

Development in Fiber Bragg Grating Sensing Technology

Shanchao Jiang

School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Email: jiangshanchao88624@126.com

Received: Aug. 21st, 2018; accepted: Sep. 6th, 2018; published: Sep. 13th, 2018

Abstract

In order to promote the development of fiber Bragg grating (FBG) sensing technology, this paper introduces the development of fiber Bragg grating in its spectrum analysis, sensor parameters (such as strain, displacement, pressure, flow rate, anchor bolt, inclination, etc.) detection, multiplexing technology and other aspects in detail. This provides basic support for further diversification and practicability of FBG sensing technology.

Keywords

FBG, Spectrum Analysis, Detection Sensor, Multiplexing Technology

光纤光栅传感技术发展综述

蒋善超

盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

Email: jiangshanchao88624@126.com

收稿日期: 2018年8月21日; 录用日期: 2018年9月6日; 发布日期: 2018年9月13日

摘要

为促进光纤光栅传感技术的发展, 本文较为详细的介绍了光纤光栅在其光谱分析、传感器参数(如应变、位移、压力、流速、锚索锚杆、倾斜等)检测、复用技术等方面的发展现状, 为推动光纤光栅传感技术进一步的多样化、实用化提供基础支持。

关键词

光纤光栅, 光谱分析, 检测元件, 复用技术

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光纤光栅传感技术因其本身防电磁扰动、抗腐蚀、测量精确、复用能力强、便于组网等特性备受关注。短短几十年时间, 光纤光栅传感技术已经成为发展最为迅猛的监测技术手段, 且在航空航天、土木工程、风力发电、石油化工、复合材料、食品检测等行业取得了广泛的应用。随着光纤光栅传感技术的发展, 其可实现参数测量种类、数量愈来愈多。本文针对光纤光栅传感技术在光谱分析、传感参数(如应变、位移、压力、流速、锚索锚杆、倾斜等)检测、复用技术等方面的研究现状进行总结, 为光纤光栅传感技术进一步发展提供基础数据支持。

2. 光纤光栅光谱特性研究现状

目前, 光栅光谱特性研究方法主要可分成如下两个阶段: 理论仿真计算分析及试验测试。1973 年及 1976 年, A. Yariv 和 H. Kogelnik 分别采用耦合模理论及数值分析方法分析了均匀光纤光栅与非均匀的光纤光栅的光谱特性, 其中理论数值分析方法存在计算量大、所需计算时间长的缺点[1] [2]; 1995 年, F. Bilodeau 等人通过实验对比分析了光纤光栅的理论及试验光纤光栅光谱数据[3]; 1997 年, T. Erdogan 等人通过数值计算与仿真对比详细分析了本征参数变化对均匀光纤光栅及非均匀光纤光栅反射及透射光谱特性变化的影响[4]; 2001, 张东生等人通过改变影响光栅谐振波长与波长的参数对光纤光栅光谱形状控制方法进行了相关研究, 这对于光栅的多样化刻蚀起到一定的指导作用[5]; 同年, 杜戈等人以光纤光栅反射光谱作为研究对象, 对比分析了 FC 与 APC 接头对光纤光栅光谱的影响, 数据分析结果显示: APC 接头实现光纤耦合对光纤光栅反射光谱的影响, 添加一定量的折射率匹配溶液可以有效的消减端面的反射光对光谱的影响, 在实际工程应用中可以作为一种较好连接方式[6]; 2008 年, 姚海凤等人基于光纤光栅耦合模理论及传输矩阵理论研究了光纤耦合器对串联及并联光纤光栅串反射光谱的影响, 得并联光纤光栅受光纤耦合器的影响较为明显[7]; 2009 年, 贺园等人以耦合模理论作为基础理论仿真绘制各异参数下光纤光栅的反射光谱, 进而分析并获得光栅光谱反射率、带宽与光栅栅区长度、栅格周期、折射率微扰之间的最佳组合, 可以以此为理论依据制作优良的光纤光栅[8]。2014 年, 李晓丽等人基于薛定谔方程及一维热稳态方程分析了强光作用下非线性效应及光热效应对光纤布拉格光栅光谱变化情况的影响[9]。上述光纤光谱特性的研究对于光栅多样化刻蚀、器件研发及其实际使用起到了较大的促进作用。

为便于实现光纤光栅检测元器件的研制与优化, 研究学者对轴向、径向及应力作用下的光纤光栅光谱特性进行了相关的研究。1989 年, Morey 等人研究并证实光纤光栅的应变及温度检测性能[10]。2000 年, R. Gasfi 等人研究了光纤光栅径向负载对于光纤的有效折射率的变化影响, 结果显示光纤布拉格光栅反射光谱在径向负载作用下其光谱发生分裂[11]; 2002 年, Federco Bosia 等人对光纤光栅在径向负载作用下光谱变化开展了试验验证研究, 数据线条径向负载作用下光纤布拉格光栅反射光谱发生变形[12]; 2004 年, Jingxi Zhao 通过试验的方式分析了光纤布拉格光栅径向力作用下的双折射现象[13]; 2007 年, 滕峰成在其博士论文中较为详细的研究了轴向均匀应力与非均匀(栅区线性)应力及横向(即径向)均匀应力与非均匀应力(栅区线性)对光纤光栅反射光谱的影响, 构建了被测量与因变量之间的对应关系[14]; 2009 年, 陈哲敏分析了轴向非均匀(非线性)应力对光纤光栅反射光谱的影响并针对光纤光栅实现动态应力测量的解调方式, 如边缘滤波、DWDM 滤波器等进行了研究[15]; 2014 年, 王正方在光纤光栅应变模

型的基础上研究了非均匀光纤光栅(啁啾光纤光栅、相移光纤光栅)轴向及径向应力作用下其反射光谱的变化特性[16];同年,王静等人较为详细的研究了动态应力(传播速度、幅值等)对啁啾光纤光栅反射光谱的影响并通过构建试验平台进行了验证[17]。

3. 光纤光栅传感器发展现状

自光纤光栅温度应变特性于1989年被研究验证以来,由于其本身特性,如本质安全、检测精度高、抗电磁干扰、传输距离远等,光纤光栅检测元件的开发利用已拓展到应变、位移、压力、流速、锚索锚杆、倾斜等方面的应用。

3.1. 应变检测

自 M. A. Davis 与 Libo Yuan 等人分别于1997年[18]及2001年[19]实现结构件内部应变的测量开始,随着光纤光栅应变检测元件的发展,为满足更高精度、实用性等要求,其封装方式得到丰富的发展,主要有材料(复合材料、金属等)基体封装、环氧树脂表面粘接等方式。2005年, P. Moyo 等人以复合材料碳纤维板作为基体材料实现光纤光栅应变传感单元的复合材料基体封装[20];2008年,黄广龙等人应用光纤光栅与金属封装实现了深基坑钢筋应变的测量,给出其轴力的合理性[21];2013年,马收等人研究光纤光栅表贴式传感器粘接剂的表面应变传递效率,试验结果证实在保证粘接质量的前提下,应用环氧树脂粘接可以获得较好的应变及温度响应特性[22];2015年, Shanchao Jiang 等人应用不同结构参数的椭圆环增敏方式实现了光纤光栅共原点的三维应变测量并应用有限元仿真分析软件实现了传感单元的优化设计[23];同年,王达达等人为满足传感器与光缆连接需求,利用自锁紧螺帽、不锈钢管、法兰盘及光纤光栅等原件研制了一种自锁紧式光纤光栅应变传感器[24]。

3.2. 位移检测

1998年, Lih-Wuu Chang 等人应用光纤光栅双波长干涉原理实现位移的测量[25];1999年,关柏鸥等人应用等截面悬臂梁开发了新型具有测量量程大(大于200 mm)、线性度高的光纤光栅位移传感器[26];2003年,李伟刚等人通过改进悬臂梁的结构提出了一种可以实现双向位移检测的光纤光栅位移传感器[27];2007年,李丽在其博士论文中为消除温度影响研究了基于等腰悬臂梁结构的微位移光纤光栅传感器[28];2010年,何俊等人通过将光纤光栅粘接于等强度悬臂梁上下两个表面研制适用于工程应用的、具有自温补特性的光纤光栅位移传感器[29];2012年,丁腾蛟通过悬臂梁、弹簧等实现外界被测量对光纤光栅波长的调制,提出了测量量程为0~1000 mm的大量程光纤光栅位移传感器[30];2013年,蒋善超等人通过弹簧、不锈钢管等研制适用于地质工程模型试验的微型光纤光栅位移传感器[31];同年,张艳晓为解决因光纤光栅直接粘接于悬臂梁表面可能导致的波长展宽问题,研制了基于环形结构的光纤光栅位移传感器[32];2015年, Shanchao Jiang 等人基于螺旋锥试件提出变测量精度、大量程范围的光纤光栅位移传感器[33]。

3.3. 压力检测

1996年, M. G. Xu 等人通过空心的玻璃球实现了光纤光栅压力敏感系数增敏[34];1998年,郑云启等人使用弹簧管对光纤光栅压力敏感系数进行增敏处理,研制了弹簧管式光纤光栅压力传感器[35];2002年,张颖等人应用聚合物及金属罐体对光纤裸光栅进行封装提出了高精度的光纤光栅压力传感单元并对其压力测试性能进行了相关的研究[36];2005年,曹晔等人应用轮辐结构将光纤光栅垂直于轮辐结构的正反面提出了温度不灵敏的光纤光栅压力传感器[37];2008年,张文涛等人应用杠杆结构转变金属膜片

的挠度,提出一种新型的光纤光栅压力传感单元[38];2011年,罗斐通过分析金属薄片的力学特性,提出了一种新颖的光纤光栅压力传感元件[39];2013年,蒋善超等人在总结现有光纤光栅压力增敏方式(聚合物、膜片、金属结构等)的基础上选用金属结构对膜片中心挠度进行转变提出了适用于模型试验的光纤光栅压力传感器[40];2015年,何少灵等人通过将光纤光栅直接于弹性膜片粘接并增设温补光栅提出了可以实现温度实时补偿的光纤光栅压力传感器[41]。

3.4. 流速检测

2001年,J. Lim等人通过将两个光纤光栅粘接于膜片上基于差压法提出了光纤光栅流速传感器[42];2005年,Yong Zhao等人基于悬臂梁的结构提出了靶式光纤光栅流速传感元件[43];2006年,陈建军等人利用汾丘里管获取流体速度的差压提出光纤光栅高精度流速传感元件[44];同年,禹大宽等人使用耐高温胶将光纤光栅粘接于铝片表面实现了管道流速的光纤光栅测量[45];2009年,杨淑连等人将流速差异导致汾丘里管压差作用于粘接于悬臂梁的光纤光栅,实现0~200 mm/s流速的光纤光栅测量[46];2011年,钟诚等人利用锥形结构实现管道流速调整实现不同流速下的压强光纤光栅波长调节,提出了变测量精度及量程的光纤光栅流速传感器[47];2012年,王正方等人应用有限元分析软件分析不同形状靶片的基础上提出了光纤光栅靶片式光纤光栅流速传感器并在模型实验中获得成功的应用[48];2013年,杨淑连等人提出了基于啁啾光纤光栅光谱分析温度鲁钝的光纤光栅流速传感元件[49];2015年,Jia Cheng等人通过光纤纤芯设置偏移及光纤光栅表面镀银实现了气流量的检测[50]。

3.5. 锚索或锚杆检测

光纤光栅在锚杆锚索检测元件中的研究相对于应变、位移等参量起步较晚。2005年,柴敬等人以光栅作为敏感元件开发可实现锚杆的应力监测的系统[51];2009年,李毅等人设计油缸式光纤光栅锚杆测力计,有效的解决了粘接式光纤光栅锚杆测力系统施工复杂、一次性等的缺陷[52];同年,Hui Li等人通过将光纤光栅内置于玻璃纤维棒中实现桥梁斜拉索的有效在线检测[53];2014年,张桂花等人通过光纤光栅对锚杆受力表面应力分布规律进行了研究[54];2015年,梁敏福等人基于光纤光栅设计锚杆测力计并对其进行了试验研究,试验结果与理论计算一致,可实现锚杆的在线、高精度测量[55]。

3.6. 倾斜检测

2002年,Y. Yoshida等人光纤光栅开发检测边坡形变的光纤检测系统[56];2006年,Y. T. Ho等人提出光纤光栅分段变形传感器,通过获得相对变形获得整个管道倾斜度的测量[57];2010年,Hualong Bao等人提出了两种温度不敏感、实现大量程测量的二维光纤光栅倾斜传感器[58][59];2011年,倪凯等人通过将4根刻有光纤光栅的光纤等间隔固定于一圆盘上,提出了温度鲁钝、检测精度可达 0.2° 的光栅倾斜传感单元[60];2015年,Chenxi Guo等人基于倾斜光纤光栅提出了一种新型的光纤光栅倾斜仪,在 $0^\circ\sim 25^\circ$ 测量范围内获得检测精度可达4.16 dB/deg [61]。

随着光纤光栅检测元件多样化、实用化的发展,其在如折射率[62]、湿度[63]、磁场[64]等方面也得到发展应用。

4. 光纤光栅复用技术发展现状

目前,光纤光栅检测技术最基本的常用复用技术为:波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)、空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)及混合复用技术等。

4.1. 波分复用(WDM)

波分复用是将波长不同的光纤光栅检测元件以串联的方式连接于一根光纤实现信号传输、解调的复用技术。因光纤光栅检测元件波长的不同,这种复用方式可以充分发挥光源的波长带宽且解调信号信噪比较高。可以实现光纤光栅中心波长的波分复用的解调方式主要有:M-Z干涉法、Sagnac干涉法、可调谐 Fabry-Perot 滤波器法等。其中可调谐的 Fabry-Perot 滤波器方法应用最为广泛。单根光纤可容纳光纤光栅检测元件的数量由两个方面的因素决定:1) 光纤光栅解调仪光源的波长带宽;2) 检测元件实现被测量测量所需波长带宽。例如,假设光源波长范围为 1510~1590 nm,采用裸光纤光栅实现-180°C~-140°C 的测量。考虑到裸光栅对温度的敏感系数为 10 pm/°C 及裸光栅所在的室温(20°C~30°C)存储制备等环境,此时为实现被测量的测量裸光栅检测元件所需带宽范围为 2 nm~2.1 nm。不考虑光纤光栅 3 dB 带之间的相互影响及反射光功率等因素的前提下,此时单根光纤可复用的检测元件数量为 19~20 个。

4.2. 时分复用(TDM)

时分复用是通过高速光开关来获取由于光纤检测元件在光纤位置不同导致其反射光源脉冲信号所存在的时间延迟信号,按照时间戳的不同来区别不同位置的测点信息(位置、因变量等)的光纤复用技术。1992 年, A. D. Kersey 等人利用信号编码技术对时分复用中由于光源脉冲周期增加导致的信号信噪比降低进行了改善[65]; 1994 年, M. A. Davis 给出了较为详细的时分复用光纤框架图[66]; 同年, R. S. Weis 等人利用 M-Z 干涉法解调方式,采用光纤延时线实现信号延时成功实现了 4 个光纤光栅检测元件的时分复用[67]。光纤时分复用技术由于不受光纤检测元件波长的影响,引起其可复用期间不受波长的影响,其主要的受限因素为脉冲光源的获取及信号延迟串扰问题。采用宽带光源获取脉冲信号,其反射功率太低,这给信号的解调带来一定的难度。为解决这一难题, C. C. Chan 等人于 2000 年采用可调谐激光器作为脉冲光源发生器[68]; 其后, B. Dong 等人于 2006 年通过将光纤光栅粘接于悬臂梁来实现激光器的可调谐[69]。针对信号延时串扰问题, L. C. G Velente 等人于 2002 年采用普通商用 OTDR 与弱反射率光纤检测元件实现了单根光纤上 50 个检测单元的时分复用[70]; Y. M. Wang 等人于 2011 年在分析传感单元反射效率及复用数量之间关系的基础上,采用弱反射光栅实验证实了时分复用技术可以实现 1000 个光纤检测元件的访问[71]。然而,光纤检测元件发射率的降低会导致检测信号信噪比的降低。

4.3. 空分复用(SDM)

空分复用技术是基于并行拓扑结构提出的可实现大规模光纤检测元件的解调,满足检测元件之间独立性、可互换代替性的光纤复用技术,其复用结构框图被 R. J. Yao 等人于 1995 年给出[72]。随后, R. J. Yao 等人在 1996 年对混合复用技术(波分 + 时分 + 空分复用)进行了相关研究[73]; 国内,饶云江等人于 2006 年应用混合复用技术构建大型光纤应变监测网络[74]。

基于上述光纤复用技术,多种其他的复用技术,如副载波复用、调频连续波复用、光时域反射计、环形腔半导体放大技术等[75]被研究。在利用数学算法实现光纤复用方面,巨红兵[76]采用遗传算法对光纤信号进行解调处理,实现了光纤光栅重叠光谱下的中心波长的解析。该算法有效的实现光源光谱的复用,可大大提高光纤监测系统传感单元的复用数量。

5. 总结

为总结光纤光栅传感技术发展现状,本文主要做如下工作:

1) 总结光纤光栅光谱特性的研究发展现状,对于光栅多样化刻蚀、器件研发及其实际使用起到了较大的促进作用。

2) 着重概述光纤光栅检测技术在应变、位移、压力、流速、锚索锚杆、倾斜等参数检测方面的发展现状, 促进光纤光栅检测元件的多参数、多样化发展。

3) 分析汇总光纤光栅检测技术最基本的常用复用技术(波分复用、时分复用、空分复用及混合复用技术)等, 为构建光纤光栅检测网络提供组网保障, 促进其实用化发展。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(61803325), 江苏省教育厅面上项目(18KJB510046)。

参考文献

- [1] Yariv, A. (1973) A Coupled-Mode Theory for Guided-Wave Optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **9**, 919-993.
- [2] Kogelnik, H. (1976) Filter Response of Nonuniform Almost-Periodic Structures. *Applied Optics*, **55**, 109-126.
- [3] Biledeau, F., Malo, B., Albert, J., et al. (1993) Photosensitization of Optical Fiber and Silica-on-Silica/Silica Waveguides. *Optics Letters*, **18**, 953-955.
- [4] Erdogan, T. (1997) Fiber Grating Spectra. *Lightwave Technology*, **15**, 1277-1294.
- [5] 张东生. 光纤光栅的谱形控制及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2001.
- [6] 杜戈, 刘伟平, 廖常俊, 等. 光纤光栅光谱特性测量的研究[J]. 半导体光电, 2001, 44(8): 253-255.
- [7] 姚海凤, 辛丽, 宋瑛林. 级联光纤布拉格光栅光谱特性[J]. 红外与激光工程, 2008(37): 746-749.
- [8] 贺园, 卢会群. 光纤光栅光谱特性研究[J]. 桂林科技大学学报, 2009, 29(6): 459-461.
- [9] 李晓丽, 陈娜, 陈振宜, 等. 强光致光纤布拉格光栅光谱特性变化机理[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105005-1.
- [10] Moery, W.W., Meltz, G. and Glenn, W.H. (1989) Fiber Optical Bragg Grating Sensors. *SPIE*, **1169**, 98-107.
- [11] Gafsi, R. and El-Sherif, M.A. (2000) Analysis of Induced Birefringence Effects on Fiber Bragg Grating. *Optical Fiber Technology*, **6**, 229-322.
- [12] Bosia, F., Botsisa, J., Facchinia, M., et al. (2002) Deformation Characteristics of Composite Laminates Part I: Speckle Interferometry and Embedded Bragg Grating Sensor Measurement. *Composite science and Technology*, **62**, 41-54.
- [13] Zhao, J.X., Zhang, X., Huang, Y.Q., et al. (2004) Experimental Analysis of Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings Induced by Lateral Compression. *Optical Communications*, **229**, 203-207.
- [14] 滕峰成. 光纤光栅解调系统和数据处理方法的理论与实验研究[D]: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007.
- [15] 陈哲敏. 光纤光栅动态应力和折射率传感研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [16] 王正方. 桥隧工程安全监测的光纤光栅传感理论及关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [17] 王静, 蒋善超, 施斌, 等. 动态应力场作用下线性啁啾光栅光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2021-2025.
- [18] Davis, M.A., Bellemore, D.G. and Kersey, A.D. (1997) Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structure Components. *Cement and Concrete Components*, **19**, 45-57. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00042-X)
- [19] Yuan, L.B., Li, Q.B., Liang, Y.J., et al. (2001) Fiber Optic 2-D Sensor for Measuring the Strain inside the Concrete Specimen. *Sensors and Actuators A*, **94**, 25-31. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00659-8](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00659-8)
- [20] Moyo, P., Brown, J.M.W., Suresh, R., et al. (2005) Development of Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Civil Infrastructure. *Engineering Structure*, **27**, 1828-1834. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.023>
- [21] 黄广龙, 张枫, 徐洪钟, 等. FBG 传感器在深基坑支撑应变监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30: 436-440.
- [22] 马收, 李明, 郭建春, 等. 光纤布拉格光栅(FBG)传感器在金属试件上的粘接工艺研究[J]. 复合材料学报, 2013, 30: 251-254.
- [23] Jiang, S., Wang, J., Sui, Q., et al. (2015) Same Origin Three-Dimensional Strain Detection FBG Sensor Based on Elliptical Ring and Its Optimization. *Photonic Sensors*, **5**, 146-151. <https://doi.org/10.1007/s13320-015-0240-5>
- [24] 王达达, 彭李, 赵振刚, 等. 自锁紧式光纤光栅管式应变传感器[J]. 光学学报, 2015, 41(6): 498-501.
- [25] Chang, L.-W., Lee, C.-T. and Chen, P.-Y. (1998) Displacement Measurement by Synthesized Light Source Based on Fiber Bragg Grating. *Optical Communication*, **154**, 261-267. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(98\)00323-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(98)00323-X)

- [26] 关柏鸥, 刘志国, 开桂云, 等. 基于悬臂梁结构的光纤光栅位移传感器研究[J]. 光子学报, 1999, 28(11): 983-985.
- [27] 张伟刚, 刘艳格, 王跃, 等. 利用单光纤光栅实现力学垂直测量的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(1): 71-74.
- [28] 李丽. 光纤光栅位移传感系统关键技术的研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.
- [29] 何俊, 董惠娟, 周智, 等. 一种适合工程应用的新型光纤光栅位移传感器[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15(5): 61-65.
- [30] 丁腾蛟. 基于悬臂梁结构的大量程光纤光栅位移传感器[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [31] 蒋善超, 王静, 隋青美, 等. 微型 FBG 位移传感器研制及其在模型试验中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(3): 348-353.
- [32] 张艳晓. FBG 变形环位移传感技术及在高速铁路上的应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [33] Jiang, S., Wang, J., Sui, Q., *et al.* (2015) A Novel Wide Measuring Range FBG Displacement Sensor with Variable Measurement Precision Based on Helical Bevel Gear. *Optoelectronics Letters*, **11**, 81-83. <https://doi.org/10.1007/s11801-015-4176-1>
- [34] Xu, M.G., Geiger, H., Dakin, J.P., *et al.* (1996) Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity with a Glass Bubble Housing. *Electronics Letters*, **32**, 128-129. <https://doi.org/10.1049/el:19960022>
- [35] 郑云启, 刘志国, 郭转运, 等. 光纤光栅弹簧管压力传感器的压力和温度特性[J]. 光子学报, 1998, 27(12): 1111-1114.
- [36] 张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 89-91.
- [37] 曹晔, 刘波, 刘丽辉, 等. 对温度不敏感的光纤光栅压力传感器[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 177-189.
- [38] 张文涛, 刘育梁, 李芳. 一种基于平面片挠度的光纤光栅压力传感器[J]. 光电子激光, 2008, 19(7): 899-901.
- [39] 罗斐. 膜片式光纤光栅压力传感器的灵敏度分析[J]. 机电工程技术, 2011, 40(5): 65-78.
- [40] 蒋善超, 曹玉强, 隋青美, 等. 微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405002(1)-0405002(6).
- [41] 何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实施补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003(1)-0605003(5).
- [42] Lim, J., Yang, Q.P., Johns, B.E., *et al.* (2001) DP Flow Sensor Using Optical Fiber Bragg Grating. *Sensors and Actuators A*, **92**, 102-108. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00546-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00546-5)
- [43] Zhao, Y., Chen, K. and Yang, J. (2005) Novel Target Type Flowmeter Based on a Differential Fiber Bragg Grating Sensor. *Measurement*, **38**, 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.07.005>
- [44] 陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1136-1139.
- [45] 禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 一种测量温度和流速的光纤光栅传感器[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 228-231.
- [46] 杨淑连, 申晋, 李田泽. 基于双光纤布拉格光栅的流速传感器[J]. 半导体光电, 2009, 30(5): 759-763.
- [47] 钟诚, 张伟刚, 颜爱东, 等. 一种测量范围可调的 FBG 流速测量装置[J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1463-1466.
- [48] 王正方, 王静, 隋青美, 等. 靶式光纤光栅流速传感器在裂隙水模型试验中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(6): 1569-1575.
- [49] 杨淑连, 盛翠霞, 魏芹芹, 等. 基于啁啾光纤布拉格光栅的流速传感器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(9): 1683-1687.
- [50] Cheng, J., Zhu, W., Huang, Z., *et al.* (2015) Experimental and Simulation Study on Thermal Gas Flowmeter Based on Fiber Bragg Grating Coated with Silver Film. *Sensors and Actuators: A*, **228**, 23-27. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.033>
- [51] 柴敬, 兰曙光, 李继平, 等. 光纤光栅锚杆应力应变监测系统[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(1): 1-4.
- [52] 李毅, 柴敬, 邱标. 带有温度补偿的光纤光栅锚杆测力计设计[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(2): 90-93.
- [53] Li, H., Ou, J. and Zhou, Z. (2009) Applications of Optical Fiber Bragg Grating Sensing Technology Based Smart Stay Cables. *Optics and Lasers in Engineering*, **47**, 1077-1084. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.04.016>
- [54] 张桂花, 柴敬, 李毅, 等. 基于光纤光栅拉拔试验锚杆应力分布研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 635-638.
- [55] 梁敏福, 方新秋, 薛广哲, 等. 光纤光栅测力锚杆的标定实验[J]. 煤矿安全, 2015, 46(1): 44-46.
- [56] Yoshida, Y., Kashiwai, Y., Murakami, E., Ishida, S., *et al.* (2002) Development of the Monitoring System for Slope Deformations with Fiber Bragg Grating Arrays. *Proceedings of SPIE*, **4694**, 296-303.

- <https://doi.org/10.1117/12.472632>
- [57] Ho, Y.T., Huang, A.B. and Lee, J.T. (2006) Development of a Fiber Bragg Grating Sensor Ground Movement Monitoring System. *Measurement Science and Technology*, **17**, 1733-1740. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/7/011>
- [58] Bao, H., Dong, X., Shao, L., *et al.* (2010) Temperature-Insensitive 2-D Tilt Sensor by Incorporating Fiber Bragg Gratings with a Hybrid Pendulum. *Optics Communications*, **283**, 2021-5024. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.07.050>
- [59] Bao, H., Dong, X., Zhao, C., *et al.* (2010) Temperature-Insensitive FBG Tilt Sensor with a Large Measurement Range. *Optics Communications*, **283**, 968-970. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.11.014>
- [60] 倪凯, 吴立枢, 金永兴. 基于光纤光栅的温度不敏感的倾斜传感器[J]. 光电子激光, 2011, 22(1): 27-29.
- [61] Guo, C., Chen, D., Shen, C., *et al.* (2015) Optical Inclinometer Based on a Tilted Fiber Bragg Grating with a Fused Taper. *Optical Fiber Technology*, **24**, 30-33. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.04.004>
- [62] Enriquezn, D.A.C., da Cruz, A.R., *et al.* (2012) Hybrid FBG-LPG Sensor for Surrounding Refractive Index and Temperature Simultaneous Discrimination. *Optics and Lasers Technology*, **44**, 981-986. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.10.020>
- [63] Rajan, G., Noor, Y.M., Liu, B., *et al.* (2013) A Fast Response Intrinsic Humidity Sensor Based on an Etched Single Mode Polymer Fiber Bragg Grating. *Sensors and Actuators A*, **203**, 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.08.036>
- [64] Liu, H., Or, S.W. and Tam, H.Y. (2012) Magnetostrictive Composite-Fiber Bragg Grating (MC-FBG) Magnetic Field Sensor. *Sensors and Actuators A*, **173**, 122-126. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.11.005>
- [65] Kersey, A.D. and Dandridge, A. (1992) Low Crosstalk Code Division Multiplexing Interferometric Array. *Electricnic Letters*, **28**, 351-352. <https://doi.org/10.1049/el:19920219>
- [66] Davis, M.A., Bellemore, D.G. and Kersey, A.D. (1994) Structure Strain Mapping Using a Wavelength/Time Division Addressed Fiber Bragg Grating Array. *2nd European Conference on Smart Structures and Materials*, Glasgow, 12-14 October 1994, 342-345.
- [67] Weis, R.S. and Kersey, A.D. (1994) A Four-Element Fiber Grating Sensor Array with Phase-Sensitive Detection. *Photonics Technology Letters*, **6**, 1469-1472. <https://doi.org/10.1109/68.392208>
- [68] Chan, C.C., Jin, W., Ho, H.L., *et al.* (2000) Performance Analysis of a Time-Division-Multiplexed Fiber Bragg Grating Array by Use of a Tunable Laser Source. *Quantum Electronics*, **6**, 741-749. <https://doi.org/10.1109/2944.892613>
- [69] Dong, B., He, S., Hu, S.Y., *et al.* (2006) Time-Division Multiplexing Fiber Grating Sensor with a Tunable Laser. *Photonics Technology Letters*, **18**, 2620-2624. <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.887197>
- [70] Velente, L.C.G., Braga, A.M.B., Ribeiro, A.S., *et al.* (2002) Time and Wavelength Multiplexing of Fiber Bragg Grating Sensors Using a Commercial OTDR. *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, Portland, 10 May 2002, 151-154. <https://doi.org/10.1109/OFS.2002.1000524>
- [71] Wang, Y.M., Gong, J.M., Wang, D.Y., *et al.* (2011) A Quasi-Distributed Sensing Network with Time-Division-Multiplexing Fiber Bragg Gratings. *Photonics Technology Letters*, **23**, 70-72. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2089676>
- [72] Yao, Y.J., Kalli, K. and Brady, G. (1995) Spatially Multiplexed Fiber-Optic Bragg Grating Strain and Temperature Sensor System Based on Interferometric Wavelength-Shift Detection. *Electronics Letters*, **31**, 1099-1100.
- [73] Yao, R.J., Ribeiro, A.B.L., Jackson, D.A., *et al.* (1996) Simultaneous Spatial, Time and Wavelength Division Multiplexed In-Fiber Grating Sensing Network. *Optical Communications*, **125**, 53-58. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00722-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00722-9)
- [74] 饶云江, 王义平. 光纤光栅传感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [75] Gao, H., Li, H., Liu, B., *et al.* (2005) A Novel Fiber Bragg Grating Sensors Multiplexing Technique. *Optics Communications*, **251**, 361-366. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00722-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00722-9)
- [76] 巨红兵. 基于遗传算法的光纤光栅传感器复用解调技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：oe@hanspub.org