纤激光传感器可分为基

于单一结构的光纤激光传感器和基于双结构的光纤激光传感器。其中, 基于单一结构的光纤激光传感器包括基于 FBG 的光纤激光传感器、基于 MZI 的光纤激光传感器、基于 FP 腔的光纤激光传感器、基于 Sagnac 干涉仪的光纤激光传感器、基于 MI 的光纤激光传感器等; 基于双结构的光纤激光传感器包括基于双 Sagnac 干涉仪级联的光纤激光传感器、基于级联 FPI 和 Sagnac 干涉仪的光纤激光气体压力传感器、基于 FBG 和 MI 的光纤激光传感器、基于级联 FPI 和 FBG 的光纤环形激光传感器、基于级联 FBG 的光纤激光传感器。

2.1 基于单一结构的光纤激光传感器

2.1.1 基于 FBG 的光纤激光传感器

FBG 在传感领域被广泛应用^[1-5], 而基于 FBG 的光纤激光传感器在近些年也得到了广泛的研究。

2017 年, YANG R T 等人^[6]提出了一种基于再生 FBG 的掺铒光纤环形激光传感器方案, 采用再生 FBG 作为激光传感器件的传感单元, 经过热处理后, 使其在 300~900 °C 的高温环境下可以进行温度传感检测, 其温度灵敏度为 15.5 pm/°C, 相关系数为 0.999。

2019 年, HUANG F Q 等人^[7]提出一种基于 FBG 的光纤激光器在高温环境中的传感应用方案, 该方案将 FBG 进行特殊处理, 使其可以在高温环境下进行传感检测, 其温度灵敏度为 15.9 pm/°C。

2020 年, JAHARUDIN N A N 等人^[8]设计了一种基于 FBG 增强光信噪比的线性腔光纤激光温度传感器, 结构图如图 3 所示。该传感器在光纤激光器的谐振腔中加入 FBG, 构成线形谐振腔作为传感单元, 其温度灵敏度为 11.7 pm/°C, 激光器的信噪比为 55 dB。由于信噪比提高, 该传感器的探测能力也得到提高。

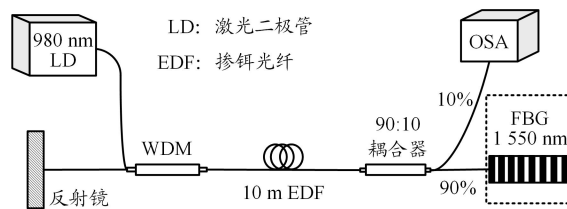


图 3 基于 FBG 增强光信噪比的线性腔光纤激光温度传感器结构图

2.1.2 基于 MZI 的光纤激光传感器

全光纤 MZI 在传感领域有着较为广泛应用^[9-12], 故基于 MZI 的光纤激光传感器也得到了进一步的研究。

2016 年, CHAO L 等人^[13]设计了一种基于 MZI 的光纤激光传感器, 其传感单元是 MZI。MZI 的主要结构

是 2 段单模光纤和 1 段多芯光纤, 多芯光纤可以获得高相位灵敏度, 从而提高传感灵敏度。该传感器的应变灵敏度可以达到 $2.21 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 折射率灵敏度可以达到 $113.27 \text{ nm}/\text{RIU}$, 曲率灵敏度可以达到 $2.55 \text{ nm}/\text{m}$ 。

2020 年, NIU P P 等人^[14]设计了基于开放式微腔 MZI 和光纤环形激光器的光纤折射率传感器, 结构图如图 4 所示。开放式微腔 MZI 由一根微小的单模光纤与多模光纤进行拼接形成, 将待测液体置于微腔中进行液体折射率的检测。该传感器的折射率灵敏度为 $-2\ 947.818 \text{ nm}/\text{RIU}$, 可以用于生物化学、物理等领域的流控测量。

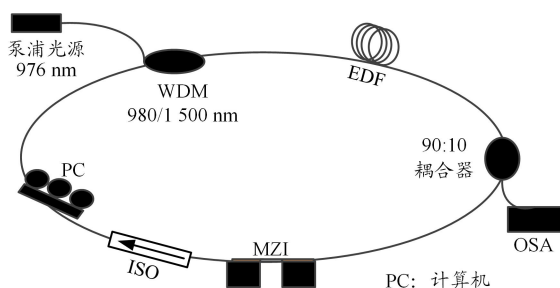


图 4 基于开放式微腔 MZI 和光纤环形激光器的光纤折射率传感器结构图

2023 年, CONTRERAS-TERAN M A^[15]等人设计了基于 MZI 的高分辨率光纤激光应变传感器, 结构如图 5 所示。其中, MZI 由 3 段单模光纤进行错位熔接制成。该传感器的应变灵敏度达到了 $5.233\ 2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 线性拟合度为 0.998 8。

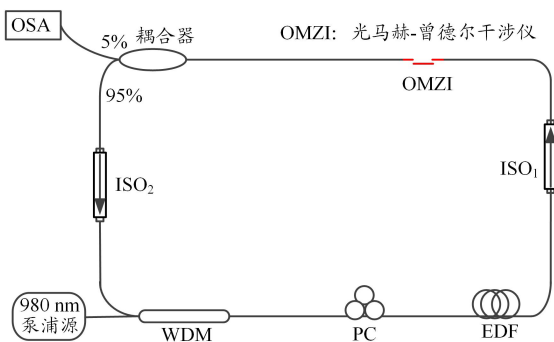


图 5 基于 MZI 的高分辨率光纤激光应变传感器结构图

2.1.3 基于 FP 腔的光纤激光传感器

FP 腔在传感领域有着较为广泛的应用^[16-18], 基于 FP 腔的光纤激光传感器也得到了发展。

2020 年, WEI H M 等人^[19]设计了用于高频动态应变传感的基于 FP 腔的光纤激光传感器, 使用 FP 腔作为光纤激光传感器的滤波器、反射镜以及传感单元,

当外界物理量作用于 FP 腔时就可以导致激光输出波长的变化。该传感器在检测超声波时的灵敏度较高。

2.1.4 基于 Sagnac 干涉仪的光纤激光传感器

Sagnac 干涉仪的本质是对萨格奈克效应的一种应用, 其结构主要由保偏光纤和光纤耦合器构成, 常常被用于检测温度变化^[20-23]。

2019 年, OMAR M A 等人^[24]设计了基于 Sagnac 环的光纤环形激光温度传感器, 将由保偏光纤构成的 Sagnac 干涉仪作为滤波器和传感单元。由于温度的变化会影响保偏光纤的双折射系数从而影响激光波长的变化, 故该温度传感器的温度灵敏度为 $1.196\ 5 \text{ nm}/\text{°C}$ 。

2020 年, YANG F 等人^[25]设计了基于 Sagnac 环的光纤环形激光器的曲率传感器, 将 Sagnac 环置于光纤环形腔激光器中, 起到滤波和传感的作用。相较于普通光源下 Sagnac 干涉仪对曲率的检测, 处于激光光源下的 Sagnac 环对曲率检测的分辨率得到了提高, 达到了 $6 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ 。

2021 年, MENG J G 等人^[26]设计了一种基于 Sagnac 干涉仪和光纤环形激光器的振动传感器, 该传感器的主要结构由 Sagnac 干涉仪和光纤环形激光器构成, 其 Sagnac 干涉仪由 2 段单模光纤(SMF)与保偏光纤构成, 作为滤波和传感单元。该传感器可以准确获得振动信号的频率, 相对误差为 1% 左右。

2.1.5 基于 MI 的光纤激光传感器

MI 在微小位移和微小振动上的检测精度较高, 也可应用于温度和折射率等物理量的测量^[27-29]。

2015 年, LIANG X 等人^[30]设计了基于 MI 的光纤激光液位检测传感器, 该传感器可以用于液体折射率和液位的传感测量。其中, MI 作为传感单元, 由 SMF 和少模光纤(EMCF)构成。该传感器测量折射率较高的液体时的灵敏度较高, 当测量折射率为 1.393 的液体时, 液位传感灵敏度可以达到 $50.6 \text{ pm}/\text{mm}$, 液体测量折射率灵敏度可以达到 $329.222 \text{ pm}/(\text{mm} \cdot \text{RIU}^{-1})$ 。

2.2 基于双结构的光纤激光传感器

2.2.1 基于双 Sagnac 干涉仪级联的光纤激光传感器

2021 年, LIN W H 等人^[31]设计了级联光纤 Sagnac 干涉仪的光纤激光温度传感器, 如图 6 所示。在光纤激光器的谐振腔内加入 2 个 Sagnac 干涉仪, 作为传感器的滤波单元和传感单元。该传感器的主要原理是通过 2 个自由光谱范围不同的 Sagnac 干涉仪形成游标效应, 最终提高传感器的灵敏度, 其温度灵敏度可以达到 $-4.031 \text{ nm}/\text{°C}$, 是单一 Sagnac 结构传感器灵敏度的 6 倍。

贾振安, 张恒, 高宏, 等: 光纤激光传感器结构发展综述

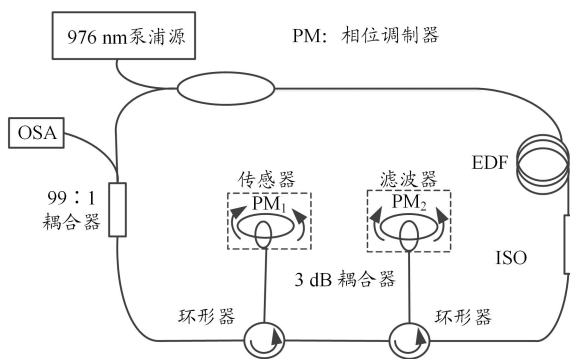


图6 级联光纤 Sagnac 干涉仪的光纤激光温度传感器结构图

2.2.2 基于级联 FPI 和 Sagnac 干涉仪的光纤激光气体压力传感器

2016年,SHIJ等人设计^[32]了基于级联 FPI 和 Sagnac 干涉仪的光纤激光气体压力传感器,在光纤激光器中加入 FPI 作为传感器的传感单元,如图7所示。该传感器的气体灵敏度达到了 -9.69 nm/kPa ,同时具有45 dB的高信噪比,这证明了该传感器在远程监测和灵敏度方面的性能较高。

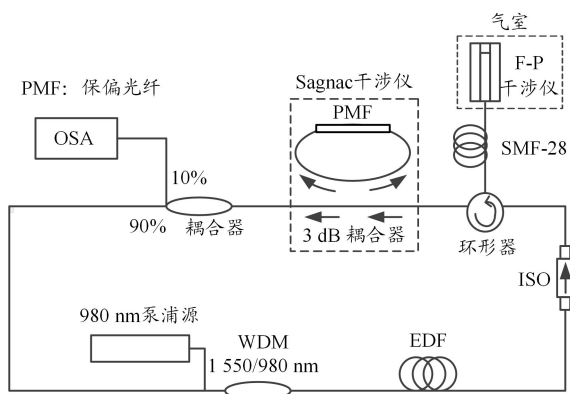


图7 基于级联 FPI 和 Sagnac 干涉仪的光纤激光气体压力传感器结构图

2.2.3 基于 FBG 和 MI 的光纤激光传感器

2021年,WANG X等人^[33]设计了基于复合腔光纤激光器的温度传感器。在光纤激光器中加入 MI 构成复合腔光纤激光器,并使用 FBG 和啁啾光栅(CFBG)作为 MI 的2个反射面,如图8所示。该传感器通过将光纤光栅受外界温度而导致的波长变化转化为臂长的变化,最终经 CFBG 将其转化为光纤激光器的拍频信号漂移。该传感器用于温度传感测量时的温度灵敏度可以达到 $8.03 \text{ MHz/}^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.4 基于级联 FPI 和 FBG 的光纤环形激光传感器

2021年,YANG X C等人^[34]设计了基于级联 FPI 和 FBG 光纤环形激光传感器,采用 FPI 和 FBG 作为

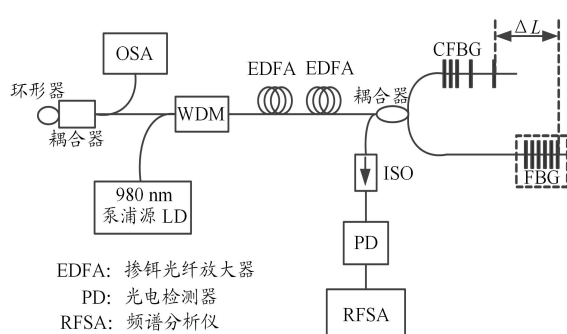


图8 基于复合腔光纤激光器的温度传感器结构图

反射式传感头,如图9所示。该传感器基于其激光强度对温度敏感,但对应变不敏感的特性,实现了双参量传感测量,温度灵敏度达到了 $24.9 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$,应变灵敏度达到了 $1 \text{ pm/}\mu\epsilon$,在长距离传感领域具有广泛的应用前景。

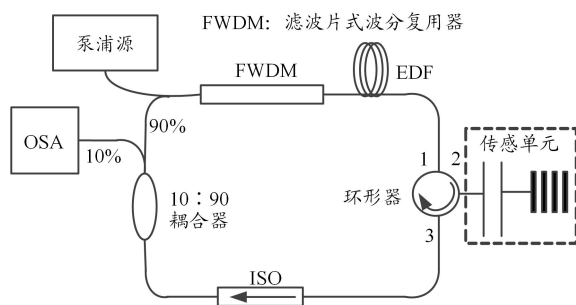


图9 基于级联 FPI 和 FBG 的光纤环形激光传感器的系统图

2.2.5 基于级联 FBG 的光纤激光传感器

2020年,WANG X等人^[35]设计了基于级联 FBG 的光纤激光传感器,该传感单元为 FPI,主要由2个相同的 FBG 级联构成,如图10所示。该传感器通过 FP 腔和激光器的线性腔产生游标效应,其温度灵敏度极高,达到了 $299.17 \text{ kHz/}^{\circ}\text{C}$ 。

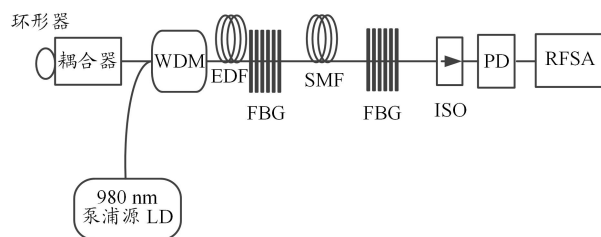


图10 基于级联 FBG 的光纤激光传感器结构图

2.3 小结

通过对近几年光纤激光传感器的研究分析可知,双结构的光纤激光传感器在传感领域逐渐兴起,其在传感测量领域可以实现双参量的测量,具体情况

如表 1 所示。单一结构光纤激光传感器和双结构光纤激光传感器的温度灵敏度对比情况如表 2 所示。

表 1 双结构光纤激光传感器在双参量测量的应用情况

传感器结构	应用情况
FP+FBG	用于温度与应变
长周期光纤光栅+FBG	用于温度与应变
多模干涉仪+FBG	用于液位和温度

表 2 2 种结构的光纤激光传感器温度灵敏度的对比情况

传感器结构	类型	灵敏度
单一结构	FBG 干涉仪	-4.031 pm/℃
	Sagnac 干涉仪	1.196 5 nm/℃
	FPI	0.008 nm/℃
双结构	Sagnac 干涉仪级联	-3.32 nm/℃
	级联 FPI+FBG 干涉仪	24.9 pm/℃
	级联 FPI+Sagnac 干涉仪	10.28 nm/℃

3 结束语

本文分析了近几年来与光纤激光传感技术相关的研究成果,对基于不同传感结构的光纤激光传感器进行了介绍。通过对比单一结构和双结构的光纤激光传感器可知,双结构的光纤激光传感器在提高传感器灵敏度和多参量测量方面的应用价值更高。

关于光纤激光传感器的研究热点主要有以下 3 个方面:1)解调方面。由于光谱仪的解调速度慢、成本高,导致其很难应用于实时传感监测与实际环境中,故如何提高解调速度是目前研究人员较为关注的问题。2)多参量测量方面。多参量的传感检测既可以用于单参量的传感检测也可以用于多参量的传感检测,降低了成本的同时又减少了测量系统的误差,但多参量的交叉敏感问题成为多参量传感器急需解决的问题。3)检测范围方面。与其它光纤传感相比,光纤激光器的放大波段受掺杂光纤的影响,检测范围较小。因此,如何使光纤激光器输出大动态范围的光是一个值得关注的问题。

参考文献:

[1] QIN Q, ZHU W, XI B, et al. Magnetic flux leakage detection based on a sensitivity-enhanced fiber Bragg grating magnetic field sensor [J]. Applied Optics, 2023, 62(16): E62-E69.

[2] KHAN R Y M, ULLAH R, FAISAL M. Design and development of type-I FBG based high temperature sensor along with sensing probes[J]. Physica Scripta, 2023, 98(4): 045515-1-045515-11.

[3] YU H, WANG X, GAO W, et al. Dual-parameter measurements of curvature and strain using cladding-etched two-mode fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 78: 103319-1-103319-7.

[4] 贾振安,任杰,党硕,等. 光纤布拉格光栅热式流量传感技术研究[J]. 红外,2022,43(8):17-25.

[5] 贾振安,党硕,禹大宽,等. 光纤光栅振动传感器结构设计研究[J]. 红外,2022,43(9):20-27.

[6] YANG R T, ZHU L Q, ZHANG Y M, et al. Erbium-doped fiber ring laser sensor for high temperature measurements based on a regenerated fiber Bragg grating[J]. Fiber and Integrated Optics, 2017, 36(6): 252-261.

[7] HUANG F Q, CHEN T S, XU 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.

[8] 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): 015101-1 - 015101-6.

[9] 陆杭林,邵来鹏,张帆,等. 光纤 MZI 传感器传感机理与传感应用研究进展[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2020,40(6):1-17.

[10] 宫顺顺,李丽君,蒋露,等. 一种全光纤 Mach-Zehnder 干涉式温度传感器设计[J]. 中国新通信,2017,19(2):26-28.

[11] 沈涛,孙滨超,冯月. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的温度与位移传感器的传感特性[J]. 北京工业大学学报,2015,41(12):1872-1877.

[12] YE C, CHEN Z, TONG Z R. All fiber sensor based on Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of temperature and refractive index[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(6): 438-443.

[13] CHAO L, TIGANG N, JING L, et al. Fiber-optic laser sensor based on all-fiber multipath Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(18): 1908-1911.

[14] NIU P P, JIANG J, LIU K, et al. Low detection limit refractive index sensor based on open microcavity Mach-Zehnder interferometer and fiber ring laser[C]//SPIE. Advanced Sensor Systems and Applications X, Bellingham: SPIE, 2020, 11554: 42-47.

[15] CONTRERAS-TERAN M A, JAUREGUI-VAZQUEZ D, GALLE-GOS-ARELLANO E, et al. High-resolution strain fiber laser-sensor based on core-offset mach-zehnder interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(5): 055202-1-055202-9.

[16] 马行超,张熙梓,郭允,等. 基于并联法布里 - 珀罗干涉仪游标效应的增敏光纤湿度传感器[J]. 光电子·激光,2023,34(2):113-119.

[17] WANG D, WU Y, ZHU L, et al. High sensitivity fiber optic acceleration sensor based on Fabry-Perot interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 72: 102989-1-102989-8.

[18] 李爱武,单天奇,国旗,等. 光纤法布里 - 珀罗干涉仪高温传感器研究进展[J]. 中国光学(中英文),2022,15(4):609-624.

[19] WEI H M, KRISHNASWAMY S. Adaptive fiber-ring lasers based on an optical fiber Fabry-Perot cavity for high-frequency dynamic strain sensing[J]. Applied Optics, 2020, 59(2): 530-535.

[20] 范维文,万洪丹,陈彧芳,等. 基于二模 - 单模微纳光纤 Sagnac 环的

贾振安, 张恒, 高宏, 等: 光纤激光传感器结构发展综述

高灵敏度光纤温度传感器 [J]. 光学学报, 2022, 42 (16): 1606001-1-1606001-7.

[21] QIANG G, ZHU J H, CUI Y Y, et al. Fiber optic temperature sensor utilizing thin PMF based Sagnac loop [J]. Optics Communications, 2022, 502: 127417-1-127417-5.

[22] LIU S, LU G, LV D, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with cascaded Sagnac loops based on harmonic vernier effect [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 66: 102654-1-102654-6.

[23] LU H L, YUE Y L, DU J, et al. Temperature and liquid refractive index sensor using P-D fiber structure-based Sagnac loop[J]. Optics Express, 2018, 26(15): 18920-18927.

[24] OMAR M A, CHOLAN N A, ABDULRAHMAN A M, et al. Fiber laser temperature sensor based on Sagnac interferometer[J]. Journal of Physics, Conference Series, 2019, 1371(1): 012016-1-012016-6.

[25] YANG F, WU Y J, SHI J, et al. Curvature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102341-1-102341-5.

[26] MENG D J, MIAO C Y, LI X G, et al. A vibration sensor based on Sagnac interferometer and fiber ring laser for fault diagnosis of bearing[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102554-1-102554-7.

[27] 李永超, 温晓东, 谭竣耀, 等. 基于迈克尔逊干涉仪的光纤微流速传感器[J]. 光学技术, 2019, 45(3): 303-309.

[28] 曹玉龙, 杨飞, 徐丹, 等. 基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的分布式光纤振

动传感器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 203-209.

[29] 闫旭, 傅海威. 光纤 Michelson 干涉仪型折射率和温度同时测量传感器[J]. 压电与声光, 2016, 38(6): 970-973.

[30] LIANG X, LIU Z, WEI H, et al. Detection of liquid level with an MI-based fiber laser sensor using few-mode EMCF [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 805-808.

[31] 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.

[32] SHI J, WANG Y, XU D, et al. Remote gas pressure sensor based on fiber ring laser embedded with Fabry-Perot interferometer and sagnac loop [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-8.

[33] WANG X, WANG L, WANG J, et al. High sensitivity interrogation system of fiber Bragg grating sensor with composite cavity fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142(1): 107228-1-107228-6.

[34] 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.

[35] WANG X, CHEN T W, MENG D L, et al. A simple FBG Fabry-Perot sensor system with high sensitivity based on fiber laser beat frequency and vernier effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(1): 71-75.