

光纤激光传感系统的研究进展

裴 丽^{1,2} 翁思俊^{1,2} 吴良英^{1,2} 王建帅^{1,2} 刘 超^{1,2}

¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

²北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

摘要 光纤激光传感系统作为一种新型的光纤传感技术, 结合了光纤传感的高灵敏度、可分布式测量和不易受电磁干扰等优点, 以及光纤激光器的窄线宽和高光信噪比等优势, 能够很好地应用于油田、矿山、桥梁、电力以及飞机等领域的测量和安全监控。从两个方面介绍了目前光纤激光传感系统的研究进展, 一方面是基于单参量测量的光纤激光传感系统, 系统所探测的参量包含了温度、应变、折射率、电流、声波和风速等; 另一方面是基于双参量测量的光纤激光传感系统, 主要是解决温度与横向应力、应变和折射率等交叉敏感的问题。

关键词 传感器; 光纤传感; 光纤激光器; 单参量测量; 双参量测量

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0700001

Progress in Optical Fiber Laser Sensing System

Pei Li^{1,2} Weng Sijun^{1,2} Wu Liangying^{1,2} Wang Jianshuai^{1,2} Liu Chao^{1,2}

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network,
Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract As a new type of optical fiber sensing technology, the optical fiber laser sensing system combines the advantages of fiber sensors of high sensitivity, distributed measurement capability and less susceptible to electromagnetic interference, with the advantages of fiber lasers of narrow linewidth and high optical signal to noise ratio, so it is used in measurement and security monitoring in the field of oil, mining, bridges, electricity, aircraft and so on. The research progress of optical fiber laser sensing system is introduced from two aspects. One is the optical fiber laser sensing system for the single-parameter measurement, including temperature, strain, refractive index, current, acoustic wave, wind speed and so on; the other is the optical fiber laser sensing system for the dual-parameter measurement, which is mainly used to solve the problem of cross sensitivity of temperature and transverse stress, strain and refractive index.

Key words sensors; optical fiber sensing; optical fiber lasers; single-parameter measurement; dual-parameter measurement

OCIS codes 280.3420; 060.2370; 060.3510; 230.2285

1 引 言

自 21 世纪以来, 人类社会逐渐步入了信息时代, 出现了各类新型的信息技术。物联网作为新一代信息技术的重要成员, 对推动人类社会的发展起着至关重要的作用。物联网是一个基于互联网和传统电信网的信息承载体, 是让所有能够被独立寻址的普通物理对象实现互联互通的网络, 主要分为感知识别层、网络构建层、管理服务层及综合应用层^[1]。感知识别层作为物联网的核心基础, 主要是由各种类型的传感器组成, 因此, 传感器的性能直接影响物联网的发展。

光纤传感作为发展较为迅速的传感技术, 不仅实现了“传感”合一, 而且具有灵敏度高、动态范围大、结构

收稿日期: 2016-01-08; 收到修改稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61525501, 61275076)

作者简介: 裴 丽(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事光器件、光纤传感及光纤通信等方面的研究。

E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

简单、可分布式测量及不易受电磁干扰等优点,能够广泛应用于油田、电力以及环境等领域的测量和安全监控^[2-4]。光纤激光传感系统作为一种新型的光纤传感技术,主要是将光纤激光器的谐振腔或滤波器作为传感元件,通过测量激光器的波长或拍频等参量,实现对温度、应变和折射率等参量的传感测量。光纤激光传感系统不仅保留了光纤传感的优势,而且融合了光纤激光器的光信噪比(OSNR)高和线宽窄的优点,具有很大的应用前景。

本文介绍了目前光纤激光传感系统的研究进展,主要包括如下两个方面:1) 基于单参量测量的光纤激光传感系统,系统所探测的参量包含温度、应变、折射率、电流、声波和风速等;2) 基于双参量测量的光纤激光传感系统,主要是解决温度与横向应力、应变和折射率等交叉敏感的问题。

2 基于单参量测量的光纤激光传感系统

经过近几十年的发展和研究,基于单参量测量的光纤传感系统的类型越来越丰富,其所能测量的单参量已包括如温度、应变和折射率等。目前该类系统在油田、矿山、桥梁、电力以及飞机等领域的测量和安全监控方面都得到了广泛应用。

2.1 温度和应变等参量测量

1995年, Koo等^[5]提出了一种光纤激光应变传感系统,将两个串联的光纤布拉格光栅作为激光器的谐振器和传感元件,并利用干涉解调技术,实现了对应变的高灵敏度测量。2008年, Cranch等^[6]分析了分布式反馈光纤激光应变传感系统的稳态特性和噪声特性,研究了传感系统的解调技术,探讨了传感系统的多路传感性能,为分布式反馈光纤激光应变传感系统的设计和应用奠定了很好的基础。2009年, Zhang等^[7]提出了一种高灵敏分布布拉格反射光纤激光位移传感系统。该激光器的谐振腔被放置在悬梁臂上,使得位移转变为横向力,从而改变了光纤的双折射系数,引起激光器两个偏振态拍频变化,获得了灵敏度高达0.402 GHz/mm的位移传感测量。2012年, Jin等^[8]将双偏振光纤光栅激光器应用于温度测量中,通过测量由温度引起的激光器输出波长的两个偏振态拍频的变化量,实现了灵敏度为-78.46 kHz/°C的温度高灵敏测量;而且,该激光传感系统对应变不敏感,能够对温度进行准确的测量,在温度传感领域具备很大的优势。2014年,本课题组^[9]提出了一种基于光纤声光可调谐滤波器(AOTF)的光纤激光应变传感系统,结构如图1所示。该激光传感系统通过利用光纤声光可调谐滤波器的带阻光谱,改变激光器的输出波长。当加载在光纤声光可调谐滤波器的轴向应变发生变化时,激光器的输出波长也将发生变化。该激光传感系统结合了光纤声光可调谐滤波器的高灵敏轴向应变传感特性和激光器的高光信噪比、窄线宽的优点,其灵敏度高于大多数其他类型的光纤应变传感器,如光纤布拉格光栅(FBG)传感器、光纤 Sagnac 干涉仪(SI)传感器、光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)传感器和光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI)传感器等^[10-13]。表1展示了基于光纤AOTF的光纤激光应变传感系统与基于少模聚合物光纤的FBG应变传感器、基于保偏光子晶体光纤的SI

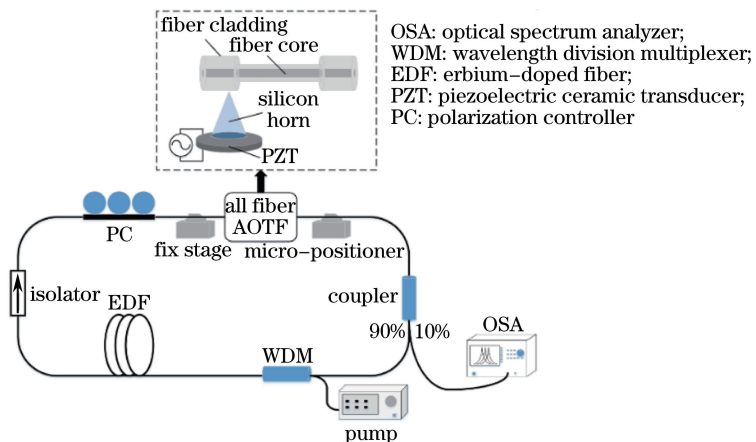


图1 基于光纤声光可调谐滤波器的光纤激光应变传感系统

Fig. 1 Fiber laser strain sensing system based on fiber acousto-optic tunable filter

应变传感器、S 锥形单模光纤 MZI 应变传感器及基于球状腔的光纤 FPI 应变传感器的性能参数。从表 1 中可以看出,基于光纤 AOTF 的光纤激光应变传感系统的性能要高于其他 4 种类型的光纤应变传感器。

表 1 光纤应变传感器的性能参数

Table 1 Performance parameters of optical fiber strain sensors

Type	Bandwidth /nm	OSNR /dB	Sensitivity /($\mu\text{m}/\mu\epsilon$)
Fiber laser strain sensing system based on fiber AOTF ^[9]	0.05	40	148
FBG strain sensor based on few-mode polymer optical fiber ^[10]	0.17	10	0.71
SI strain sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber ^[11]		32	0.23
Single-mode S-tapered fiber MZI strain sensor ^[12]		17	60
Fiber FPI strain sensor with spheroidal cavity ^[13]		38	10.3

2.2 气体和液面高度等折射率参量测量

2004 年, Zhang 等^[14]提出了光纤掺铒激光乙炔气体传感系统,该激光传感系统利用了乙炔气体对激光吸收的原理,通过在激光谐振腔里面加入气囊,使得激光器的输出功率发生改变,实现了对乙炔气体的传感测量。2012 年, Dai 等^[15]提出了双波长光纤激光液面高度传感系统,其结构如图 2 所示。该激光系统由两个环形谐振腔组成,在一个环形谐振腔中,相移光纤光栅与漂流物一起组成了传感元件,当液面高度发生变化时,漂流物的位置和相移光纤光栅的轴向应变也发生了变化,从而引起激光器的一个输出波长发生了移动;在另一个环形谐振腔中,另一个相移光纤光栅放置在水箱臂上,作为参考元件。这种激光传感系统通过测量双波长之间的拍频,能够实现液面高度灵敏度高达 2.12×10^7 MHz/m 的传感测量,并消除温度对测量结果的影响。

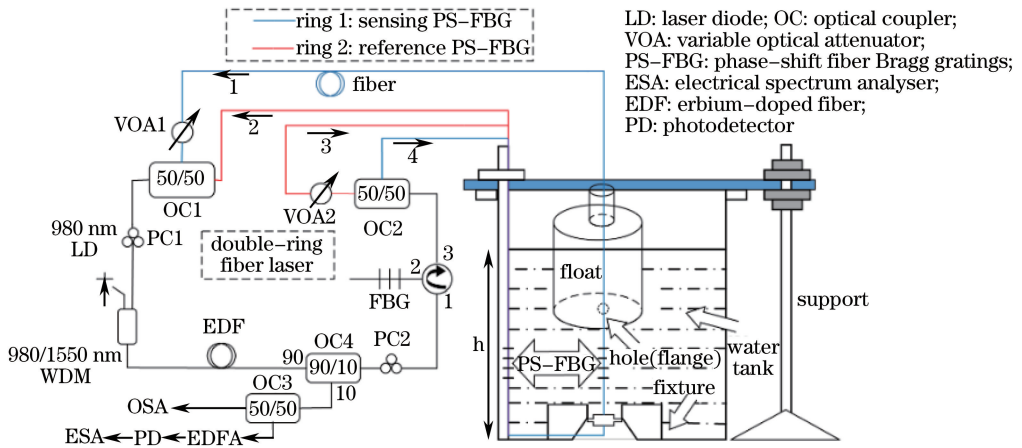


图 2 双波长光纤激光液面高度传感系统

Fig. 2 Dual-wavelength fiber laser liquid-level sensing system

2.3 电流、声波以及风速等特殊参量测量

2010 年, Guan 等^[16]提出了基于双偏振光纤光栅激光器的电流传感系统。该激光传感系统将激光器的谐振腔作为传感元件,并将电流参量转化为横向压力,改变了光纤的双折射率系数,引起了激光器输出波长的两个偏振态拍频的变化,从而实现对电流的传感测量。2013 年, Han 等^[17-18]提出了基于强度解调技术的光纤环形谐振腔激光声波传感系统,该激光传感系统将光纤布拉格光栅和可调谐光带通滤波器分别作为传感元件和波长选择器,通过测量激光器输出功率的变化,实现对声波信号的传感测量,并且研究了其多路复用传感的性能。同年, Liu 等^[19]提出了一种分布布拉格反射光纤激光风速传感系统,结构如图 3 所示。该激光传感系统将谐振腔作为传感元件,并通过文丘里管(一般由等直径入口段、收缩段、等直径喉道和扩散段等组成,可用于测量封闭管道中单向稳定流体的流量)将风速转化为气压,使得光纤的双折射率系数发生变化,引起了激光器输出波长的两个偏振态的拍频的变化,从而实现对风速的传感测量。

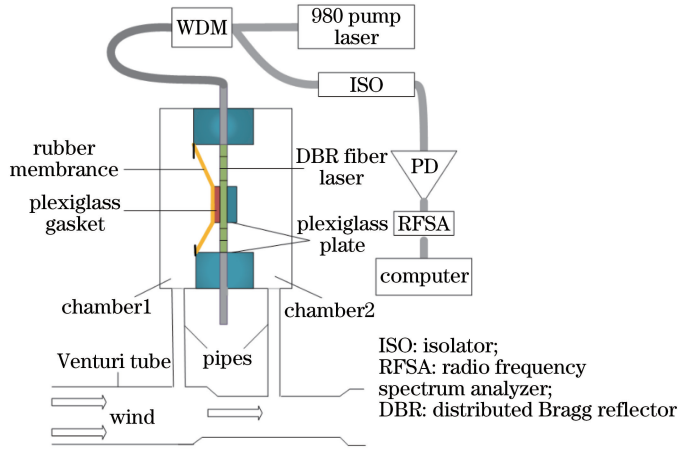


图 3 分布布拉格反射光纤激光风速计

Fig. 3 Distributed Bragg reflector fiber laser anemometer

2.4 基于其他关键技术的单参量测量光纤激光传感系统

因为多模干涉型光纤滤波器具有较好的传感特性,所以以其作为传感元件的光纤激光传感系统能够很好地应用于对应变和折射率等参量的测量。2012年, Lan 等^[20]提出了基于单模-多模-单模型光纤滤波器的光纤环形激光化学气体传感系统,其结构如图4所示。该激光传感系统将覆盖有沸石的单模-多模-单模型光纤滤波器作为激光器的波长选择器和系统的传感元件,通过测量激光器的输出波长的漂移量,实现对乙醇气体的传感测量。Liu 等^[21-22]将基于单模-多模-单模型光纤滤波器的光纤环形激光传感系统应用于应变和折射率的测量中,通过测量激光器的输出波长的漂移量,实现对应变和折射率的传感测量。

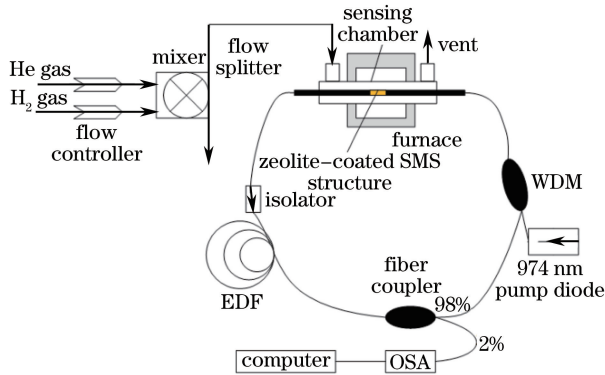


图 4 基于单模-多模-单模型光纤滤波器的光纤环形激光化学气体传感系统

Fig. 4 Fiber ring laser chemical vapor sensing system based on single-mode-multi-mode-single-mode structure fiber filter

光纤拉曼激光器以其多波长输出、波长输出范围宽和转换效率高等优点,在光纤传感领域具有广泛的应用。2004年, Lee 等^[23]提出了一种光纤拉曼激光温度传感系统,该激光器的谐振腔由多个均匀光纤布拉格光栅和一个可调谐啁啾光纤布拉格光栅组成。其中,均匀光纤布拉格光栅也作为系统的传感的元件,通过探测均匀光纤布拉格光栅的谐振波长的漂移量,可以实现距离为 50 km、灵敏度为 7.15 pm/°C 的远程温度传感测量。2011年, Martins 等^[24]提出了一种光纤拉曼激光应变传感系统,结构如图5所示,该激光传感系统包含了由两个光纤布拉格光栅组成的双线性谐振腔,通过利用两个谐振腔产生的四波混频,实现准确的、温度不敏感的应变传感测量。

3 基于双参量测量的光纤激光传感系统

相较于单参量测量,基于双参量测量的光纤激光传感系统既可用于对单参量的测量,也可用于对双参量的同时测量,这不仅降低了测量的成本,也在一定程度上减少了测量的系统误差。双参量测量的光纤激光传感系统的发展对激光传感领域具有重要的意义。

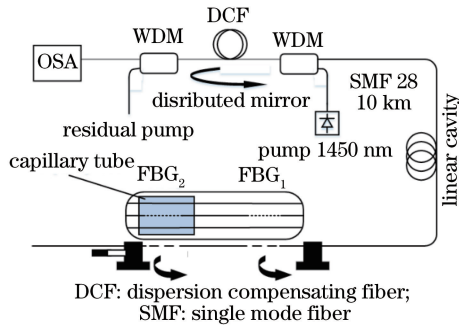


图 5 基于四波混频的光纤拉曼激光应变传感系统

Fig. 5 Fiber Raman laser strain sensing system based on four-wave mixing

对于双参量测量的光纤激光传感系统,目前研究最为普遍的就是对温度和横向应力或者温度和应变的双参量同时测量的激光传感系统。此外,在对折射率和温度的双参量同时测量的激光传感系统方面也开展了研究。

3.1 温度和横向应力的双参量测量

1996年, Kringlebotn等^[25]将基于保偏掺铒光纤的分布反馈式光纤激光器用于对温度和横向应力的双参量传感系统。通过对一定长度的保偏掺铒光纤侧面施加均匀的外界压力,改变该保偏掺铒光纤激光器的拍频,同时可通过改变该系统所处的环境温度来实现对该系统的温度传感。2011年, Liu等^[26]利用偏振激光传感阵列实现了对横向负载和温度的同时测量,其结构如图6所示。该系统中利用两个光纤激光器级联,当施加给激光器的横向负载或者温度改变时,两个激光器的波长间距改变,从而实现横向负载和温度的双参量测量。

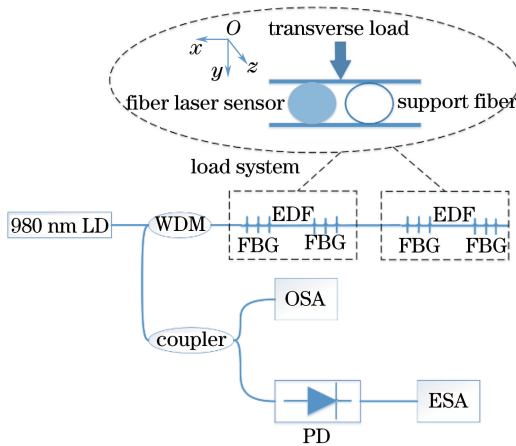


图 6 偏振光纤激光传感阵列系统

Fig. 6 Polarization fiber laser sensor array system

3.2 温度和应变的双参量测量

2001年, Haderler等^[27]将分布式反馈光纤激光器成功应用于对应变和温度的同时测量。2005年,多波长拉曼光纤激光器也被应用于温度和应变双参量同时测量的激光传感系统^[28]。2007年, Liu等^[29]设计了一种基于保偏光纤光栅的双波长光纤激光传感系统,实现对温度和应变的同时测量。2011年, Tan等^[30]利用两个超短光纤光栅激光器实现了对温度和应变的传感测量。2012年,多模光纤激光器也被成功应用于对温度和应变测量的双参量激光传感系统,该系统将偏振光纤激光传感系统与多模光纤激光传感系统相结合,分别检测偏振模拍频和纵模拍频对温度和应变的传感特性^[31]。但是,值得注意的是,这几个温度和应变的双参量同时测量激光传感系统都是利用两个波长来实现双参量测量。2015年, Leandro等^[32]提出一种新型光纤激光传感系统,只利用一个波长的激光就可以实现对温度和应变的同时测量,系统结构如图7所示;该系统将长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅型光纤激光器相结合,可以同时监测激光器的波长漂移和输出功

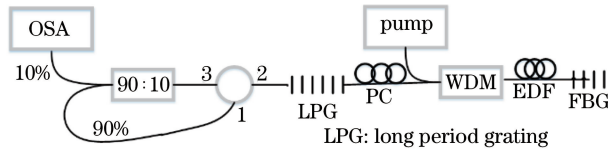


图 7 基于光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的光纤激光双参量测量传感系统

Fig. 7 Fiber laser dual-parameter measurement sensing system based on fiber Bragg grating and long period fiber grating

率,从而实现了同时对温度和应变的同时测量。

3.3 折射率和温度的双参量测量

2011年, Wong等^[33]将基于倾斜光纤光栅的光纤激光器用于对液体折射率和温度的同时测量,结构如图8所示。该系统将折射率匹配液置于掺铒光纤的远端以减少谐振反馈,且末端的掺铒光纤作为放大自发辐射光源。该系统中的光谱仪得到的是激光输出和包层模频谱的总和,所以能够实现对液体折射率和温度的同时测量。

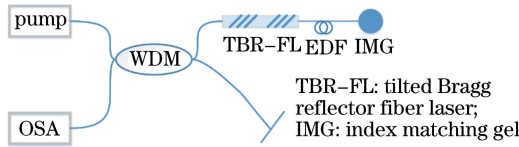


图 8 基于倾斜光纤光栅的光纤激光双参量测量传感系统

Fig. 8 Fiber laser dual-parameter measurement sensing system based on tilted fiber Bragg grating

4 结 论

从单参量测量和双参量测量两个方面分别介绍和分析了目前光纤激光传感系统的研究进展。作为一种新型的光纤传感技术,光纤激光传感系统不仅保留了光纤传感的灵敏度高、动态范围大、结构简单、可分布式测量及不易受电磁干扰等普遍优势,而且引入了光纤激光器的线宽窄和光信噪比高等优点。通过测量光纤激光器的波长、功率和拍频等参数,该传感系统能够实现对温度、应变、折射率、电流、风速和声波等参量的传感测量,在油田、矿山、桥梁、电力以及飞机等领域的测量和安全监控方面具有很大的应用前景。目前,光纤激光传感系统虽然得到了很大的发展,但在以下方面仍然需要展开深入的研究:1) 光纤激光传感系统的性能多样化及稳定性。研究光纤激光传感系统的多参量测量及功能多样化,探讨实现光纤激光器系统性能稳定的机制,为降低系统成本和实现商用化提供基础。2) 光纤激光传感系统的分布式传感测量。研究相关的复用方式及解调方式,为扩展光纤激光传感系统的应用领域奠定基础。

参 考 文 献

- Liu Yunhao. Introduction to internet of things[M]. 2th ed. Beijing: Science Press, 2013.
刘云浩. 物联网导论[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
- Wang Zhi, Chu Fenghong. Research advances in optical fiber current sensor technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 100002.
王 志, 初凤红. 光纤电流传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 100002.
- Yang Mu, Liu Xiuhong, Liu Wei, et al.. Applied research of optical fiber sensor in oil and gas pipe corrosion monitoring [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020604.
杨 牧, 刘秀红, 刘 伟, 等. 光纤光栅传感网络在油气出地管内腐蚀监测的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020604.
- Chen Hao, Liu Yueming, Zou Jianyu, et al.. Research status and development trends of fiber optical technology for water quality monitoring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030006.
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.
- Koo K P, Kersey A D. Fibre laser sensor with ultrahigh strain resolution using interferometric interrogation [J]. Electronics Letters, 1995, 31(14): 1180-1182.
- Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. IEEE Sensors

- Journal, 2008, 8(7): 1161-1172.
- 7 Zhang Y, Guan B O. High-sensitivity distributed Bragg reflector fiber laser displacement sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(5): 280-282.
 - 8 Jin L, Tan Y N, Quan Z, *et al.*. Strain-insensitive temperature sensing with a dual polarization fiber grating laser[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6021-6028.
 - 9 Pei L, Liu C, Li J, *et al.*. Highly sensitive axial strain fiber laser sensor based on all-fiber acousto-optic tunable filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(24): 2430-2433.
 - 10 Stefani A, Yuan W, Markos C, *et al.*. Narrow bandwidth 850-nm fiber Bragg gratings in few-mode polymer optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(10): 660-662.
 - 11 Dong X Y, Tam H Y, Shum P. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(15): 151113.
 - 12 Yang R, Yu Y S, Xue Y, *et al.*. Single S-tapered fiber Mach-Zehnder interferometers[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4482-4484.
 - 13 Favero F C, Araujo L, Bouwmans G, *et al.*. Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7112-7118.
 - 14 Zhang Y, Zhang M, Jin W, *et al.*. Investigation of erbium-doped fiber laser intra-cavity absorption sensor for gas detection[J]. Optics Communications, 2004, 234(1): 435-441.
 - 15 Dai Y, Sun Q Z, Tan S, *et al.*. Highly sensitive liquid-level sensor based on dual-wavelength double-ring fiber laser assisted by beat frequency interrogation[J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27367-27376.
 - 16 Guan B O, Wang S N. Fiber grating laser current sensor based on magnetic force[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(4): 230-232.
 - 17 Han M, Liu T Q, Hu L L, *et al.*. Intensity-demodulated fiber-ring laser sensor system for acoustic emission detection[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29269-29276.
 - 18 Liu T Q, Hu L L, Han M. Multiplexed fiber-ring laser sensors for ultrasonic detection[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30474-30480.
 - 19 Liu Y, Peng W, Zhang X, *et al.*. Fiber-optic anemometer based on distributed Bragg reflector fiber laser technology[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(13): 1246-1249.
 - 20 Lan X, Huang J, Han Q, *et al.*. Fiber ring laser interrogated zeolite-coated singlemode-multimode-singlemode structure for trace chemical detection[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1998-2000.
 - 21 Liu Z B, Li Y, Liu Y, *et al.*. A static axial strain fiber ring cavity laser sensor based on multi-modal interference[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(21): 2050-2053.
 - 22 Liu Z B, Tan Z W, Yin B, *et al.*. Refractive index sensing characterization of a singlemode-claddingless-singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5037-5042.
 - 23 Lee J H, Kim J, Han Y G, *et al.*. Investigation of Raman fiber laser temperature probe based on fiber Bragg gratings for long-distance remote sensing applications[J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1747-1752.
 - 24 Martins H F, Marques M B, Frazão O. Temperature-insensitive strain sensor based on four-wave mixing using Raman fiber Bragg grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering[J]. Applied Physics B, 2011, 104(4): 957-960.
 - 25 Kringlebotn J T, Loh W H, Laming R I. Polarimetric Er³⁺-doped fiber distributed-feedback laser sensor for differential pressure and force measurements[J]. Optics Letters, 1996, 21(22): 1869-1871.
 - 26 Liu B, Zhang H. Polarimetric distributed Bragg reflector fiber laser sensor array for simultaneous measurement of transverse load and temperature[J]. Optical Fiber Technology, 2011, 17(6): 619-625.
 - 27 Haderl O, Ibsen M, Zervas M N. Distributed-back fiber laser sensor for simultaneous strain and temperature measurements operating in the radio-frequency domain[J]. Applied Optics, 2001, 40(19): 3169-3175.
 - 28 Han Y G, Tran T V A, Kim S H, *et al.*. Multiwavelength Raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1282-1284.
 - 29 Liu D, Ngo N Q, Tjin S C, *et al.*. A dual-wavelength fiber laser sensor system for measurement of temperature and strain[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(15): 1148-1150.
 - 30 Tan Y N, Zhang Y, Jin L, *et al.*. Simultaneous strain and temperature fiber grating laser sensor based on radio-frequency measurement[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20650-20656.
 - 31 Gao L, Chen L, Huang L, *et al.*. Multimode fiber laser for simultaneous measurement of strain and temperature based on beat frequency demodulation[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 22517-22522.
 - 32 Leandro D, Ams M, Lopez-Amo M, *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single emission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2426-2431.
 - 33 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): 409-414.