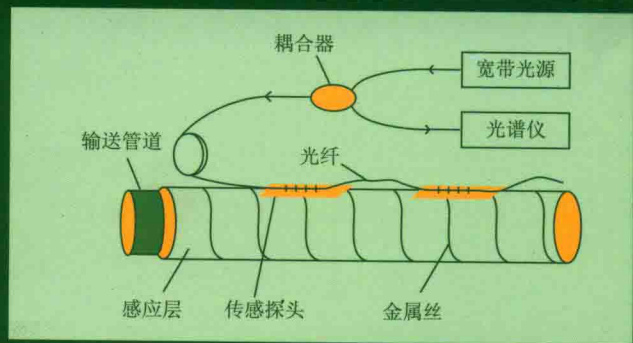


GUANGXIAN GUANGSHAN
CHUANGAN JISHU YU YINGYONG

光纤光栅 传感技术与应用

陈 勇 刘焕淋 / 著



科学出版社

光纤光栅传感技术与应用

陈 勇 刘焕淋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

光纤传感技术是新一代传感技术，能实现高精度、多参量同时测量，易于组网，形成分布式传感网络，是今后大型结构健康检测以及物联网的核心。本书从光纤布拉格光栅的基本原理出发，介绍光纤布拉格光栅传感器的传感特性；针对光纤布拉格光栅的光谱特性，提出光谱去噪、信号修补以及峰值解调的方法；最后针对光纤布拉格光栅传感器的实际应用价值，介绍几种光纤光栅传感器的实际应用。

本书注重理论与实践相结合，既有传感原理以及信号处理算法分析，也有光纤光栅传感器试验，可作为高等院校土木工程和光学工程专业教师、研究生和高年级本科生的参考书，也可供从事光纤传感器技术的研究与开发、生产与应用的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅传感技术与应用 / 陈勇, 刘焕淋著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059111-1

I. ①光… II. ①陈… ②刘… III. ①光纤传感器IV. ①TP212.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 237126 号

责任编辑: 张 展 刘莉莉 / 责任校对: 陈 杰

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本: B5 (720×1000)

2018年11月第一次印刷 印张: 14.5

字数: 288千字

定价: 98.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

随着传感技术的不断发展, 光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 在传感领域吸引了广泛的注意。FBG 传感器具有体积小、重量轻、抗腐蚀性强以及抗电磁干扰等特性, 已经被广泛地应用于各种传感领域。近年来, 国内高校以及各大通信公司在光纤传感方面的研究蒸蒸日上, 但是在传感领域能参考的书籍寥寥无几。为此, 我们根据这几年从事 FBG 传感领域研究的相关经验, 撰写本书, 希望为该领域的研究者提供参考。

全书共 10 章, 第 1 章介绍光纤光栅发展与分类; 第 2 章分析光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的传感特性; 第 3 章主要介绍针对光纤光栅反射光谱的降噪方法, 包括小波阈值去噪算法以及经验模态分解; 第 4 章介绍光纤光栅传感信号的修补方法; 第 5 章介绍 FBG 传感信号的峰值解调方法; 第 6~10 章主要介绍 FBG 传感器的实际应用, 其中第 6 章介绍光纤光栅在温度和浓度双参量实时解调中的应用, 第 7 章介绍光纤光栅在输油管道泄漏检测中的应用, 第 8 章介绍光纤光栅在航天飞行器结构健康检测中的应用, 第 9 章介绍光纤光栅在周界入侵检测中的应用, 第 10 章主要介绍光纤光栅传感器的复用与重叠光谱解调的技术。

本书内容丰富, 涵盖 FBG 传感器的基本传感原理, FBG 传感器在实际应用中的理论分析, 以及 FBG 在各种领域中的具体应用。本书结构清晰, 叙述深入浅出, 便于自学。

本书出版得到了重庆邮电大学出版基金资助、重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室和科学出版社的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。研究生刘志强、程亚男、周立新和安汪悦等同学参与了本书的编稿工作, 在此表示感谢。书中引用了相关文献, 并进行了标注, 谨对所有参考文献的作者表示感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在疏漏和不妥之处, 敬请前辈、同仁以及广大读者见谅并不吝指正。

陈 勇 刘焕淋

2018 年 6 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 光纤光栅技术的发展与分类	2
1.2.1 光纤光栅的发展	2
1.2.2 光纤光栅的分类	4
1.3 光纤光栅传感器的研究与应用	5
参考文献	5
第2章 光纤光栅传感特性	7
2.1 引言	7
2.2 FBG 传感特性	8
2.2.1 应变传感特性	8
2.2.2 温度传感特性	9
2.2.3 光谱特性	10
2.3 LPG 传感特性	11
2.3.1 温度传感特性	12
2.3.2 折射率特性	14
参考文献	15
第3章 光纤光栅传感信号去噪	17
3.1 引言	17
3.2 基于小波变换的FBG 传感信号去噪原理	18
3.2.1 小波变换	18
3.2.2 小波去噪原理	20
3.2.3 改进小波阈值去噪原理	24
3.2.4 实验结果与分析	29
3.3 基于经验模态分解的FBG 传感信号去噪原理	33

3.3.1	经验模态分解	33
3.3.2	经验模态分解去噪原理	34
3.3.3	改进的经验模态分解去噪原理	35
3.4	基于EMD与互信息的FBG信号去噪	36
3.4.1	基于模态消除法排除虚假分量	36
3.4.2	互信息法确定高低频分离点	38
3.4.3	实验与结果分析	39
	参考文献	43
第4章	光纤光栅传感信号的修补原理	46
4.1	引言	46
4.2	基于压缩感知的光纤光栅信号修补原理	47
4.2.1	压缩感知基本理论	47
4.2.2	改进压缩感知修补FBG缺损信号	50
4.3	基于字典学习的FBG缺损信号修补原理	58
4.3.1	基于学习方法的分析	59
4.3.2	基于AK-SVD算法的字典获取方法	59
4.3.3	基于字典学习的FBG缺损信号修补原理	60
	参考文献	61
第5章	光纤光栅传感信号峰值解调原理	63
5.1	引言	63
5.2	三点寻峰算法	64
5.2.1	算法原理	64
5.2.2	三要素选取策略	66
5.2.3	实验结果与分析	73
5.3	指数修正高斯拟合寻峰算法	75
5.3.1	算法原理	75
5.3.2	指数修正高斯拟合寻峰算法实现	78
5.3.3	实验结果与分析	81
5.4	多峰光谱自适应寻峰算法	84
5.4.1	峰值点初定位	84
5.4.2	自适应多峰值区域分割	86

5.4.3	基于广义高斯模型的峰值精确定位	88
5.4.4	实验结果与分析	91
	参考文献	94
第6章	光纤光栅在温度和浓度双参量实时解调中的应用	96
6.1	引言	96
6.2	实验平台搭建	97
6.2.1	双参量测量实验模型	97
6.2.2	实验系统硬件组成	98
6.3	温度和浓度双参量实时解调	100
6.3.1	FBG 传感信号的温度灵敏度	100
6.3.2	LPG 传感信号的温度灵敏度	102
6.3.3	LPG 传感信号的折射率灵敏度	103
6.3.4	双参量实时解调结果	104
	参考文献	107
第7章	光纤光栅在海洋平台冲击及管道泄漏定位中的应用	108
7.1	引言	108
7.2	FBG 传感网络海洋平台冲击识别与定位	109
7.2.1	分布式传感系统的设计与构建	109
7.2.2	基于 SVM 的冲击力大小识别	111
7.2.3	海洋平台冲击点的精确定位	113
7.3	FBG 传感网络输油管道泄漏检测与定位	115
7.3.1	FBG 传感探头设计	116
7.3.2	泄漏检测系统的构建	119
7.3.3	泄漏点的检测及定位	121
7.4	实验结果与分析	122
7.4.1	训练集的构建	122
7.4.2	冲击力大小的识别	123
7.4.3	冲击点的精确定位	124
7.4.4	定位方法对比	125
	参考文献	127

第 8 章 光纤光栅在航天飞行器结构健康检测中的应用	129
8.1 引言	129
8.2 FBG 传感平台的设计与构建	129
8.3 基于 FBG 直角应变花的飞行器结构冲击检测	131
8.3.1 结构冲击精确定位	131
8.3.2 结构冲击力精确识别	132
8.4 FBG 应变花应变解耦与横向效应补偿	133
8.4.1 应变解耦模型	133
8.4.2 FBG 横向效应补偿	134
8.5 冲击定位实验验证	136
8.5.1 实验系统的构建	136
8.5.2 结构冲击实验验证与结果分析	137
参考文献	140
第 9 章 光纤光栅在周界安防中的应用	142
9.1 引言	142
9.2 基于 EMD 的入侵行为识别算法	143
9.2.1 传感信号获取	143
9.2.2 入侵发生时间确定	143
9.2.3 改进 EMD 算法对信号进行分解	144
9.2.4 特征提取以及分类	148
9.3 基于 FBG 传感器的入侵定位算法	149
9.3.1 基于简支梁理论的初定位	149
9.3.2 基于改进 PSO 算法的入侵定位优化方案	152
9.4 入侵行为识别实验	154
9.4.1 入侵分类实验平台搭建	154
9.4.2 入侵分类实验原理	155
9.4.3 入侵信号提取及处理	155
9.4.4 特征提取及分类结果分析	159
9.5 入侵定位实验	161
9.5.1 FBG 传感器数量确定	161
9.5.2 实验原理	162

9.5.3	实验系统搭建	163
9.5.4	实验结果与分析	164
	参考文献	169
第 10 章	光纤光栅在大容量传感网中的应用	171
10.1	引言	171
10.2	FBG 传感网的复用技术	172
10.2.1	波分复用技术	172
10.2.2	时分复用技术	173
10.2.3	空分复用技术	174
10.2.4	光谱形状复用技术	175
10.3	大容量 FBG 传感光谱的压缩与重构	176
10.3.1	FBG 光谱压缩与重构算法	176
10.3.2	实验结果与分析	180
10.4	大容量 FBG 传感网的寻址定位	187
10.4.1	FBG 传感网模型及问题描述	187
10.4.2	FBG 传感网寻址定位算法	190
10.4.3	实验结果与分析	195
10.5	大容量 FBG 重叠光谱的精确解调	203
10.5.1	FBG 传感网的设计与构建	203
10.5.2	FBG 重叠光谱解调算法	204
10.5.3	实验系统搭建	209
10.5.4	实验结果与分析	210
	参考文献	214
附录		217

第1章 绪论

1.1 概述

随着科学技术的飞速发展，信息科学在人们的生产和生活中发挥着日益重大的作用和影响，成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率的强有力工具^[1,2]。采集信息技术、传输信息技术和处理信息技术组成信息科学的三大支柱，而传感器作为采集信息的关键部件^[3]，其技术的发展状况在整个信息科学的体系内都占有十分重要的地位^[4]。20世纪70年代以来，随着光通信技术的蓬勃发展以及光纤光栅制作技术的不断创新，各种不同类型以及结构迥异的新型光纤光栅不断涌现^[5]。近些年来，光纤光栅已经发展到不仅仅是单一器件或者单一传感模块制造技术，而是一种大规模、多功能、模块化和高集成的功能系统工艺制造技术这样的阶段，并且整个产业链的上下游工业制造关键技术也不断创新完善。

2009年8月，我国正式提出物联网发展计划“感知中国”，作为物联网四大关键技术之一的传感网络就支撑起整个物联网的信息感应和传输任务^[6]。光纤光栅传感器凭借自身具有的独特优点被广泛应用，如传感单元体积小、感应灵敏度高、避免来自电磁波的干扰、易于多点现场实时精确监测、可以在易燃易爆等恶劣环境下正常工作等^[7-9]。如今在我国如火如荼展开的“智慧城市”建设也是物联网发展蓝图中的一个分支，2015年我国的市场规模已达到将近7500亿元。

光纤传感器分类有三大标准：传感原理、待测对象、调制方式^[10]。按第一类传感原理的标准分为传感型光纤传感器和传光型光纤传感器：传感型光纤传感器既对待测量信号进行传感，同时也进行光的传输，因此也被称为功能型光纤传感器；传光型光纤传感器的作用只是用于传输信号，因此也被称为非功能型光纤传感器。按第二类待测对象的标准，如温度、浓度和应力等，可分为光纤温度传感器、光纤浓度传感器等。按第三类调制方式的标准，光纤传感器又被分为波长调制型、强度调制型、相位调制型、频率调制型和偏振调制型^[11]。

简易光纤光栅传感系统如图1.1所示，实验系统主要包含：宽带光源(BBS)、耦合器、光纤光栅传感器、光谱分析仪(OSA)。实验原理：宽带光源提供稳定的

宽带光，经过耦合器进入光纤光栅传感器中，满足传感器中心波长的光被反射回去，再经过耦合器到达光谱分析仪，利用光谱分析仪采集反射谱数据，数据传入电脑进行分析。

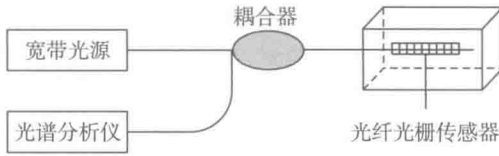


图 1.1 FBG 温度传感实验系统图

光纤光栅传感器属于波长调制型光纤传感器，通过外界待测物理参量对波长的调制来获取传感信息，实现传感检测。沿着光纤轴向方向纤芯折射率呈周期性变化，形成一个窄带的滤光器或者反射镜，即光纤光栅。在各类光纤传感器之中，光纤光栅传感器具有更多独特优点：

(1) 较强的抗干扰能力。光纤弯曲效应以及光源强度波动引起的光强起伏对光纤光栅传感信号波长不会引起干扰；因考虑了光波的频率特性，光纤光栅传感系统具有很高的可靠性和稳定性。

(2) 自参考传感器。不像干涉型光纤传感器要求初始参考，标定后的光纤光栅可进行绝对测量。

(3) 结构简单、体积小，制作工艺成熟。

(4) 便于复用，可实现大规模测量。

(5) 灵敏度高、可靠性好。

基于以上优点，光纤光栅传感器具有更好的发展前景和更深的研究潜力。

1.2 光纤光栅技术的发展与分类

1.2.1 光纤光栅的发展

1978 年 Hill 等利用 488nm 氩离子激光在研究光纤材料的非线性效应实验时，偶然间发现增加曝光时间，光纤的损耗逐渐增大且反射光也会逐渐增强^[12]。这一现象产生的原因是，在光轴上的反射波和传输波均满足驻波的条件，同时利用产生的驻波使得纤芯的有效折射率的变化周期呈现出均匀性，于是光纤具有了形成光栅最基本的元素^[13]。后来为了致敬威廉·亨利·布拉格(Sir William Henry

Bragg)在光栅方面突出的成就,他们将此种类型光栅命名为光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)。

1989年 Meltz 等发现掺锗光纤在 244nm 紫外线处存在单光子吸收,纤芯的有效折射率调制将会出现明显的改变^[14]。利用这一现象,将两束紫外线的干涉条纹从侧面照射到光纤体上,形成干涉条纹,明条纹处折射率被调制,便可以得到周期均匀的 FBG。244nm 紫外线侧写制作技术与以前的驻波写制法相比,方法灵活高效,只需要改变两束相干光的夹角,就可以对光纤光栅的波长进行控制,但这种制作工艺对光源相干长度要求较高,而且工作平台很容易受环境影响^[15,16]。

制作光纤光栅的一种非常重要的方法相位掩模法于 1993 年首次由 Hill 和工作于贝尔实验室的 Anderson 等证实^[17]。相较于侧面写入法,这种方法最大的突破就是 FBG 周期不再受激光光源波长的限制,仅仅由相位掩模板的周期决定,不再对激光光源的相干性提出过高的要求,整个制作过程得到很好的简化,且 FBG 的制作过程稳定、可重复并且具有很高的可靠性^[18]。这种成熟稳定的方法时至今日也经常被研究人员采用,光纤光栅的理论研究也被极大地向前推进,为光纤光栅的结构设计以及特性研究提供了强有力的技术支持。

激光器逐点刻写光栅技术同样也是迄今为止最成熟且经常被采用的制作光栅的技术之一^[19],其最大的优点是光栅的参数(如周期和长度)可以被灵活地选取。这种方法主要是沿着光轴方向,利用激光器脉冲穿过含有狭缝的掩模,然后透过透镜聚焦在光纤上,一个光栅周期一个光栅周期逐地诱导纤芯有效折射率变化,这时就可以通过激光脉冲的扫描移动距离来控制光栅周期的大小以及光栅的总长度。因此,制造过程需要非常稳定且精确的亚微米平移系统,这就对制作环境提出了很高的要求。在制作时一旦受到干扰,如热效应和光纤应变中微小的扰动,都会使光栅间距发生改变。每一光栅的栅格数量都比较庞大,逐一刻写必定需要花费很长的时间。

近些年随着科学技术的飞速发展,光栅的刻写技术得益于此,由以前的单一简陋的方法逐渐朝向多种单项技术融合写制技术的方向发展,使得光栅的制作更加趋向于人们所期望的方向^[20]。飞秒激光微加工技术就是在这样的背景下发展起来的。作为一种新型成栅技术,它与传统的长激光脉冲加工技术有很大的不同。超高的激光能量被注入光纤的一个很狭小的区域,超高能量的积累改变了电子的运动惯性,因此避免了线性吸收、能量转移以及材料散射带来的负面影响,诱导纤芯折射率永久性地变化,并且高能超快的激光脉冲产生的高非线性效应与材料的光敏特性和化学组构无关。而且这种技术没有热效应产生,对周围的材料没有影响,具有很高的加工准确性和加工重复率。如 2014 年 Rong 等就利用飞秒激

光加工技术在单模光纤的纤芯以及包层上同时写入具有双峰的 FBG, 其中偏离主峰的短波一侧是包层的损耗峰, 功率损耗对振动的方向很敏感^[21]。再如 2013 年, 严飞等从理论和实验上对飞秒微加工技术制作具有广义高斯切趾布拉格光栅的带宽特性进行了研究^[22]。

1.2.2 光纤光栅的分类

随着光纤光栅的不断发展及各领域应用的需求, 人们研究了不同结构的光纤光栅。根据折射率沿光纤轴向调制深度分布规律和栅格周期分布规律是否均匀, 可将光纤光栅分为两大基本类: 均匀光纤光栅和非均匀光纤光栅^[23], 详细分类如图 1.2 所示。

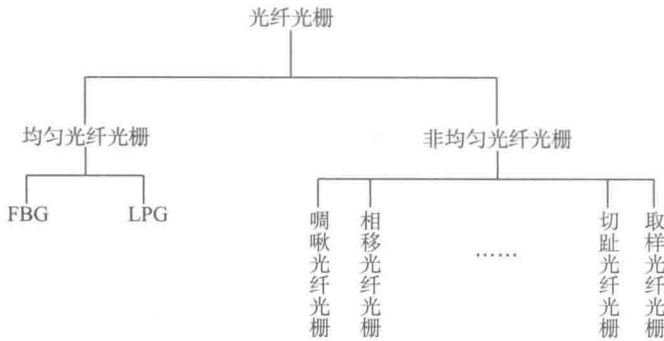


图 1.2 光纤光栅分类

(1) 均匀光纤光栅。主要包括两方面: 在光纤纤芯纵向上光栅折射率调制深度为某个恒定的常数; 每个相邻栅格的周期长度不变。此类光栅又分为短周期光纤光栅和长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPG)。其中, 短周期光纤光栅也就是光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)。FBG 具有较高的反射率和较窄的反射带宽, 并且栅格周期小于 $1\mu\text{m}$, 该光纤光栅因具有高灵敏度并且结构简单的特性, 被广泛应用于光通信领域和传感领域; LPG 与 FBG 不同, 栅格周期可达到几百微米, 远远大于 FBG, 通过将部分特定波长的光耦合进包层并将其损耗, 其目的是在透射光谱中形成宽带损耗峰, 属于透射型光栅。

(2) 非均匀光纤光栅。沿光纤轴向方向折射率调制深度不是常数的光纤光栅称为非均匀光纤光栅, 常见的啁啾光纤光栅、切趾光纤光栅、相移光纤光栅均为典型的非均匀光纤光栅。

1.3 光纤光栅传感器的研究与应用

光纤光栅传感器以其自身的优点在许多领域中被广泛地应用。根据光纤光栅系统的原理,其研究方向可以分为对光谱信号的处理以及实际应用。光纤光栅信号处理主要分为光谱信号降噪、缺损信号修补以及光纤光栅信号峰值检测;对于光纤光栅传感器的实际应用,主要包括多参量测量、结构健康检测、周界安防以及光纤光栅大容量传感网等。

目前,光纤光栅传感器正处于快速发展时期,各个国家都致力于对其应用和性能的研究,从结构的静应力、振动的测量到结构应变的健康监测等,各种传感器不断更新、改进。

国内外对光纤光栅传感技术的应用研究已经取得了较为丰硕的成果,不少光纤传感器已实用化,成为代替传统传感器的商品。光纤传感器技术是一门多学科交叉的高科技应用技术,本书将先介绍光纤光栅传感器的种类以及基础,分析光纤布拉格光栅的传感原理,为后面进一步学习光纤光栅传感器相关的应用做好铺垫;随后,提出几种常见的算法处理光纤光栅反射光信号中含有噪声以及缺失等问题,并且介绍一种高精度的峰值解调算法用来检测光纤光栅中心波长的漂移量;最后结合前面的基本理论以及信号处理的算法,将光纤光栅传感器应用到实际中,达到将理论基础与实际应用案例相结合的目的。

参 考 文 献

- [1] Luo D, Ma J, Ibrahim Z, et al. Etched FBG coated with polyimide for simultaneous detection the salinity and temperature[J]. Optics Communications, 2017, 392:218-222.
- [2] Wu Q, Chen L, Wang Z, et al. Information measurement of cognitive communication systems: the introduction of negative cognitive information[J]. IEEE Access, 2018, 20 (3): 2389-2406.
- [3] 黄翔东, 张皓杰, 刘琨, 等. 基于综合特征的光纤周界安防系统高效入侵事件识别[J]. 物理学报, 2017, 66(12): 207-216.
- [4] 任仲杰, 崔珂, 李建欣, 等. 基于二元矩形脉冲相位调制的迈克耳孙干涉型全光纤周界安防系统[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1206004.
- [5] 王照勇, 叶青, 卢斌, 等. 相位敏感光时域反射计实现兆赫兹分布式振动检测[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1115001.
- [6] 查国清, 徐亚妮, 康锐. 重点区域入侵安防设备系统可靠性建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(7):

- 1403-1409.
- [7] 李凯彦, 赵兴群, 孙小蕊, 等. 一种用于光纤链路振动信号模式识别的规整化复合特征提取方法[J]. 物理学报, 2015, 64(5): 251-257.
- [8] 杨正理, 孙书芳. 基于小波能量熵的光纤周界安防系统信号识别[J]. 光电子·激光, 2016, 27(12): 1328-1333.
- [9] 李玉, 刘铁根, 王绍俊, 等. 全光纤分布式视频联动长距离周界安防监控系统[J]. 光电子·激光, 2013, 24(09): 1752-1757.
- [10] Allwood G, Hinckley S, Wild G. Optical fiber Bragg grating based intrusion detection systems for homeland security[C]. Sensors Applications Symposium. IEEE, 2013:66-70.
- [11] 余明慧, 吴晗平, 吕照顺, 等. 分布式光纤周界警戒系统技术研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(8): 869-874.
- [12] 饶云江, 吴敏, 冉曾令, 等. 基于准分布式 FBG 传感器的光纤入侵报警系统[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 998-1002.
- [13] 仲志成, 赵斌, 林君, 等. 基于光纤传感技术的三维地应力传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 325-335.
- [14] Yu H, Yang X, Tong Z, et al. Temperature-independent rotational angle sensor based on fiber Bragg grating[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(5):1233-1235.
- [15] Cazzulani G, Cinquemani S, Ronchi M. A sliding mode observer to identify faulty FBG sensors embedded in composite structures for active vibration control[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2018, 271: 9-17.
- [16] Georges P, Mérette M. Toward a North American Security Perimeter? Assessing the trade, FDI, and welfare impacts of liberalizing 9/11 security measures[J]. Economic Modelling, 2012, 29(6): 2514-2526.
- [17] 安阳, 封皓, 张景川, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. 光学学报, 2013, 33(07): 0706005.
- [18] Matveenko V P, Shardakov I N, Voronkov A A, et al. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2017, 25(3): 1545-2255.
- [19] Yoo K W, Han Y G. Sensitivity improvement in fiber Bragg grating sensors using all-fiber weak value amplification based on optical attenuation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 968-973.
- [20] Theodosiou A, Komodromos M, Kalli K. Carbon cantilever beam health inspection using a polymer fibre Bragg grating array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 986-992.
- [21] 赵振刚, 姜飞, 李英娜, 等. 变压器绕组的风冷散热热路模型与 FBG 测温[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3938-3943.
- [22] 陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 基于短时稀疏时频分布的雷达目标微动特征提取及检测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(05): 1017-1023.
- [23] 关海鸥, 刘梦, 李春兰, 等. 基于小波包变换和量子神经网络的触电故障类型识别模型[J]. 农业工程学报, 2018(5): 183-190.

第 2 章 光纤光栅传感特性

2.1 引 言

光在纤芯和包层之间受到反射，以折线的形式进行传播。光纤光栅如图 2.1 所示，光纤纤芯通过一定方法使折射率沿轴向呈周期性调制，在纤芯内发挥着反射镜的作用，满足布拉格光栅波长条件的光被反射，其余波长的光被透射。其对外界物理量的传感是通过改变光纤光栅的参数，如栅格周期、纤芯折射率等，建立光纤光栅参数与物理量的数学关系，从而测得物理量的变化。

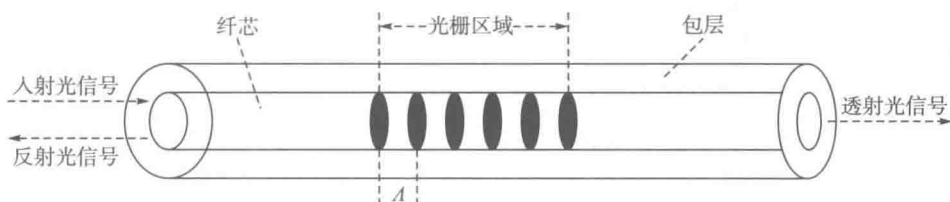


图 2.1 FBG 结构示意图

光从宽带光源发出，射入光纤光栅区域，由于 FBG 具有反射特性，其中符合其中心波长的光被反射回来形成反射谱，而其余光被透射过去，形成透射谱。当 FBG 受到外界环境(如温度、应变等)作用时，其反射谱会发生变化，即中心波长产生一定量漂移，但谱形不会产生变化。因此，可根据反射谱中心波长变化量与外界环境作用量间的数学关系，达到测量外界环境作用量大小的目的^[1]。

FBG 反射谱中心波长表达式如下：

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.1)$$

式中， λ_B 是 FBG 中心波长； n_{eff} 是光纤纤芯有效折射率； Λ 是光栅栅格周期。当外界环境作用于 FBG 时，导致 n_{eff} 和 Λ 发生变化，进而引起 λ_B 发生漂移，通过 λ_B 的漂移量来检测外界环境作用量的大小。

2.2 FBG 传感特性

2.2.1 应变传感特性

当利用 FBG 传感器测量工程结构应变时(不考虑温度), 轴向应力的作用, 导致光栅周期和光纤的弹光效应产生一定的变化, 从而使 FBG 反射谱对应的中心波长产生漂移。在一些工程应用中, 一般假定均匀轴向应变作用于光纤, 因此, 作用在 FBG 上的各向应力^[2]如下式:

$$\sigma_{zz} = -P_z, \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = 0 \quad (2.2)$$

式中, P_z 为轴向应力。由此可得, 光纤光栅在三个不同方向上的应变分别为下式:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{P_z}{E_l}, \varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\theta\theta} = -\nu \varepsilon_{zz} = \nu \frac{P_z}{E_l} \quad (2.3)$$

式中, E_l 是光纤光栅的弹性模量; ν 是纤芯的泊松比。对 FBG 反射谱中心波长表达式(2.1)两边求微分, 并整理可得

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{d\Lambda}{\Lambda} \quad (2.4)$$

因此, 光纤受到作用力后有

$$\frac{d\Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta L_a}{L_a} = \varepsilon \quad (2.5)$$

式中, L_a 是光纤的长度; ΔL_a 是光纤纵向变化量。则 FBG 中心波长漂移量如下:

$$\Delta\lambda_{B_i} = 2\Lambda \left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dL_a} \Delta L_a + \frac{dn_{\text{eff}}}{dA_d} \Delta A_d \right) + 2 \frac{d\Lambda}{dL_a} \Delta L_a \cdot n_{\text{eff}} \quad (2.6)$$

式中, A_d 是光纤直径; ΔA_d 是光纤直径变化量(由纵向拉伸引起); $\frac{dn_{\text{eff}}}{dL_a}$ 为弹光效应; $\frac{dn_{\text{eff}}}{dA_d}$ 为波导效应。

由式(2.5)可得 $\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta L_a}{L_a}$, 同时忽略波导效应, 则式(2.6)可表示为

$$\Delta\lambda_{B_z} = 2\Lambda \left[-\frac{n_{\text{eff}}^3}{2} \Delta \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}^2} \right) \right] + 2n_{\text{eff}} \varepsilon_{zz} L \frac{d\Lambda}{dL} \quad (2.7)$$

引入材料弹光系数 P_{xy} , 并结合式(2.3)和式(2.5), 则式(2.7)将变为