

# 中国光纤传感 40 年

廖延彪<sup>1</sup>, 苑立波<sup>2</sup>, 田芊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>清华大学电子工程系, 北京 100084;

<sup>2</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>3</sup>清华大学精密仪器系, 北京 100084

**摘要** 概述了中国光纤传感器(OFS)近 40 年发展的历史和现状,回顾了该技术领域发展的三个阶段:迅速发展和制定国家规划阶段,技术和市场不成熟陷入低谷阶段和进入市场走产业化道路阶段。从典型 OFS 技术及其应用、新型 OFS 技术与仪器发展这两个方面,概述了中国学者所取得的主要技术成果,包括:光纤 Sagnac 干涉仪及其在陀螺领域的应用;光纤迈克耳孙、马赫-曾德尔干涉仪在水声探测、石油勘探、地声探测方面的应用;光纤光栅传感技术及其在火灾报警中的应用;分布式 OFS 技术及其在智能结构与建筑领域的典型应用;光纤法布里-珀罗传感技术与应用以及新型 OFS 传感技术和生物医学应用。阐明了中国 OFS 研发交流平台的发展及其对 OFS 学术发展与技术促进的重要作用。指出了目前中国 OFS 技术发展过程中所面临的问题,宏观上总结了 OFS 发展的经验并展望了其发展前景。

**关键词** 传感器; 光纤传感器; 历史回顾; 产业化

**中图分类号** O436; TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0328001

## The 40 Years of Optical Fiber Sensors in China

Liao Yanbiao<sup>1</sup>, Yuan Libo<sup>2</sup>, Tian Qian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>3</sup>Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** The history and present situation of optical fiber sensors (OFS) development in China in the past 40 years are presented, and three development stages in the technology field are reviewed including quickly development and determining National Projects of OFS in China, the trough both in technology and market because of its incompleteness, and industrialization stage driven by the market. From the view of two aspects, typical OFS technology and its application, new type OFS technology and instrument developing, the main technical achievements of Chinese scholars are summarized including fiber Sagnac interferometer and its applications in gyroscope field, the applications of fiber Michelson interferometer and Mach-Zehnder interferometer in the fields of hydrophone and geophone for oil detection and acoustic detection, optical fiber grating sensing technology and its applications for fire alarming, distributed OFS technology and its typical applications in the fields of largescale smart structure and architecture, optical fiber Fabry-Perot sensing technology and applications, and new type OFS sensing technology and its biomedical applications. The development of OFS research and development exchange platform in China and its important role in promoting the academic development and technology of OFS are expounded. The problems in the development of OFS technology in China are pointed out at present. The development experiences and prospects of OFS technology are summarized and prospected in general.

**Key words** sensors; optical fiber sensors; historical review; industrialization

**OCIS codes** 280.4788; 260.1180; 230.5298; 230.0040; 230.3120

**收稿日期:** 2017-11-22; **收到修改稿日期:** 2017-12-27

**作者简介:** 廖延彪(1935—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光纤光学方面的研究。

E-mail: lyb-dee@mail.tsinghua.edu.cn

# 1 引 言

光纤传感(OFS)是20世纪70年代后期发展起来的传感技术。该技术利用外界物理量引起的光纤中传播的光的特性参数(如强度、相位、波长、偏振、散射等)变化,对外界物理量进行测量和数据传输。OFS具有体积小、重量轻、抗电磁干扰、安全性高(无电火花,可在易燃、易爆环境下工作),传感器端无需供电、耐高温,以及便于组成传感器网络、融合进物联网等优点,在极端环境下能完成传统传感器很难甚至不能完成的任务,扩展了传统传感器的功能,因此OFS作为一种新型传感器受到了研究者的重视,并得到广泛的研究和应用。目前世界上已有各类OFS上百种,伴随新的机理及特种光纤、专用器件和新技术不断问世,其性能指标不断提高,更多的应用不断出现,显示了OFS具有广阔的应用前景。

中国在20世纪70年代末已开始研发OFS,其进展随同国际OFS事业发展的起伏而前行。中国OFS的发展始终充满了机遇和挑战,到21世纪初,基于OFS实用化、微型化、网络化以及应用领域的扩大,中国OFS事业开始进入发展的新时期。只有努力做到基础研究和实际应用相融通,科研开发和企业生产相贯通,加速科研成果转化为现实生产力,走产业化发展道路,OFS事业才有前进的推动力和旺盛的生命力。本文将概述中国OFS从起始至今40年的发展历程,进行回顾、总结和展望。

## 2 回 顾

自1970年美国康宁公司成功研制出可实用的石英光纤后,光纤在光纤通信和OFS两方面的应用开始被研究。20世纪70年代末,国际上OFS技术刚刚起步,中国不少高校和科研单位就紧跟着开展对这种新型传感器的研究,至今已有40年。中国的OFS事业虽起势迅猛,却历经曲折,走过了一条不平坦的道路,大致可以分为三个阶段:1)从20世纪80年代初到90年代中期,OFS的研究发展迅速,形成一个小高潮;2)从20世纪90年代中期到21世纪初,OFS的研究处于发展缓慢的阶段;3)从21世纪初至今,OFS的研究处于新阶段,开始走产业化道路,迎来新的发展高潮。

### 2.1 第一阶段:发展迅速和制定国家规划

国际上OFS在20世纪70年代后期兴起,一开始就显现出很大的吸引力。基础研究不断创新,学

术活动十分频繁;应用领域不断开拓,相关产值每年以30%的速度增长。当时,这些情况引起了中国学术界和产业部门的广泛重视,很多科研机关、高等院校和产业部门迅速跟进。中国OFS具体的实验研究工作于20世纪70年代末、80年代初逐步开始。当时,中国有关OFS的研制工作主要在高校和研究所进行,广大研究人员克服种种困难开展工作,不仅认真学习国外的方法与技术,而且敢于探索自己的新方法与技术,进行了多种类型OFS的研制,并试图将其进行推广应用。

此时,中国开展研制的OFS已种类繁多,并取得了初步成果,OFS应用研究涉及电流、电压、电场、磁场、温度、水声、压力、位移、振动、速度、转动、流量等物理量的检测,国际上几种主要类型的OFS均有单位在研制<sup>[1]</sup>。初期还只局限于借助与利用光通信的光纤及其器件来研究基本的传感特性,不久国内就有单位开始研制专用于OFS的光纤、有源和无源器件,有力地推动了有关研究工作,这是中国光纤传感进入深入研制的标志。

在这一阶段,中国OFS的研制呈现出迅猛发展的态势,主要体现在两方面:

#### 1) 国家重视和制定OFS国家规划与任务

在改革开放初期,事业的发展能否得到国家的重视和政策导向是极其必要和重要的,尤其是在中国OFS事业从无到有、从小到大的早期发展阶段,特别需要国家的支持和推动。

为了推动中国OFS行业的形成,在清华大学等单位专家的建议下,国家科委新技术局于1983年9月在江苏扬州召开了光纤传感器及其应用发展预测座谈会<sup>[1]</sup>,其反映了中国OFS当时的研究水平,又于1985年1月在北京召开光纤传感技术发展规画座谈会,两次座谈会均由清华大学电子系承办。在集思广益的基础上,国家科委新技术局制定了《光纤传感技术“七五”发展规划(草案)》。

《光纤传感技术“七五”发展规划》明确了方向,并确定攻关子课题12项,内容涉及OFS的几个主要类型,以任务驱动科研,由此极大地推动了中国OFS行业的发展。此后,机械工业部仪表局、电工局、电子工业部以及上海、武汉、杭州、江苏、安徽等省市,先后制定了“七五”期间的OFS发展规划。国家科委于1987年4月制定的《传感器发展政策》确定了必须大力发展传感器技术,特别是把新型传感器技术作为优先领域予以发展<sup>[2]</sup>。由此可见,中国OFS事业的发展离不开国家的支持,列入国家规划

是 OFS 得以起步极为关键的举措。

## 2) 成立学术组织和召开学术会议

在中国 OFS 的早期发展阶段,研究人员多是自发的、个体的,散见于高校和科研单位的实验室内,各自为战,虽有成绩,但难以取得大成果。因此,加强学术交流,相互学习和借鉴,相互了解和沟通显得尤为迫切。

技术的进步需要将各种力量组织起来。为进一步推动中国 OFS 的发展,建立全国性 OFS 学术组织十分重要。在清华大学等有关单位的倡议下,1985 年 11 月在南京仪器仪表研究所成立了光纤传感专业委员会,它是中国仪器仪表学会仪表元器件分会下属的一个专业委员会,与此同时还成立了一个光纤传感技术情报协作组,这是中国第一个 OFS 学术组织,起到组织者的作用。

在光纤传感专业委员会和情报协作组的主持下,多次全国性 OFS 学术交流会得以召开。在 1985—1993 年之间,共召开了 5 次国内和 2 次国际 OFS 学术交流会,以及 3 次光纤传感培训班<sup>[3-16]</sup>。1988 年 11 月中日光纤传感专业委员会在北京联合举办了 OFS 学术交流会,1991 年 10 月国际光学工程学会首次和中国在武汉联合举办了 OFS 学术交流会,这两次会议都获得国家自然科学基金委的资助。文献[12]为会议文集,较全面地反映了中国当时 OFS 的研究水平,展现出中国 OFS 研究的积极态势,对广泛开展 OFS 研究起到了很好的促进作用。

## 2.2 第二阶段:技术和市场不成熟,陷低谷

20 世纪 90 年代中期,中国 OFS 的研究进入一个小高潮后不久,OFS 的发展逐渐显露出动力不足而进入发展低潮。

这段时间中国 OFS 事业的发展变缓,这既有外在原因,也有内在因素。外在原因主要是中国在继续进行改革开放时,工业的深入发展遇到一定的困难;此外,这一时期光纤通信迅速发展,光通信市场需求急剧增长,国家规划制定和投资部门及光纤技术研究单位纷纷转向了光纤通信,从而减小了对 OFS 的投入。内在因素则是 OFS 还处于发展初期,技术不成熟、工艺不完善、应用不过关,以及元器件价高质低,难以满足实际需求,没有打开市场。尤其是光通信已影响到千家万户,而人们对 OFS 却知之甚少,这也大大妨碍了 OFS 的推广。

在这一阶段,中国 OFS 的研制还存在多方面的问题,可概括为技术和市场两方面。一个产业的发

展,技术优势是推动力,市场需求是牵引力。中国 OFS 的研制在技术上尚不成熟,与传统传感技术相比并无优势可言,并且难以满足实际的应用和市场需求,因此 OFS 的发展走入低谷是必然。这主要表现在:

1) 光纤传感器不达标,尚不能在实际应用中得到认可。在初期,特殊专用的元器件大多由研究者自己研制,其性能、质量难于符合使用要求,且制作工艺落后,批量少、成品率低、成本和价格高。因此大大影响了技术和系统的研究和使用的,真正能够投入使用的 OFS 少之又少,很难适应实际环境。

2) 光纤传感技术不过关,尚不能在工程使用中得到认可。OFS 技术具有一些传统传感技术不能比拟的优点,但这只是预测与估计,在早期的应用中未能体现,其应有特色也没有在应用中突显。例如:OFS 灵敏度高,但信噪比、稳定性低;其抗电磁干扰强,但可靠性差、受温度影响大,因此其潜力未被挖掘出来;加之使用不方便、性价比较低等,使得 OFS 不适用于工程中。

3) 光纤传感系统不成熟,尚不能在市场需求中得到认可。例如:那时国内的油库安全十分重要,全凭人工检测,且管理水平较低,使用高精度、安全的 OFS 检测系统应是最佳方案。文献[15]表明当时研制出的光纤油罐检测系统已能满足技术指标,但由于人工检测成本低,以及其他一些因素,此系统难于推广使用。

这一段时间的低潮可以归因于技术不成熟、市场不成熟、国家不重视。然而,中国 OFS 的研究和发展并未止步不前。许多有志于光纤传感事业的人,面临如此困境没有气馁,而是更加埋头苦干,潜心做更扎实、细致的研究。大家仍在坚持,打好基础、突破难点、寻找应用的市场,并坚信中国 OFS 的春天终会到来。

## 2.3 第三阶段:进入市场,走产业化道路

凭借 OFS 固有和潜在的性能优势,其走出低谷进入新的高潮是必然的。中国 OFS 现在已进入新的发展阶段。究其原因,一方面是内部原因,OFS 技术本身已有很大提高,进入了实用化阶段,不少 OFS 系统已可满足市场实用的要求。另一方面是外部原因:

1) 国家各个层面的重视。进入 21 世纪以来,传感器作为国民经济的基础产业,在国家的各个层面得到了越来越多的重视。各级政府已经认识到必须大力发展中国自己的传感器技术,开始加大对传

传感器的投入。同时,随着整个光通信行业日趋成熟,光纤通信技术进入平稳发展,而市场竞争加剧。许多光纤和有关元器件的生产单位纷纷将目光转向OFS,很多投资者也看好OFS市场。这就给OFS带来了资金和推动力,使OFS走出低谷,带来了促进发展的新局面。

2) 市场需求开始呈现。随着中国经济建设的飞速发展,开始实施创新驱动发展战略,突破更多技术瓶颈需要大力孕育高新技术,其中OFS也逐步得到青睐。随着许多行业、领域的技术进步,有关技术条件得到改善,对高新技术的需求日益增加,如油罐检测的自动化、电力行业(建设超高电压和特高电压、长距离输电线路)、大跨度桥梁、水利大坝等大型构件的安全与健康状况的实时及在线监测,以及国防安全等,均对OFS提出了愈来愈多的需求,也给予其应用开发带来了极好的拓展机遇。

在中国OFS发展即将开始新阶段之际,“光纤传感与光电器件学术交流会”于2004年7月在河北秦皇岛燕山大学召开<sup>[17]</sup>,这是一次很重要的学术会议,反映了当时中国OFS的研究水平。自1993年后,学术交流已经停顿了10年<sup>[16]</sup>,这是恢复国内OFS学术交流的第一次会议。中国OFS在进入低潮期间,研究开发并未停止,而且在实践中越来越深刻地认识到,OFS的进一步发展必须走产业化道路。因此,参会者们在这次会上形成共识,OFS的深入研究必须与实际应用相结合、与市场需求相结合,而要中国OFS事业具有生命力并得到深入发展,当前十分重要的举措是有更多的企业加入。基于此,会议决定将学术交流会更名为“光纤传感器的发展与产业化论坛”。

“第一届光纤传感器学术会议暨产业化论坛”于2005年6月在浙江平湖清华大学长三角研究院召开,该论坛是中国从事OFS研发和生产的同行之间的大联合,是加强沟通和交流合作的大平台,是中国OFS事业发展的又一个节点,也是进一步发展的新起点,开启了OFS的产业化道路<sup>[18]</sup>。

2010年6月,第五届“光纤传感器学术会议暨产业化论坛”在广州暨南大学举行<sup>[19]</sup>。这次论坛是在总结过去几年国内外光纤传感器研究和产业化发展的基础上,共同讨论中国OFS的发展对策。针对国家“十二·五”中长期发展规划的指导思想,参会者们讨论了今后的发展方向和举措;为提升中国OFS发展与产业化的国际影响力,做出了加强国际学术交流、同国际OFS大会接轨的决策。

2017年10月,在北京召开的第十届“光纤传感学术会议暨产业化论坛”反映了中国OFS最近的研究成果。文献[20]表明,中国OFS除实验室研究成果外在产业化方面也取得了可喜的成绩,在机械、电力电子、航天航空、石油化工、环保、医疗和食品安全等领域的在线检测、故障诊断和自动控制等方面,得到了卓有成效的运用和推广。企业的加入和市场的进入是这一阶段最大的特点和亮点。

### 3 现 状

经过40年的努力,OFS已经成为中国传感器领域的一个重要分支,成为现场在线监测的重要手段,应用于越来越多的行业,并正在渗透于新的不同的应用领域。中国OFS已取得长足的进步,其当前的发展状况是:具备研究开发各类OFS的基础,有广阔的国内市场;具备研究开发的交流平台,并加强了与国际的学术交流,开始走向世界;已成为世界上最主要的OFS产品应用市场,显现出了旺盛的生命力和良好的市场前景。当然在发展中还存在不少问题和困难,有待于继续努力加以解决。

#### 3.1 打下研发基础

目前几乎所有的OFS都可以国产提供,并达到与国外产品接近或相当的技术指标。中国OFS的技术研究和应用开发基础扎实,主要体现在以下两个方面。

##### 3.1.1 典型OFS技术及其应用

1) 光纤Sagnac干涉仪及其在陀螺领域的应用。较早投入大量实际应用的光纤传感器是基于光纤Sagnac干涉仪的光纤陀螺(FOG),于1976年由美国犹他大学Vali和Shorthill提出。FOG具有重要的军用价值,很快成为光纤传感领域的研究热点并快速发展。中国FOG技术始于80年代<sup>[21]</sup>,1980—1990年为国内FOG原理和方案的研究阶段。北京航空航天大学、上海交通大学、上海航天803所等单位开展了开环、闭环和谐振FOG研究,其中北京航空航天大学张维叙教授开展了基于电光调制器的闭环FOG研究,研制出闭环光纤陀螺样机<sup>[22-23]</sup>。在1990—2000年间,国内主要开展了开环和闭环FOG原型样机的研究<sup>[24-26]</sup>,突破了全数字闭环检测技术<sup>[27-28]</sup>。同时,中国电子科技集团公司第四十六研究所、北京玻璃研究院、中国电子科技集团公司第四十四研究所分别完成了保偏光纤、超辐射光源、探测器和Y波导调制器等关键器件的研发,为FOG的国产化和工程化提供了器件基础。

2001年,北京航空航天大学与中国航天科工066基地合作,成功完成了FOG首次实弹打靶实验,是中国FOG进入实用阶段的里程碑。2001年至今为高精度、新型FOG研发和工程应用阶段<sup>[29]</sup>,北京航空航天大学率先开展基于掺铒光纤光源(SFS)的高精度FOG的研发<sup>[30]</sup>,哈尔滨工程大学研制出高精度光纤白光干涉仪,用于高精度光纤陀螺Y波导和光纤环的测试与评价<sup>[31]</sup>。为满足空间和其他高精度制导导航控制系统对高精度、抗辐射FOG的迫切需求,基于实心保偏光子晶体光纤和掺铒光子晶体光纤,研制出不同于国外空心光纤方案的干涉型光子晶体FOG原型样机<sup>[32]</sup>。国内多家单位也相继开展相关技术研发,其中北京航空航天大学<sup>[33]</sup>和北京时代光电科技有限公司研制的光子晶体光纤陀螺已进入卫星搭载实验阶段。同期,国内谐振型FOG(R-FOG)技术也取得了较大进展<sup>[34-35]</sup>,正从原理演示向原理样机发展。现在,国内FOG的最高精度已达 $10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 量级,形成高、中、低精度系列产品,广泛应用于“海陆空天”和民用领域。北京航空航天大学张维叙教授在中国FOG技术领域做出了杰出贡献,于2016年第九届中国光纤传感学术会议暨产业化论坛会议上被授予“终身成就奖”。

2) 光纤迈克耳孙、马赫-曾德尔干涉仪在水声探测、石油勘探、地声探测方面的应用。中国从“八五”开始支持光纤水听器技术研究,在关键光纤元器件取得突破的情况下,开展光纤水听器探头及系统研究<sup>[36]</sup>,于2000年在南海成功进行了中国光纤水听器首次海上实验,标志着光纤水听器技术已从理论研究走向海上实验研究。之后国家加大投入,多家单位开展了光纤水听器技术研究<sup>[37-38]</sup>。经过近20年的发展,目前设计定型了多款光纤声压水听器<sup>[39-41]</sup>、光纤矢量水听器探头<sup>[42-44]</sup>,同时攻克了基于波分、时分和空分复用的混合复用<sup>[45-46]</sup>,大规模多通道全数字光电信号检测、远程传输光放大和非线性抑制<sup>[47-48]</sup>、超窄线宽光源<sup>[49]</sup>等关键技术,研制出用于石油地震勘探<sup>[39-40]</sup>以及海洋的岸基、拖曳、潜标等多种应用形式的光纤水听器阵列<sup>[50]</sup>,其在中国石油地震勘探、海洋物理研究、海洋环境监测、海洋资源勘探和水下预警探测等领域发挥了重要作用。

3) 光纤光栅传感技术及其应用。光纤光栅传感器是一种典型的波长调制型光纤传感器,具有抗干扰能力强、传感探头尺寸小及结构简单、应用广、测量结果重复性好、便于构成传感网络、可进行绝对测量(光栅定标后)、便于形成规模生产等明显的优

点。光纤光栅传感器得到推广应用的难点是:对波长移位的检测需要用较复杂的技术和较昂贵的仪器,需要大功率的宽带光源或可调谐光源,检测的分辨率和动态范围也受到一定限制等。国际上光纤光栅用于传感的报道出现不久,中国就有光纤光栅的论文发表,也陆续出版了若干专著<sup>[51-57]</sup>。

光纤光栅传感技术有多方面的应用,早期主要应用于工程结构健康监测领域<sup>[51-55]</sup>,同时也可应用于多光栅复用方面,解决了光纤光栅传感技术难以大容量多点探测的难题,在火灾监测领域取得卓有成效的应用,实现了火灾探测所需的高速探测与解调<sup>[58]</sup>,以及20 km距离无中继的火情探测。在产业化发展和应用过程中,光纤光栅传感器的制造工艺和批量生产问题得到解决,实现了产业化,并且国家标准《线型光纤感温火灾探测器》和湖北省地方标准《光纤光栅感温火灾报警系统设计、施工及验收规范》已形成。光纤光栅传感器的应用解决了井下高温高压监测、地震波检波和地震物理模型成像等测井研究领域的一系列问题<sup>[59-62]</sup>。

光纤光栅传感技术的另一项重要发展是:针对地球物理学研究中地壳微弱形变观测的高精度光纤应变传感器。近年来,上海交通大学在地壳微弱形变观测的高精度光纤应变传感技术方面取得了一系列重要进展与成就,提出了基于Pound-Drever-Hall技术的光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪/相移光纤光栅解调方案<sup>[63]</sup>和射频强度调制边带探测技术<sup>[64]</sup>,将准静态频段应变信号测量分辨率提升至亚纳应变( $10^{-10} \epsilon$ )级;通过实时双闭环控制技术,进一步提高了测量分辨率并拓宽了响应频带,实现了在大于100 Hz高频响应下 $10^{-11} \epsilon$ 级的准静态应变分辨率<sup>[65]</sup>。深圳大学开展了利用飞秒激光制备光纤光栅的研究<sup>[66]</sup>,实现了光纤光栅的并联和串联集成,并成功制备出耐高温的光纤光栅<sup>[67]</sup>。

武汉理工大学近期的研究表明,在特种光纤/微结构光纤上在线连续写入光栅,可将特种光纤/微结构光纤的特点与在线连续制备光栅的优势相结合,制备出多种新型光纤器件<sup>[68-73]</sup>,该研究既具有理论意义,又具有实验价值。在连续光栅阵列的解调方面,可以进行超大容量的波分/时分复用多波长在线光栅阵列的解调,实现对 $10^4$ 多个反射率低至-40 dB的超弱光栅阵列的解调,采用波分和时分混合复用的方式,可以连续复用6000多个光纤光栅<sup>[74-79]</sup>。

4) 分布式OFS技术及其在智能结构与建筑领域的应用。光纤分布式传感技术在长距离连续传感

方面具有不可替代的优势,在周界安防、石油电力、交通运输、大型结构等领域具有广阔的应用前景。

基于 Raman 效应的温度分布式测量技术是成熟较早的分布式 FOG 技术之一。光纤所处空间各点的温度场调制了光纤中背向 Raman 散射的强度,利用光纤的光时域反射(OTDR)技术对测温点进行定位,实现了光纤分布式温度传感。从 20 世纪 90 年代开始,国内一些高校就开展了相关研究。中国计量学院在分布式光纤 Raman 温度传感技术方面进行了深入、系统的研究<sup>[80-81]</sup>,并且实现了产业化。市场上已有非本征型法布里-珀罗干涉仪型系列短程、中程和长程分布式光纤 Raman 温度传感器产品和高精度、高空间分辨率的分布式光纤 Raman 温度传感器产品。

与国际相比,中国在分布式 Brillouin FOG 方面无论是学术研究还是产业化起步都较晚。但是,近年来随着国内研发实力的增强,公共安全和工业现代化驱动着分布式 FOG 产品的发展,使其持续走高,从而助推了相关产业的快速发展。国内开展分布式 Brillouin FOG 研究的单位包括:哈尔滨工业大学<sup>[82-86]</sup>、电子科技大学<sup>[87-89]</sup>[重点研究 Brillouin 光时域分析(BOTDA)]、南京大学<sup>[90-92]</sup>、浙江大学<sup>[93-94]</sup>和中国电子科技集团公司第四十一研究所[重点研究 Brillouin 光时域反射计(BOTDR)]等。近年来,不少研究单位取得较好成果。电子科技大学提出基于随机激光的分布式放大方法<sup>[95]</sup>,将其应用于分布式 FOG 距离的提升,使无中继 BOTDA 的传感距离达到 154.4 km(温度精度为 $\pm 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空间分辨率为 5 m)<sup>[96]</sup>,为无中继传感距离的拓展提供了新思路。哈尔滨工业大学突破了核心技术,获得了最高 2 cm 空间分辨率的国际先进技术指标<sup>[97]</sup>。清华大学对其中的偏振问题进行了较全面深入的研究<sup>[98-100]</sup>。

同时,中国在光频域反射(OFDR)技术领域也不断取得进步。在摆脱长距离测量时 OFDR 技术对激光器相干性的严格要求、克服 OTDR 技术存在的动态范围不足方面,具有代表性的是混沌激光器的使用方案<sup>[101-103]</sup>,以及时间门数字域 OFDR(TGD-OFDR)技术方案<sup>[104-105]</sup>。2008 年太原理工大学提出用混沌激光器作为信号光源,证实 OFDR 技术可实现高空间分辨率和较大动态范围<sup>[101]</sup>。2012 年天津大学采用常规 OFDR 实现了 12 km 测量距离下 5 cm 的空间分辨率以及 2 kHz 的频率响应<sup>[106]</sup>。2015 年电子科技大学采用全光纤混沌激光

器,实现了 100 km 测量范围内 8.2 m 的空间分辨率<sup>[102]</sup>;上海交通大学采用 TGD-OFDR 实现 40 km 测量距离下 3.5 cm 的空间分辨率以及 600 Hz 的频率响应<sup>[105]</sup>。2017 年中国科学院半导体研究所使用 40 GHz 带宽的混沌激光器,在 47 km 测量范围内实现了 2.6 m 的空间分辨率<sup>[103]</sup>。2017 年上海交通大学提出采用线性光采样技术进行接收,结合脉冲压缩技术实现了 150 m 测量距离下 120  $\mu\text{m}$  的空间分辨率<sup>[107]</sup>。在应用方面,OFDR 可以用于分布式振动测量,通过对信号进行频谱分析可以摆脱  $\Phi$ -OTDR 方式的脉冲重复频率对于频率响应的限制<sup>[108]</sup>。

目前,中国已有数十个基于分布和准分布式的 OFS 系统在周界安防、石油电力、铁道运输等领域在线试运行。据国际 FOG 协会报道,中国已安装的分布式 OFS 系统占全世界已安装设备的 11.3%。

5) 光纤 F-P 传感技术与应用。由于单点光纤传感器具有高灵敏度和较好的稳定性,光纤 F-P 传感技术在早期也得到了很好的应用。重庆大学较早开展了基于光纤 F-P 腔结构的光纤应变传感技术研究<sup>[109-110]</sup>,研制了光纤 F-P 型传感器的解调系统<sup>[111]</sup>,发展了光纤 F-P 型应变传感器串并联混合复用的离散腔长变换解调技术<sup>[112]</sup>。电子科技大学和上海大学也开展了有关的研究,研发了高温 F-P 型光纤温度传感器<sup>[113-114]</sup>。北京理工大学则研制了基于光纤 F-P 腔的光谱扫描解调器,并将其应用于光纤白光干涉测量系统中<sup>[115-117]</sup>。

### 3.1.2 新型 OFS 技术与仪器发展

1) 新型 OFS 传感技术不断涌现。近几年来,中国学者在微纳光纤传感、高精度气体传感与纤维集成传感技术方面都取得了较大进步,成绩显著。

微纳光纤是近年来发展起来的、直径接近或小于传输光波长的一种新型光纤,具有尺寸小、光场约束能力强、倏逝场比例大、机械强度高、损耗低、弯曲半径小等特点,在制备灵敏度高、响应速度快、能耗低的紧凑型光纤传感器方面具有独特优势<sup>[118]</sup>。当外界环境发生微小扰动(被测样品与倏逝波相互作用或折射率变化)时,通过散射、吸收、色散、发光等方式改变微纳光纤传输光的特性,可使输出光的强度、相位或光谱等发生变化<sup>[119]</sup>。按照传感变量的不同,微纳光纤传感器可分为强度型传感器(可对光强或光谱的改变进行检测)和相位型传感器(可对相位的改变进行检测),其中典型的传感结构包括微纳光纤光栅<sup>[120-121]</sup>、微纳光纤谐振腔<sup>[122-123]</sup>、微纳光

纤干涉器<sup>[124-125]</sup>和微流控通道-微纳光纤集成芯片<sup>[126-127]</sup>等。通过合理设计传感结构,微纳光纤传感器成功实现了对气体、液体以及温度、湿度、微应力、电流等的高灵敏度测量<sup>[120]</sup>,尤其在微量生化样品的测量方面展示出样品消耗低、灵敏度高、光功率低的特点。随着纳米科技的迅速发展,聚合物微纳光纤<sup>[128-129]</sup>及其与量子点<sup>[130]</sup>、金属纳米颗粒<sup>[131]</sup>、石墨烯<sup>[132]</sup>等新型功能化材料的结合,进一步促进了微纳光纤传感器的发展。迄今为止,国内外在微纳光纤传感器方面已经开展了大量研究,取得了一系列进展。从实用化角度来看,微纳光纤的大规模可控制备和微纳光纤传感器的集成与封装是亟需解决的问题。

基于气体光谱吸收伴生热效应的研究,中国学者提出并实现了基于光热光谱技术的高灵敏度空芯光纤气体传感器,香港理工大学的研究人员展示了测量下限为 $10^{-9}$ 量级、动态范围近6个数量级的乙炔气体传感器<sup>[133-134]</sup>,这些性能指标比直接吸收型光纤气体传感器提高约3个量级。在此基础上,制备了基于石墨烯、聚合物等薄膜的光纤声波探头,并将其成功用于光声光谱气体传感<sup>[135-137]</sup>,通过对多种在近红外波段有吸收的气体进行测量<sup>[138]</sup>,实现了对氢气的高效测量<sup>[139]</sup>。

将纤维集成光器件用于传感技术也取得了多方面的进展。纤维集成光器件技术的特点是将较复杂的光路和各种光学元器件微缩集成到一根光纤中,形成各种新型、微型、特种器件、组件和系统。基于这种想法,哈尔滨工程大学的研究人员采用双芯光纤可构建迈克耳孙干涉仪实现了加速度传感<sup>[140-141]</sup>和折射率传感<sup>[142]</sup>,也可以实现液体流速的传感<sup>[143]</sup>。这有别于其他OFS,因为迈克耳孙干涉仪的两臂所受到的影响都是相同的,所以这种集成式OFS将不受环境温度与压力的影响<sup>[144]</sup>。此外,采用悬挂芯光纤构建了微流监测传感系统<sup>[145-147]</sup>;多芯光纤除了能够用于制备光纤光栅弯曲传感器外<sup>[148]</sup>,还能用于形貌传感与测量<sup>[149-150]</sup>。这些不同结构的光纤拓展了新型OFS的应用潜力。

暨南大学的研究人员发展了双频干涉型OFS,将被测信息转换为双频光纤激光器拍频信号的频率变化,在无线电射频段进行信号解调,不仅编码方式可靠、抗干扰能力强,而且灵敏度高、解调成本低廉<sup>[151]</sup>,基于双频光纤光栅激光器的拍频调控方法,实现了外差干涉型OFS的频分复用<sup>[152]</sup>,并进一步实现了生物光声成像,将OFS推向生物医学成像应

用领域<sup>[153-155]</sup>。

2) 生物医学应用领域日益活跃。近年来,光纤表面等离子激元共振(SPR)传感、倾斜光栅等在生物学、医学、食品安全和石油化工等领域得到很好的应用。

光纤SPR传感技术对环境折射率的变化非常敏感,成为当前OFS领域的研究热点之一。光纤SPR传感技术克服了传统SPR技术检测系统体积大、仪器价格和维护成本昂贵、难于实现遥测及在线监测等局限,具备耐腐蚀、耐高温、抗电磁干扰、传输距离远等技术优点,可实现灵巧系统、在线遥测、响应速度快、特异识别功能强、分辨率和灵敏度高,及免标记生化测量等,有效地推动了SPR检测技术的发展和普及。

近年来中国在光纤SPR传感理论、传感器件、仪器化和实用化方面开展了一系列研究工作。北京交通大学研究了光纤光栅结构SPR传感理论,结果表明表面等离子激元模式的传播长度决定了光栅长度的阈值,在光栅长度接近阈值长度时可实现有效的模式耦合<sup>[156]</sup>。东北大学采用银镜反应的化学方法研制了光纤SPR传感探头,相比传统的磁控溅射、蒸镀等物理方法,该化学成膜方法具有成本低、可操作性强等特点<sup>[157]</sup>。深圳大学采用光纤侧面抛光镀银的方法制作了SPR传感器,研究了银镀层降解对传感器性能的影响<sup>[158]</sup>,提出基于相位解调的光纤SPR传感器<sup>[159]</sup>。

天津大学研究了水溶剂温度对光纤SPR传感器的影响,针对SPR共振波长信号的降噪预处理,提出经验模态分解滤波算法<sup>[160]</sup>。暨南大学研究了基于倾斜光纤布拉格光栅的SPR传感器,该类传感器具有高密度窄包层模共振峰和较大的吸收表面,分别对静态大气压力变化及大鼠尿蛋白进行了测量,获得 $10^{-8}$  RIU的折射率分辨率和 $1.5 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的检出限<sup>[161-162]</sup>。哈尔滨工程大学提出并研究了双芯光纤SPR传感器,利用双光纤纤芯模式有效地抑制了模式噪声,传感器灵敏度达 $5213 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ ;采用偏心光纤角度研磨技术,实现了一种具备多通道测量和自参考能力的分布式光纤SPR传感器<sup>[163-164]</sup>。

大连理工大学在光纤SPR传感器的理论、实验和应用等方面取得进展,利用表面等离子激元理论设计了六角环形孔阵列、椭圆环形孔阵列等纳米SPR生化传感器件<sup>[165-166]</sup>;设计并实现了毛细管结构、倾斜光纤光栅、液晶填充空心光纤等多种光纤

SPR 传感元件<sup>[167-168]</sup>, 研制了波长调制式、图像解调式等多种 SPR 检测系统<sup>[169-171]</sup>; 利用分子印记技术制备了硼酸聚合物, 对糖蛋白的检测灵敏度达  $0.2 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ <sup>[172]</sup>; 研制了基于智能手机平台等的便携式多通道 SPR 检测系统<sup>[173-174]</sup>, 实现光纤 SPR 检测技术的系统化和实用化。这些研究有望逐步实现更高灵敏度、高可靠性、高集成度和功能复用的智能化光纤 SPR 传感系统。

3) 光纤 F-P 传感器呈现出多样性和独特的工程价值。光纤 F-P 传感器具有设计多样性、可以不拉伸光纤及耐高温等特点, 基于光纤 F-P 传感器可设计出各种样式的传感器, 尤其适用于压力、振动、声、折射率传感器的制作。光纤 F-P 传感器的信号解调包含基于激光干涉测量技术的相对测量和基于白光干涉测量技术的绝对测量。相对测量用于测量动态信号或信号的变化量, 绝对测量获取的是干涉仪的光程差。北京理工大学提出了大动态范围、高精度的相对测量技术<sup>[175]</sup>, 在绝对测量方面建立起基于相位测量的光谱域白光干涉测量技术<sup>[176]</sup>, 提出的傅里叶变换光纤白光干涉测量术<sup>[177]</sup>不仅精度高、动态范围大, 无需人工干预测量, 还能够空频复用非本征型法布里-珀罗干涉仪传感器<sup>[178]</sup>。大连理工大学研制了高分辨率光纤传感器解调仪<sup>[179]</sup>, 基于傅里叶变换结合最小均方误差的游标式解调算法<sup>[180]</sup>, 实现了毫米动态范围内高达  $0.08 \text{ nm}$  的 F-P 腔长解调分辨率。

在传感器设计方面, 大连理工大学采用激光微加工热熔键合技术制作的全石英结构的光纤 F-P 压力传感器, 具有迟滞小、稳定性好、耐高温高压、温度-压力交叉敏感性低以及长期漂移小等特点, 非常适用于复杂恶劣的工业环境中的压力测量<sup>[181]</sup>; 对光纤 F-P 压力传感器与光纤布拉格光栅 (FBG) 与分布式温度传感器的复用技术的系统研究<sup>[182]</sup>, 也大幅降低了光纤传感器的测井成本。该项目组研制的光纤 F-P 压力传感器已在辽河、新疆等油田得到了应用, 其温度适用范围为  $0 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 压力测量范围为  $0 \sim 100 \text{ MPa}$ , 测量精度和年漂移量均小于  $0.1\% \text{ F.S.}$ 。电子科技大学基于飞秒和  $157 \text{ nm}$  深紫外激光微加工技术在光纤波导包层内引入 F-P 微腔干涉仪, 实现了  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  下的高温应变精确传感<sup>[183]</sup>, 及高温下应变、压力、加速度、折射率的测量, 又发展出了更加先进的自封闭型全光纤 F-P 微腔传感器<sup>[184]</sup>。北京理工大学开展了基于飞秒激光加工和全石英结构的 F-P 高温传感器, 实现了超过

$800 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度、压力、振动、应变传感器, 以及温度/压力复合传感器<sup>[185]</sup>, 配合所研制的高精度白光干涉测量仪, 实现了对多个国家重大项目的高温环境下物理量的测试。2014 年深圳大学提出并实现了将光纤气泡微腔的圆形整形成椭圆形, 由此光纤 FPI 应变灵敏度从  $2.9 \text{ nm} \cdot \text{kPa}^{-1}$  提高到  $6.0 \text{ nm} \cdot \text{kPa}^{-1}$ <sup>[186]</sup>; 为进一步提高器件的响应灵敏度, 2015 年制备侧壁厚仅为约  $1 \mu\text{m}$  的矩形气泡微腔被提出, 其构成的光纤 FPI 应变灵敏度高达  $43.0 \text{ pm} \cdot \mu\text{e}^{-1}$ <sup>[187]</sup>。2014 年深圳大学制备了具有  $320 \text{ nm}$  壁厚的光纤端面气泡微腔, 将其构成光纤 FPI 且用于气压测量, 获得的气压响应灵敏度为  $1.036 \text{ nm} \cdot \text{MPa}^{-1}$ , 温度响应仅约为  $1 \text{ pm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ <sup>[188]</sup>; 通过深入优化电弧放电法制备纳米石英薄膜技术, 于 2017 年实现了具有  $170 \text{ nm}$  厚全石英薄膜的光纤 FPI 制备, 测试其气压响应灵敏度为  $341 \text{ nm} \cdot \text{MPa}^{-1}$ , 提高了两个数量级, 同时器件耐受温度可高达  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[4]</sup>。

### 3.2 加强沟通交流

通过国内同行的共同努力, 中国已设立了 4 个定期的系列学术会, 这些学术会议成为中国 OFS 的重要研发交流平台。在这些交流平台上, 大家互相学习、互相启发、互相借力、形成共识, 共同促进了中国 OFS 事业的进一步发展。

1) 中国光纤传感学术会议暨产业化论坛。经过 15 年的发展, 此论坛已成为国内 OFS 同行研发交流的一个重要平台, 由此可以了解到国内近期 OFS 领域的最新研发成果。此论坛已初步形成规范化办会, 其中包括由高水平专家组成的委员会, 论坛每一年半举行一次, 以期与国际 OFS 会错开半年; 论坛地点南北各一次, 各单位轮流承办, 以使中国各地区参会者更方便参与。

2) 中国(北京)国际光纤传感技术及应用大会。此会议是由中国光学工程学会(CSOE)和国际光学工程学会(SPIE)主办, 并由中国光学工程学会光纤传感技术专家工作委员会暨中国光纤传感技术及产业创新联盟、北京航天控制仪器研究所、武汉理工大学承办的年会, 每年 5 月或 6 月初在北京中国国际展览中心举行。2012 年首次举办该会议, 2017 年举办了第六届会议, 目前该会议是光电子·中国博览会的一个组成部分。

3) 亚太地区光纤传感学术会(APOS)。该会议由电子科技大学饶云江教授创办, 第一届会议由成都电子科技大学主办, 并于 2008 年 11 月在成都举行, 这是由中国创办、亚太地区 OFS 同行进行交流



的重要年会。第六届会议于 2016 年 10 月在上海召开,由上海交通大学主办。

4) 光纤和光电子传感器及其工业和安全应用国际会议。该会议由山东省科学院刘统玉教授创办,第一届会议于 2015 年 1 月在山东济南南郊宾馆召开,由山东激光所主办。这是由中国创办的 OFS 在安全领域应用为主的重要国际会议,标志着 OFS 转向应用。第二届会议于 2017 年 1 月在澳大利亚召开,第三届会议将于 2018 年在英国召开。

中国 OFS 在积极开展国内学术交流的同时,也加强了国际学术交流。OFS 国际会议是本领域最顶级的国际学术会议,此会议每一年半在欧洲、美洲和亚洲三大洲轮流举办一次,第一届会议于 1983 年在英国伦敦举办,至今已有 30 余年的历史。中国学者经过近 5 年团结一致的努力申办,终于获得承办权,首次在中国举办 OFS 国际会议。第 22 届光纤传感国际会议(OFS-22)暨光纤陀螺 35 周年年会于 2012 年 10 月在北京中国科技馆顺利举行。通过举办 OFS-22,扩大了我国 OFS 在国际上的影响,起到了让世界认识中国、中国了解世界的作用,与此同时还为我国在 OFS 国际会议的组织中争得应有的一席(靳伟教授代表我国成为 STC 委员,结束了我国在 OFS 国际会议组织中无发言人的状态,TPC 中席位也有所增加)。

在近几年的 OFS 国际会议上,我国显示了在 OFS 领域的实力,参会论文数量多,学生论文获奖数也多。例如,从 OFS-18 到 OFS-25,会议上我国发表的论文数均为第一,邀请报告和口头报告以及学生论文获奖数也不断增加。在 2017 年在韩国召开的 OFS-25 会上,学生优秀论文奖共 7 篇,有 3 篇来自我国,由此反映出我国 OFS 的研发水平已处于国际先进水平(详见 OFS 各届会议文集)。随着国际交往的增多,我国的影响力增大,将有力地推动我国 OFS 事业的发展。

在加强研发交流方面还需继续努力。不断完善办会模式,进一步探索:如何加强开发和产业之间的联系,以促进学术研究和 OFS 系统的产业化;如何加快我国 OFS 的发展,以更好地满足国家建设需求、跟上世界科技发展的趋势;如何以创新为引领,使我国 OFS 的研发不再是紧随跟进,而是赶上超越,实现在全球化进程中有我国的创造。

### 3.3 存在的问题

我国在 OFS 领域已取得很大成绩,但也存在不少问题,极大影响了进一步的发展。这些矛盾主

要有:

1) 研究与应用的矛盾。研究人员在不断地创新、探索和挖掘有新特性的 OFS,研究成果不少,而得以运用的不多;发明专利不少,但成为产品的不多;技术水平不低,但产品质量不高。

2) 资金与研发的矛盾。已有的研发成果找不到所需的经费作进一步改进和开发;有资金的企业因为不了解 OFS 市场而不敢贸然投资;想有作为的企业,却因融资难和融资贵制约了企业研发投入、技术改造和产业转型升级。

3) 性能与价格的矛盾。目前产品的性价比是制约 OFS 推广应用的因素之一,制作、使用和维护成本较高,导致用户常常放弃使用 OFS。

4) 小与大的矛盾。OFS 系统相对于实际应用和工程往往只是小附件,如何使其在大工程中发挥大作用,还有待进一步提高技术水平和完善产品质量。此外,目前从事 OFS 的研究室和企业一般规模小、研究队伍小,而所服务的对象与市场都很广,难以承接大任务。

目前,我国 OFS 的主要力量仍在高等院校和科研院所。因此首先需要明确定位,根据所在单位的性质及具有的工作基础、物质条件,明确努力的方向和目标,课题组和个人应有所为、有所不为,清楚了解能做什么,扎实做好研发工作;其次需要走向市场,要了解市场的需求是什么,并细致地了解市场对产品的实际使用要求,尤其应吸引更多的企业加入,帮助和促进相关企业的发展,走产业化的道路。

## 4 启 示

我国 OFS 事业走过了颇为艰辛的近 40 年的路程,回顾这段不平坦的历程可以看到许多引人深思的地方,从中得到不少有益的启示。

### 4.1 发展必须依靠国家进步

由于我国改革开放经济建设的飞速发展,才有包括 OFS 行业在内的各行各业的大发展。我国的 OFS 能取得如此大的进步,重要原因是得到国家的支持、依靠国家的进步。21 世纪以来,国家把 OFS 列入国家 863 计划及国家 973 计划的重点课题项目,“十二五”和“十三五”以智能传感器作为重点进行关键技术攻关,国家自然科学基金委极为重视有关重大研究计划的规划。这无疑给我国 OFS 的进一步发展带来了机遇和动力。

当前我国在实施科教兴国、人才强国、创新发展驱动、乡村振兴、区域协调发展、可持续发展和军民

融合发展、一带一路战略,这是中国 OFS 事业发展重要的保障和前提。国家对光纤传感产业的大力支持、各级政府落实以科技需求为导向出台相关政策是十分重要的。在争取国家政策支持的同时,还要紧跟国家发展战略,参与到国家的发展规划中,积极争取承担国家的任务,做出成绩与贡献,由此推动中国 OFS 事业的不断壮大和持续发展。

#### 4.2 实现成果转化为生产力

中国的 OFS 在发展中曾进入低潮,除客观因素外,主要是自身的因素。要以应用和市场为导向,促使科研成果转化为现实生产力。

1) 构建实验室与企业之间的桥梁,将研究成果向产品化过渡。如何由(供应方)学校实验室研制的成果转变为需求方(企业成熟的产品、可实用的批量产品),问题出在供应方和需求方之间缺少通达的桥梁。为此,双方应积极通过各种渠道加强沟通。

2) 实现产学研相结合,为中国 OFS 走向产业化架设桥梁。近年来开始成立产学研结合的产业联盟,这种探索很好地促进了科技成果转化和新兴产业的发展,这是一种命运共同体,通过它可共同挖掘和开拓 OFS 的技术深度和产业广度,进行工程示范和标准化研究,实现产业化。

3) 促进相关企业的发展,坚定探索走产业化的道路。要想走好产业化的道路,企业必须成为产业实体,真正成为科技成果转化的主体。企业成为产业实体在于专业化,而企业要实现专业化,必须考虑技术要实用化、产品要商品化、设备要工程化。科技成果商品化是前提,工程化是走向市场最为关键的一步。

#### 4.3 加强沟通交流共同进步

中国的 OFS 能够取得如此大的进步,同行间的相互支持是重要的原因。为了促进中国 OFS 事业的发展,需要有共同认识、齐心协力,需要相互支持、加强合作和协同创新。主要方式有:

1) 开展协作。寻找合适的合作伙伴开展协作,联合申请大项目,尤其是研发单位找用户单位联合,进行产学研结合,是解决研究课题、资金和市场的有效途径。

2) 打造平台。一方面,需打造教学-科学研究的平台,尤其是开放各级重点实验室形成共享平台,解决可持续发展的人才培养和源头创新问题;另一方面,需打造产品研发-技术应用的平台,在技术到产品的转化和连接市场应用时,解决资金短缺的不足及在完善化过程中出现的问题。

3) 组成共同体。技术的创新和市场的开发是有风险的,要想真正合作,需要建立风险共担机制,形成技术-市场共识,组建利益共同体。通过联合攻关和协同创新,走好有中国特色的产业化道路。

## 5 展 望

中国 OFS 的发展走过了一条不平坦的道路,在科研人员的不懈的努力下,已取得不菲的成绩,我们满怀信心地期望在不远的将来能够再创新的辉煌。为了中国 OFS 事业有更好的发展,必须要有理性思维和战略思考,需减少盲目性、少走弯路,需高瞻远瞩和加倍努力。

### 5.1 不忘初心,方得始终

中国 OFS 的发展历经曲折、有诸多困难和挑战,但是始终坚持研究开发,没有停步。OFS 在传感领域中发挥其特有作用的初衷不变;坚持互相学习交流、支持帮助的初衷不变,一开始就形成了相互沟通、相互合作的良好风气。

不忘初心,方得始终。最初为数不多的几个研究单位在简陋的实验条件下尝试探索,在坚持不懈的努力下有了良好的开端。研究人员在实践中越来越深刻认识到:进一步的发展必须走产业化的道路。目前中国 OFS 事业发展已进入一个新阶段,面向将来,任重道远;要充分发挥学术交流平台的作用,坚守初心,正确引导,集思广益;要加强交流,提出建议,联合开发,展开技术咨询与产业评估;要团结、依靠大多数,注意发掘新成果,重视培养年轻人;要推进产学研合作,促使企业真正成为科技成果转化的主体,把交流平台越办越好。既然已明确走产业化的道路,就要百折不回地坚定走下去。

中国 OFS 的发展证明:任何事业都是从简单开始、从小事做起,作始也简,将毕也巨;需要以自强不息的精神将事业勉力推进,有志者事竟成。在今后一段时间内可能迫切要解决的主要问题是:通过找准应用市场来促进应用,通过降低成本来扩大市场,通过增强产业实力来建设产业。

随着中国经济建设的不断发展,提供给 OFS 发展的市场是十分广阔的。例如:电力行业、石油化工业、生物医疗行业、环保行业、大型构件的健康诊断、安全监测、航天航空和国防军事领域等。

要使 OFS 在实际现场能成功应用,需要注意:

1) 加强沟通。研制方和应用方应加强沟通与相互配合,使双方有尽可能多的共同语言,发现问题共同协作解决。

2) 提取指纹。传感的精确度在于信号的处理,其关键是通过现场实验提取被测对象最主要的特征参量(指纹)。例如,在铁道防落石的传感器要注意获取铁道落石引起振动的特征频率。

3) 封装技术。光纤传感器探头和关键器件的封装是传感器成功应用的又一关键。不少现场需要对系统做特殊封装,尤其针对恶劣条件下的应用。

4) 界面友好。为便于推广应用,最终显示页面应简洁明了,尽可能直接给出用户要测的参量。例如,用FBG测温度,应直接给出被测的温度值,而不是中心波长的移动量。

5) 使用方便。传感系统的操作尽量做到“傻瓜型”,使用简捷,便于非专业人员操作。

6) 稳定可靠。在现场应用的光纤传感系统应力求做到长期稳定可靠,以取得用户的信任。

产业实力增强的关键点在于研发能力,研究人员应特别重视其关键技术的成熟和创新。产业实力增强的重点在于队伍和创新人才,有了人才增强产业实力就有希望。需要的人才应具有以下特点:坚定信念,能潜心研究去实现科研的突破;脚踏实地,能深入工程去实现应用的突破;思想解放,能进行国际交流去实现科技视野的突破。

## 5.2 前途光明,道路曲折

中国OFS的发展已获得长足的进步,进入了实用化阶段,但是需要清醒地看到,中国的研究水平、技术水平及产品水平仍然远不能满足实际需要,与国外发达国家相比还有一定的差距,相关市场刚刚形成,而且市场是有风险和不确定性的,以市场为导向的产业化之路还很长,前途光明,道路曲折。以下几方面,应是今后发展需要予以特别关注的,并希望有所创新、有所突破、有所成就。

1) 加强OFS新器件及技术的研发。目前创新驱动发展是中国提出的重大战略决策,欲推进OFS的进一步发展,至关重要的是对其中关键技术的研究和创新。关键技术往往起到核心的主导作用,重大的创新也全在于关键技术的突破,而关键技术的发展又往往涉及到新器件、新机理。OFS所用的元器件有着特殊的制作要求,为此需要掌握OFS发展趋势,主要包括:多参量实时测量、高精度实用检测、分布式检测网络化、全光纤微型化与智能化、极端环境下的应用等。

2) 企业要成为科技成果转化的主体。中国OFS事业持续稳定的发展,有赖于科技实力整体增强,因此需要有一批专业的研发实体;要不断壮大研

发实体,走产学研结合的道路是必然的途径。随着市场的开拓和产业化发展,更需要有产业实体,企业有望成为研发的主力军。今后要大力关注和扶植与OFS相关的企业,充分发挥中小企业的优势,扬长补短,在激烈的市场竞争中求得生存及发展。为此需要采取相应的措施助力企业的发展:①进一步加强政府政策推动;②提高中小企业的专业化水平;③走中小企业的联合之路;④与有关的大企业建立良好的分工协作关系。企业兴则产业兴。

3) 加快建立OFS科技数据库。当前,中国将大数据战略上升为国家战略,因此利用大数据技术建立OFS科技数据库势在必行、十分重要。通过数据库了解世界在这一领域里的发展轨迹与现状,进行学习借鉴、继承和发展,避免重复劳动,有目标地去追赶超越。应重视建立OFS科技数据库,可以自己组织或委托他人打造这一科技创新的支持平台。数据库大数据并不仅在于大,而在于有用,如何利用这些大数据是关键。

4) 加强OFS知识产权保护和运用。应清醒认识知识产权作为国家一项长期发展战略的重要性,及其对提升国家竞争力的作用。需要加强法律意识,在进行技术研发、技术应用时,不要只关注纯技术问题,而要注意技术与法律并重,注意知识产权(尤其是专利)的保护和运用。

5) 重视“理工结合”人才的培养。中国OFS研究中存在基础研究不足的问题,尤其缺乏原创性研究。以往进行OFS研究的人多以工科为主、多从技术层面深入,这显然是不够的。因此,需要特别强调OFS的研究必须理工结合,要从基础研究入手寻找创新点,创新的关键在于思路和路径的选择。科学的存在和技术的进步全靠新发现,青年人敢于探索是创新活力的源泉,要重视理工结合人才的培养。

6) 抓住机遇,在智能化领域大展身手。21世纪以来,物联网、智慧城市、智能电网与智能交通、安全监测网等应用领域的兴起,中国制造2025及智能制造、互联网+等一系列战略计划的提出,将需要包括OFS在内的各种传感技术及产品发挥作用。这很可能是充分展现和运用OFS的良好契机,是可以大有作为的用武之地。

7) 重视产品和技术的标准化。OFS的技术面广、产品种类多、市场广泛而杂乱,造成目前大多数产品都没有统一的标准和技术规范,各个公司生产的传感器和解调仪的互换性差,外形、尺寸、安装方式、技术指标、使用条件千差万别,对工程应用和市

场推广极为不利。因此,需要团结国内同行,尤其是同业公司,制定产品标准,共同做大市场。

综上所述,随着国家经济发展水平、信息化水平的提升,中国 OFS 事业是大有希望的。要抓住机遇、迎接挑战,让 OFS 达到与其重要地位相称的新水平,在中国经济建设和科学研究方面起到重要的作用。

## 6 结 语

在中国 OFS 事业近 40 年的发展中,认识到:要前进就必须走产业化的道路,事实证明这是完全正确的;必须加强 OFS 新器件及技术的研发,加强产学研的结合,企业要在产业化中起主导作用;要继续努力,在中国实现 OFS 工程化和产业化,争取跻身到世界 OFS 应用的前列。

今后中国 OFS 的产业化趋势和发展战略主要包括两个方面:

1) “一点突破”打歼灭战。在一个或若干个国家重点应用领域里,充分利用已有的研发平台,集中力量协同攻关争取突破,产生明显的示范效应并形成较大的市场,以此带动在其他领域中广泛使用的 OFS 技术。

2) “多点开花”打游击战。OFS 有百余种,能够探测多种物理量,在许多特殊的场合可充分利用其特点、发挥其作用,因此 OFS 市场很可能是个性化的、多品种细分的小批量市场,通过市场运作,多个相同或相似类型的小市场也能聚集为大市场,由此逐步扩大应用的市场,带动 OFS 行业的全面发展。

总而言之,不管中国 OFS 的产业化道路有多长、有多难,必须义无反顾地坚持,加快步伐走下去,进一步促进中国 OFS 的学术研究,使技术及系统的产业化上一个新台阶,更好地满足国家建设需求、跟上世界科技发展的趋势。深入实施创新驱动发展的战略,脚踏实地推进中国 OFS 事业的发展,而且有信心赶超世界先进水平,早日实现在 OFS 方面也有“中国创造”。

## 参 考 文 献

- [1] 廖延彪. 中国光纤传感发展回顾与展望[C]//2010-光纤传感器发展与产业化论坛, 2010.
- [2] 廖延彪. 在我国发展光纤传感器的必要性与可能性[R]. 国家传感器技术政策专家论证报告, 1986.
- [3] 廖延彪. 我国光纤传感发展的现状[C]//光纤传感学术交流暨仪表元件学会光纤传感专业委员会成立大会, 1985.
- [4] Liao Y B. An overview of optical fiber sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 1984, 11(9): 513-519. 廖延彪. 光纤传感器[J]. 中国激光, 1984, 11(9): 513-519.
- [5] 廖延彪. 光纤传感器[C]//《中国激光》出版十周年纪念大会及学术交流会, 1984.
- [6] 杨雪郁, 廖延彪, 吴庚生, 等. 光纤高压大电流传感器两种检测系统分析[J]. 激光与红外, 1986(5): 23-26.
- [7] Yang X Y, Liao Y B, Wu G S, *et al.* Analysis of detection system of fiber current sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 14(5): 312-316. 杨雪郁, 廖延彪, 吴庚生, 等. 光纤电流传感器检测系统的分析[J]. 中国激光, 1987, 14(5): 312-316.
- [8] 廖延彪. 光纤传感器的发展概况[C]//仪表元件学会第二届学术年会, 1987.
- [9] Liao Y B. A new detection scheme for overcoming the zero drift problem in polarimetric fiber-optic current sensors[C]//Proceedings of Sino-Japanese International Symposium on Optical Sensors, 1988: 18-20.
- [10] Liao Y B, Chen G L, Wu G S, *et al.* The experimental study and theoretical analysis of an optical fiber current sensor[C]//Optical Fibres and Their Applications V, 1990: 185-194.
- [11] Liao Y B. Study of long time stability in the OFCS[C]//Proceedings of the International Conferences on Lasers, 1991: 833-837.
- [12] Brian C. International conference on optical fibre sensors in China OFS (C)'91[C]. SPIE, 1991, 1572: 603.
- [13] Liao Y, Song Q. Optical fiber Mach-Zehnder interferometer for smart skins[C]. Fiber Optic Smart Structures and Skins V, 1993, 1798: 186-192.
- [14] Zhang P G, Zhao H F, Liao Y B. Theoretical analysis and design on optical fiber magneto-optic current sensing head[C]. International Conference on Optical Fibre Sensors in China OFS (C)'91, 1991: 528-534.
- [15] 廖延彪. 高精度光纤油罐群检测系统[C]//OFS'93 全国光纤传感器学术会议论文集, 1993: 20-22.
- [16] OFS'93 全国光纤传感器学术会议论文集[C]. [出版地不详: 出版者不详], 1993.
- [17] 全国光纤传感暨光电器件学术会议论文集[C]. [出版地不详: 出版者不详], 2004.
- [18] 光纤传感技术发展产业化国际论坛论文集[C]. [出版地不详: 出版者不详], 2005.
- [19] 2010-光纤传感器发展与产业化论坛论文集[C]. [出版地不详: 出版者不详], 2010.
- [20] 2017-中国光纤传感学术会议暨产业化论坛[C]. [出版地不详: 出版者不详], 2017.
- [21] Jiang Y N, Fan C C, Yang X Y. The fundamental

- precision limit of optical gyros[J]. Chinese Journal of Lasers, 1981, 8(9): 34-41.
- 姜亚南, 范崇澄, 杨雪郁. 光学陀螺仪的基本精度极限[J]. 中国激光, 1981, 8(9): 34-41.
- [22] Zhang W X, Du X Z. Experimental research of a closed-loop fiber-optic gyroscope[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1991, 12(4): B148-B153.
- 张惟叙, 杜新政. 闭环光纤陀螺研究[J]. 航空学报, 1991, 12(4): B148-B153.
- [23] Jin W, Zhang W X. Analysis of fiber optic gyroscopes using E/O frequency shifters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1989(3): 79-85.
- 靳伟, 张惟叙. 应用电光移频器的新型光纤陀螺方案分析[J]. 北京航空航天大学学报, 1989(3): 79-85.
- [24] Wang W. A new research on evaluation of combat effectiveness for weapon system[J]. Missiles and Space Vehicles, 1994(4): 23-30.
- 王巍. 闭环光纤陀螺的输出频率误差[J]. 导弹与航天运载技术, 1994(4): 23-30.
- [25] Zhou K J, Wang T, Zhang C X, *et al.* A single-mode fiber optic gyroscope with low long-term drift[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1996, 17(6): 584-587.
- 周柯江, 王涛, 张春熹, 等. 具有低长期漂移的单模光纤陀螺[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(6): 584-587.
- [26] Ma J, Zhang W X. Research of open-loop all PM-fiber gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 20(3): 351-356.
- 马静, 张惟叙. 开环全保偏光纤陀螺研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1994, 20(3): 351-356.
- [27] Ye W, Ni Y F, Zhao W D, *et al.* Research on digital signal detection method in closed loop fiber gyros[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(4): 334-337.
- 叶炜, 倪永锋, 赵为党, 等. 闭环光纤陀螺全数字式信号检测方法研究[J]. 光子学报, 1998, 27(4): 334-337.
- [28] Zhang C X, Song N F, Du X Z, *et al.* All digital DSP based closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(6): 695-698.
- 张春熹, 宋凝芳, 杜新政, 等. 基于 DSP 的全数字闭环光纤陀螺[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(6): 695-698.
- [29] Wang W, Yang Q S, Wang X F. Application of fiber-optic gyro in space and key technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 509-512.
- 王巍, 杨清生, 王学锋. 光纤陀螺的空间应用及其关键技术[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 509-512.
- [30] Yang Y, Yu S, Zheng Z, *et al.* Erbium-doped superfluorescent fiber source for fiber optic gyroscope[C]. Advanced Sensor Systems and Applications, 2002: 111-115.
- [31] Li C, Yang J, Yu Z, *et al.* Dynamic range beyond 100 dB for polarization mode coupling measurement based on white light interferometer[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16247-16257.
- [32] Yang Y, Ye M, Duan W, *et al.* Polarization maintaining photonic crystal fiber IFOG[C]. OFS2012 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, 2012: 84210D.
- [33] 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院. 光子晶体光纤陀螺首飞成功[OL]. (2017-07-04) [2017-11-22]. <http://www.buaa.edu.cn/info/1392/6212.htm>.
- [34] Feng L, Ren X, Deng X, *et al.* Analysis of a hollow core photonic bandgap fiber ring resonator based on micro-optical structure[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 18202-18208.
- [35] Ma H, Zhang J, Wang L, *et al.* Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3546-3554.
- [36] Wang Y, Liao Y B. Study of a new non-contact fiber optic vibration sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(6): 637-640.
- 王勇, 廖延彪. 一种新型非接触式光纤振动传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(6): 637-640.
- [37] Meng Z, Hu Y, Ni M, *et al.* Development of a 32-element fibre optic hydrophone system[C]. SPIE, 2004, 5589: 114-119.
- [38] Ni M, Li X L, Zhang R H, *et al.* Seatests of an all-optical fiber-optic hydrophone system[J]. Acta Acustica, 2004, 29(6): 539-543.
- 倪明, 李秀林, 张仁和, 等. 全光光纤水听器系统海上试验[J]. 声学学报, 2004, 29(6): 539-543.
- [39] 何向阁. 分布式光纤声振动传感关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [40] 刘飞. 基于外差方案的光纤微地震监测系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [41] Zhang W, Liu Y, Li F. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(9): 631-633.
- [42] Wang J, Luo H, Meng Z, *et al.* Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1178-1184.
- [43] Kang C, Zhang M, Chen H J, *et al.* Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8): 1214-1219.
- 康崇, 张敏, 陈洪娟, 等. 薄壁圆柱壳体压差式光纤

- 矢量水听器[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1214-1219.
- [44] Luo H, Xiong S D, Hu Y M, *et al.* Research on three-component all polarization-maintaining fiber optic accelerometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1382-1386.  
罗洪, 熊水东, 胡永明, 等. 三分量全保偏光纤加速度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1382-1386.
- [45] Zhang H Y, Wang L W, Shi Q P, *et al.* A new demodulation method for time division multiplexing system of fiber-optic hydrophone using a  $3 \times 3$  couple[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0505011.  
张华勇, 王利威, 施清平, 等. 光纤水听器时分复用系统通过  $3 \times 3$  耦合器信号解调的一种新算法[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505011.
- [46] Jiang Y. Wavelength division multiplexing addressed four-element fiber optical laser hydrophone array[J]. Applied Optics, 2007, 46(15): 2939-2948.
- [47] Chen W, Meng Z. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 0305002.  
陈伟, 孟洲. 相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0305002.
- [48] Cao C Y, Xiong S D, Hu Z L, *et al.* Noise analysis of repeaterless long-Haul fiber-optic hydrophone systems with the fiber length up to 200 km[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406006.  
曹春燕, 熊水东, 胡正良, 等. 光纤水听器 200 km 无中继传输系统噪声研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406006.
- [49] Chen M, Meng Z, Tu X, *et al.* Low-noise, single-frequency, single-polarization Brillouin/erbium fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2041-2043.
- [50] Hu Y, Hu Z, Luo H, *et al.* Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China[C]. OFS2012 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, 2012: 84210Q.
- [51] 江毅. 光纤光栅及其传感器的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 1996.
- [52] 王向阳. 光纤布拉格光栅制作及其传感特性研究[D]. 北京: 清华大学, 1997.
- [53] 靳伟, 廖延彪, 张志鹏. 导波光学传感器: 原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [54] 靳伟, 阮双琛. 光纤传感技术新进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [55] 饶云江, 王一平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [56] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [57] Liao Y B, Li M, Yan C S. Principles of contemporary optical information sensing[M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.  
廖延彪, 黎敏, 阎春生. 现代光信息传感原理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [58] Jiang D S, Gao X Q. The method of FBG sensing for a sort of dense distributed measurement[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(10): 960-962.  
姜德生, 高雪清. 一类密集型分布式 FBG 传感方法[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 960-962.
- [59] Qiao X G, Han P, Jia Z A, *et al.* Research on simultaneous discriminating measurement of temperature and pressure using fiber grating sensing technology[J]. Journal of Optoelectronics • Lasers, 2009, 20(9): 1186-1188.  
乔学光, 韩鹏, 贾振安, 等. 光纤光栅温度压力同时区分测量技术研究[J]. 光电子•激光, 2009, 20(9): 1186-1188.
- [60] Qiao X, Wang Y, Yang H, *et al.* Ultrahigh-temperature chirped fiber Bragg grating through thermal activation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1305-1308.
- [61] Zhang J, Qiao X, Liu F, *et al.* A tunable erbium-doped fiber laser based on an MZ interferometer and a birefringence fiber filter[J]. Journal of Optics, 2011, 14(1): 015402.
- [62] Zhou H, Qiao X G, Li J N, *et al.* Study on property modification with nanometric particles for epoxy adhesive agent used to coat the fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronics • Lasers, 2009, 20(5): 590-594.  
周红, 乔学光, 李娟妮, 等. 用于光纤光栅封装的环氧胶粘剂纳米改性研究[J]. 光电子•激光, 2009, 20(5): 590-594.
- [63] Liu Q, Tokunaga T, He Z. Ultra-high-resolution large-dynamic-range optical fiber static strain sensor using Pound-Drever-Hall technique[J]. Optics Letters, 2011, 36(20): 4044-4046.
- [64] Liu Q, Tokunaga T, He Z. Sub-nano resolution fiber-optic static strain sensor using a sideband interrogation technique[J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 434-436.
- [65] Chen J, Liu Q, Fan X, *et al.* Ultrahigh resolution optical fiber strain sensor using dual Pound-Drever-Hall feedback loops[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 1066-1069.
- [66] Wang C, He J, Zhang J, *et al.* Bragg gratings inscribed in selectively inflated photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28442-28450.
- [67] He J, Wang Y, Liao C, *et al.* Negative-index gratings

- formed by femtosecond laser overexposure and thermal regeneration[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23379.
- [68] Han P, Li Z, Chen L, *et al.* A high-speed distributed ultra-weak FBG sensing system with high resolution[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(15): 1249-1252.
- [69] Hu C, Wen H, Bai W. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1406-1411.
- [70] Guo H, Liu F, Yuan Y, *et al.* Ultra-weak FBG and its refractive index distribution in the drawing optical fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4829-4838.
- [71] Yang M, Bai W, Guo H, *et al.* Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(1): 26-41.
- [72] Ou Y, Zhou C, Qian L, *et al.* Large-capacity multiplexing of near-identical weak fiber Bragg gratings using frequency-shifted interferometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31484-31495.
- [73] Xu R, Guo H, Liang L. Distributed fiber optic interferometric geophone system based on draw tower gratings[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(3): 246-252.
- [74] Xu R Q, Guo H Y, Li W, *et al.* Ultra-narrow linewidth random fiber laser based on all grating fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201005.  
许儒泉, 郭会勇, 黎威, 等. 基于全光栅光纤的超窄线宽随机光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201005.
- [75] Yao Y, Li Z, Wang Y, *et al.* Performance optimization design for a high-speed weak FBG interrogation system based on DFB laser[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1472.
- [76] Zheng Y, Yu H, Guo H, *et al.* Analysis of the spectrum distortions of weak fiber Bragg gratings fabricated In-line on a draw tower by the phase mask technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2670-2673.
- [77] Zheng Y, Yu H, Guo H, *et al.* Theoretical calculations of crosstalk and time delay in identical FBG array in PM fiber[C]. *Sensors*, 2016: 16582151.
- [78] Wang Z, Wen H, Luo Z, *et al.* Time division multiplexing of 106 weak fiber Bragg gratings using a ring cavity configuration[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(2): 132-136.
- [79] Guo H, Qian L, Zhou C, *et al.* Crosstalk and ghost gratings in a large-scale weak fiber bragg grating array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 2032-2036.
- [80] 张在宣, 郭宁, 余向东, 等. 10 km LD 分布式光纤温度传感器系统[J]. *激光与光电子学进展*, 1999, 36(9): 43-46.
- [81] Zhang Z X, Liu H L, Guo N, *et al.* 30 km distributed optical fiber Raman photons temperature lidar[C]. *SPIE*, 2003, 4893: 78-82.
- [82] Zhou D, Dong Y, Wang B, *et al.* Slope-assisted BOTDA based on vector SBS and frequency-agile technique for wide-strain-range dynamic measurements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1889-1902.
- [83] Teng L, Zhang H, Dong Y, *et al.* Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4413-4416.
- [84] Dong Y, Teng L, Tong P, *et al.* High-sensitivity distributed transverse load sensor with an elliptical-core fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5003-5006.
- [85] Dong Y, Xu P, Zhang H, *et al.* Characterization of evolution of mode coupling in a graded-index polymer optical fiber by using Brillouin optical time-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26510-26516.
- [86] Dong Y, Jiang T, Teng L, *et al.* Sub-MHz ultrahigh-resolution optical spectrometry based on Brillouin dynamic gratings[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2967-2970.
- [87] Jia X H, Rao Y J, Chang L, *et al.* Enhanced sensing performance in long distance Brillouin optical time-domain analyzer based on Raman amplification: Theoretical and experimental investigation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(11): 1624-1630.
- [88] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, *et al.* Brillouin optical time domain analyzer based on bi-directional Raman amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5523-5527.  
张超, 饶云江, 贾新鸿, 等. 基于双向拉曼放大的布里渊光时域分析系统[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5523-5527.
- [89] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, *et al.* Influence of optical simple pulse coding on the Brillouin optical time domain analyzer based on bi-directional Raman amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 104211.  
张超, 饶云江, 贾新鸿, 等. 光脉冲编码对基于拉曼放大的布里渊光时域分析系统的影响[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 104211.
- [90] Wang F, Zhan W, Lu Y, *et al.* Determining the change of Brillouin frequency shift by using the similarity matching method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(19): 4101-4108.

- [91] Zhang Y, Wu X, Ying Z, *et al.* Performance improvement for long-range BOTDR sensing system based on high extinction ratio modulator[J]. Electronics Letters, 2014, 50(14): 1014-1016.
- [92] Tu G, Zhang X, Zhang Y, *et al.* Strain variation measurement with short-time Fourier transform-based Brillouin optical time-domain reflectometry sensing system[J]. Electronics Letters, 2014, 50(22): 1624-1626.
- [93] Song M P, Qiu C. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 954-958.  
宋牟平, 裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 954-958.
- [94] Song M P, Bao C, Qiu C, *et al.* A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 650-654.  
宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 650-654.
- [95] Jia X H, Rao Y J, Peng F, *et al.* Random-lasing-based distributed fiber-optic amplification[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6572-6577.
- [96] Jia X H, Rao Y J, Yuan C X, *et al.* Hybrid distributed Raman amplification combining random fiber laser based 2<sup>nd</sup>-order and low-noise LD based 1<sup>st</sup>-order pumping[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24611-24619.
- [97] Dong Y, Zhang H, Chen L, *et al.* 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair[J]. Applied Optics, 2012, 51(9): 1229-1235.
- [98] Xie S, Pang M, Bao X, *et al.* Polarization dependence of Brillouin linewidth and peak frequency due to fiber inhomogeneity in single mode fiber and its impact on distributed fiber Brillouin sensing[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6385-6399.
- [99] Xie S R. Polarization properties of Brillouin scattering and interferometry in optical fibers and their applications on distributed fiber sensing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.  
谢尚然. 布里渊散射与干涉中的偏振问题及其分布式传感应用[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [100] 曹珊. 光纤中布里渊散射的偏振相关问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [101] Wang Y, Wang B, Wang A. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [102] Wang Z, Fan M, Zhang L, *et al.* Long-range and high-precision correlation optical time-domain reflectometry utilizing an all-fiber chaotic source[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15514-15520.
- [103] Zhang L, Pan B, Chen G, *et al.* Long-range and high-resolution correlation optical time-domain reflectometry using a monolithic integrated broadband chaotic laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 1253-1256.
- [104] Liu Q, Fan X, He Z. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6 m spatial resolution over entire 110 km range[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25988-25995.
- [105] Wang S, Fan X, Liu Q, *et al.* Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33301-33309.
- [106] Ding Z, Yao X S, Liu T, *et al.* Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28319-28329.
- [107] Wang S, Fan X, Wang B, *et al.* Sub-THz-range linearly chirped signals characterized using linear optical sampling technique to enable sub-millimeter resolution for optical sensing applications[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10224-10233.
- [108] Lu B, Pan Z, Wang Z, *et al.* High spatial resolution phase-sensitive optical time domain reflectometer with a frequency-swept pulse[J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 391-394.
- [109] Chen W M, Wang N, Zhu Y, *et al.* Experimental study on the affection of Gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(1): 88-92.  
陈伟民, 王宁, 朱永, 等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(1): 88-92.
- [110] Zhang G J, Yu Q X. An investigation of fiber-optics sensor based on extrinsic F-P cavity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(z1): 253-254.  
张桂菊, 于清旭. 一种非本征 F-P 腔型光纤传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(z1): 253-254.
- [111] Zhang P, Wang J, Zhu Y, *et al.* Novel demodulation system of optical fiber Fabry-Perot sensor based on DSP[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 437-440.  
章鹏, 王军, 朱永, 等. 基于 DSP 的新型光纤法珀



- 传感解调系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 437-440.
- [112] Lu H S, Zhang P, Chen W M, *et al.* Study on fiber Fabry-Perot strain sensors series and parallel mixed multiplexing with discrete gap transform[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5): 842-846.  
陆海松, 章鹏, 陈伟民, 等. 光纤法珀应变传感器串并联混合复用的离散腔长变换解调研究[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 842-846.
- [113] Duan D, Rao Y, Wen W P, *et al.* In-line all-fibre Fabry-Perot interferometer high temperature sensor formed by large lateral offset splicing[J]. Electronics Letters, 2011, 47(6): 401-403.
- [114] Wang W Y, Wen J X, Pang F F, *et al.* All single-mode fiber Fabry-Perot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1005001.  
王文轅, 文建湘, 庞拂飞, 等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005001.
- [115] Jiang Y, Tang C. Passive interrogation of an extrinsic Fabry-Pérot interferometer using a three-wavelength method[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 064401-064405.
- [116] Jiang Y, Tang C. Fourier transform white-light interferometry based spatial frequency-division multiplexing of extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 106105.
- [117] Jiang Y. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 925-932.
- [118] Lou J, Wang Y, Tong L. Microfiber optical sensors: A review[J]. Sensors, 2014, 14(4): 5823-5844.
- [119] Guo X, Ying Y, Tong L. Photonic nanowires: From subwavelength waveguides to optical sensors[J]. Accounts of Chemical Research, 2013, 47(2): 656-666.
- [120] Kou J L, Ding M, Feng J, *et al.* Microfiber-based Bragg gratings for sensing applications: A review[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8861-8876.
- [121] Sun D, Guo T, Ran Y, *et al.* In-situ DNA hybridization detection with a reflective microfiber grating biosensor[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2014, 61: 541-546.
- [122] Guo X, Tong L. Supported microfiber loops for optical sensing[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 14429-14434.
- [123] Xu Z, Sun Q, Li B, *et al.* Highly sensitive refractive index sensor based on cascaded microfiber knots with Vernier effect[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6662-6672.
- [124] Liao C, Wang D, Wang Y. Microfiber in-line Mach-Zehnder interferometer for strain sensing[J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 757-759.
- [125] Tan Y, Sun L P, Jin L, *et al.* Microfiber Mach-Zehnder interferometer based on long period grating for sensing applications[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 154-164.
- [126] Zhang L, Wang P, Xiao Y, *et al.* Ultra-sensitive microfiber absorption detection in a microfluidic chip[J]. Lab on a Chip, 2011, 11(21): 3720-3724.
- [127] Zhang L, Li Z, Mu J, *et al.* Femtoliter-scale optical nanofiber sensors[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28408-28415.
- [128] Gu F, Zhang L, Yin X, *et al.* Polymer single-nanowire optical sensors[J]. Nano Letters, 2008, 8(9): 2757-2761.
- [129] Zhu H, Wang Y, Li B. Tunable refractive index sensor with ultracompact structure twisted by poly(trimethylene terephthalate) nanowires[J]. ACS Nano, 2009, 3(10): 3110-3114.
- [130] Meng C, Xiao Y, Wang P, *et al.* Quantum-dot-doped polymer nanofibers for optical sensing[J]. Advanced Materials, 2011, 23(33): 3770-3774.
- [131] Wang P, Wang Y, Yang Z, *et al.* Single-band 2-nm-line-width plasmon resonance in a strongly coupled Au nanorod[J]. Nano Letters, 2015, 15(11): 7581-7586.
- [132] Huang Y, Yu B, Guo T, *et al.* Ultrasensitive and *in situ* DNA detection in various pH environments based on a microfiber with a graphene oxide linking layer[J]. RSC Advances, 2017, 7(22): 13177-13183.
- [133] Jin W, Cao Y, Yang F, *et al.* Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6767.
- [134] Yang F, Tan Y, Jin W, *et al.* Hollow-core fiber Fabry-Perot photothermal gas sensor[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3025-3028.
- [135] Cao Y, Jin W, Ho H L, *et al.* Miniature fiber-tip photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 434-436.
- [136] Wang Q, Wang J, Li L, *et al.* An all-optical photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 153(1): 214-218.
- [137] Tan Y, Zhang C, Jin W, *et al.* Optical fiber photoacoustic gas sensor with graphene nano-mechanical resonator as the acoustic detector[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 1-11.

- [138] Mao X, Zhou X, Gong Z, *et al.* An all-optical photoacoustic spectrometer for multi-gas analysis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 232: 251-256.
- [139] Yang M, Dai J. Fiber optic hydrogen sensors: A review[J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(4): 300-324.
- [140] Yuan L, Yang J, Liu Z, *et al.* In-fiber integrated Michelson interferometer[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(18): 2692-2694.
- [141] Peng F, Yang J, Li X, *et al.* In-fiber integrated accelerometer[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2056-2058.
- [142] Zhou A, Zhang Y, Li G, *et al.* Optical refractometer based on an asymmetrical twin-core fiber Michelson interferometer[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3221-3223.
- [143] Yuan L, Yang J, Liu Z. A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber Michelson interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1114-1117.
- [144] Hitz B. All-fiber Michelson interferometer proposed as unique sensor[OL]. [2017-11-22]. <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=27246>.
- [145] Yang X, Guo X, Li S, *et al.* Lab-on-fiber electrophoretic trace mixture separating and detecting an optofluidic device based on a microstructured optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1873-1876.
- [146] Yang X, Zheng Y, Luo S, *et al.* Microfluidic in-fiber oxygen sensor derivates from a capillary optical fiber with a ring-shaped waveguide[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 182: 571-575.
- [147] Yuan T, Zhong X, Guan C, *et al.* Long period fiber grating in two-core hollow eccentric fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33378-33385.
- [148] Yuan L, Wang X. Four-beam single fiber optic interferometer and its sensing characteristics[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 138(1): 9-15.
- [149] Yuan L. Recent progress of in-fiber integrated interferometers[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 1-5.
- [150] Yuan L, Yang J, Guan C, *et al.* Three-core fiber-based shape-sensing application[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 578-580.
- [151] Guan B O, Jin L, Zhang Y, *et al.* Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1097-1112.
- [152] Jin L, Liang Y, Li M P, *et al.* A 16-element multiplexed heterodyning fiber grating laser sensor array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(22): 3808-3813.
- [153] Bai X, Liang Y, Sun H, *et al.* Sensitivity characteristics of broadband fiber-laser-based ultrasound sensors for photoacoustic microscopy[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17616-17626.
- [154] Liu D, Liang Y, Jin L, *et al.* Highly sensitive fiber laser ultrasound hydrophones for sensing and imaging applications[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(19): 4530-4533.
- [155] Liang Y, Jin L, Wang L, *et al.* Fiber-laser-based ultrasound sensor for photoacoustic imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40849.
- [156] Lu Y C, Huang W P, Jian S S. Influence of mode loss on the feasibility of grating-assisted optical fiber surface plasmon resonance refractive index sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(21): 4804-4808.
- [157] Zhao Y, Deng Z Q, Wang Q. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 192: 229-233.
- [158] Zhao J, Cao S, Liao C, *et al.* Surface plasmon resonance refractive index sensor based on silver-coated side-polished fiber[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 230: 206-211.
- [159] Tan Z, Hao X, Shao Y, *et al.* Phase modulation and structural effects in a D-shaped all-solid photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15049-15063.
- [160] Wang T, Liu T, Liu K, *et al.* An EMD-based filtering algorithm for the fiber-optic SPR sensor[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-8.
- [161] Caucheteur C, Guo T, Liu F, *et al.* Ultrasensitive plasmonic sensing in air using optical fibre spectral combs[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13371.
- [162] Guo T, Liu F, Liang X, *et al.* Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 78: 221-228.
- [163] Liu Z, Wei Y, Zhang Y, *et al.* Twin-core fiber SPR sensor[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2826-2829.
- [164] Liu Z, Wei Y, Zhang Y, *et al.* Distributed fiber surface plasmon resonance sensor based on the incident angle adjusting method[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4452-4455.
- [165] Liang Y, Peng W, Li L, *et al.* Tunable plasmonic resonances based on elliptical annular aperture arrays on conducting substrates for advanced biosensing[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3909-3912.
- [166] Liang Y, Lu M, Chu S, *et al.* Tunable plasmonic resonances in the hexagonal nanoarrays of annular aperture for biosensing[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1):

- 205-212.
- [167] Chen S, Liu Y, Liu Q, *et al.* Self-reference surface plasmon resonance biosensor based on multiple-beam interference[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(21): 7568-7571.
- [168] Zhang Y, Wang F, Liu Z, *et al.* Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating[J]. Optics express, 2017, 25(20): 24521-24530.
- [169] Lu M, Zhang X, Liang Y, *et al.* Liquid crystal filled surface plasmon resonance thermometer[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10904-10911.
- [170] Lu M, Liang Y, Qian S, *et al.* Optimization of surface plasmon resonance biosensor with Ag/Au multilayer structure and fiber-optic miniaturization[J]. Plasmonics, 2017, 12(3): 663-673.
- [171] Wang B, Jing Z G, Peng W, *et al.* Phase difference signal processing technology in surface plasmon resonance sensing system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0608009.  
王斌, 荆振国, 彭伟, 等. 相位表面等离子体共振传感系统中的相差信号处理技术[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608009.
- [172] Qian S, Liang Y, Ma J, *et al.* Boronic acid modified fiber optic SPR sensor and its application in saccharide detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 220: 1217-1223.
- [173] Peng W, Liu Y, Fang P, *et al.* Compact surface plasmon resonance imaging sensing system based on general optoelectronic components[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 6174-6185.
- [174] Liu Y, Liu Q, Chen S, *et al.* Surface plasmon resonance biosensor based on smart phone platforms[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 12864.
- [175] Jiang Y, Tang C J, Guo G R. Note: Phase compensation in the fiber optical quadrature passive demodulation scheme[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(4): 046108.
- [176] Jiang Y, Ding W H, Liang P J, *et al.* Phase-shifted white-light interferometry for the absolute measurement of fiber optic Mach-Zehnder interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3294-3299.
- [177] Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.
- [178] Jiang Y, Tang C J. Fourier transform white-light interferometry based spatial frequency-division multiplexing of extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 106105.
- [179] Wang Q, Yu Q X. Continuously tunable S and C+L bands ultra wideband erbium-doped fiber ring laser[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(8): 607-610.
- [180] Zhou X L, Yu Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7): 1602-1606.
- [181] Wang Q, Zhang L, Sun C, *et al.* Multiplexed fiber-optic pressure and temperature sensor system for down-hole measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(11): 1879-1883.
- [182] Zhou X L, Yu Q X, Peng W. Simultaneous measurement of down-hole pressure and distributed temperature with single fiber[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(8): 085102.
- [183] Rao Y J, Deng M, Duan D W, *et al.* Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser[J]. Optics Express, 2007, 15(21): 14123-14128.
- [184] Ran Z L, Rao Y J, Liao X. Self-enclosed all-fiber in-line etalon strain sensor micromachined by 157-nm laser pulses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3143-3149.
- [185] Ding W H, Jiang Y. Miniature photonic crystal fiber sensor for high-temperature measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(3): 786-789.
- [186] Liu S, Wang Y P, Liao C R, *et al.* High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2121-2124.
- [187] Liu S, Yang K M, Wang Y P, *et al.* High-sensitivity strain sensor based on in-fiber rectangular air bubble[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7624.
- [188] Liao C R, Liu S, Xu L, *et al.* Sub-micron silica diaphragm based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2827-2830.