



光纤白光干涉 原理与应用

苑立波 杨军 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

光纤白光干涉原理与应用

苑立波 杨 军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

光纤白光干涉技术与方法是光纤技术多领域交叉应用中较为有代表性的一个分支。该项专门技术在宽谱光干涉特性研究、绝对形变光纤传感测量、光波导器件的结构及其对光波反射特性参量的检测、光纤陀螺环中光偏振态横向耦合测量与评估,尤其是在医学临床诊断的组织结构形态的光学层析技术等方面,都具有广泛的应用。本书将光纤技术与传统的干涉光学相结合,借助于光纤波导和光纤器件,构建各种光纤白光干涉光学系统,较为全面的论述了光纤白光干涉原理及其主要应用技术。

本书论述清晰,内容翔实,适合光学、光纤技术、光电检测等相关专业的本科生和研究生阅读,也可供从事光纤技术、光学测试等相关领域的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤白光干涉原理与应用/苑立波,杨军著. —北京:科学出版社,2016. 1
ISBN 978-7-03-045756-1

I. ①光… II. ①苑…②杨… III. ①光导纤维-光干涉-研究
IV. ①TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225191 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:35

字数:700 000

定价:210.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

光纤光学技术的迅速发展吸引了越来越多的科技工作者投身到这个不断扩展的研究领域中,使得这个光学分支的发展充满活力。与此同时,由于光纤光学新器件、新效应的不断涌现,反过来对过去传统光学又注入了新的生机。本书就是将光纤技术与传统的干涉光学相结合的一种尝试。借助于光纤波导和光纤器件,构建各种光纤白光干涉光学系统,较为全面地论述了光纤白光干涉原理及其主要应用技术。

本书作者在光纤白光干涉技术领域长期从事相关技术的研究工作,这使作者产生了系统汇集成书与该领域同仁共同分享的想法。最初希望立足于总结近二十年来在这方面的工作经验和新发展起来的一些方法。但是作者很快就发现:一方面,有许多计划纳入本书的研究内容还没有完全成熟,作者在相关的课题上对所指导的研究生进行了调整和新的安排,希望通过近几年的努力,使本书的内容更加充实、完整,这导致书稿迟迟不能完成;另一方面,如果仅仅将作者所开展的工作写入书中,这势必会遗漏该领域许多非常重要的工作。因此,作者下决心将该领域更多的重要工作纳入本书的写作计划,以便能够比较深入系统的介绍该领域在各个方面取得的重要进展。与此同时也不断地推进相关的研究工作,使其能够在短期完成的尽快完成,而将现在不能解决的问题提出来,让读者和作者在今后的工作中共同去探索。在这样不断调整与完善的过程中,我们终于完成了本书的写作。

在本书稿完成之际,作者要特别感谢东京大学的保利和夫教授和何祖源教授(何教授目前已经到上海交通大学任职),在东京大学 COE 计划的支持下,作者有幸到该校进行短期访学,并在访学期间完成了本书第 2 章和第 3 章的写作。特别感谢香港理工大学的周利民教授,受他的访学邀请,作者才能数月间暂时避开杂务搅扰而专心于本书第 4 章和第 7 章的写作。还要感谢我们的学生对本书的贡献,他们参与了本书材料的整理并绘制了大量的插图。

感谢国家自然科学基金重大项目(61290314),科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040815)、科技部国际合作计划项目多年来对本项研究工作的支持。

本书的第 1~4 章以及第 7 章由苑立波撰写,第 5、6 章由杨军撰写,第 8 章是由宋红彬博士编译整理了 A. F. Fercher 等的综述性文章而形成的,特此致谢。在书稿的撰写过程中,我们还参考了大量的国内外文献资料,并将这些研究者们卓

越的工作和对本专业领域的贡献体现在书中,这些贡献通过引用和参考文献的方式逐项标注,仅此一并致谢。

本书的出版离不开科学出版社编辑的鼓励、支持以及细心的编辑,同时还要感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书的资助。

由于书中许多内容仍处于探索之中,难免存在不妥之处,希望读者指出不足,将意见和建议反馈给我们,以便在本书再版时进行补充和修改。联系方式:
E-mail:lbyuan@vip.sina.com.

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 白光干涉理论及其发展	2
1.3 光纤白光干涉技术发展历程	3
1.3.1 光纤白光干涉传感技术	3
1.3.2 光纤白光干涉测量技术	5
1.3.3 基于白光干涉的 OCT 技术	6
1.4 发展动力	8
1.4.1 需求牵引的拉动	9
1.4.2 技术发展的推动	9
1.5 小结	10
参考文献	10
第 2 章 宽谱光源的相干理论	23
2.1 引言	23
2.2 宽谱光源的功率谱及其自相关函数特性	24
2.3 几种典型的宽谱光源	28
2.3.1 常用的宽谱光源	28
2.3.2 LED 宽谱光源及其特征参数	28
2.3.3 SLD 光源	31
2.3.4 ASE 光源	38
2.3.5 基于光子晶体光纤的非线性光学效应产生的超连续谱光源	43
2.4 宽谱光源的自相关特性	44
2.4.1 高斯函数的傅里叶变换特性	44
2.4.2 光谱密度高斯基函数展开方法	46
2.4.3 宽谱光源的自相关特性	47
2.5 光纤中宽谱光的部分相干特性	55
2.5.1 光纤中窄谱准单色光的空间强度干涉定律	57
2.5.2 光纤中宽谱光的谱干涉定律	61
2.5.3 谱干涉定律微观机制的物理解释	64

2.5.4	互相干的传播	66
2.5.5	干涉的互补空间	68
2.5.6	宽谱光的干涉在互补空间中的表现形式	68
	参考文献	70
第3章	部分偏振光的内禀相干不变性	73
3.1	引言	73
3.2	偏振光干涉的相干度	74
3.2.1	光的偏振态及其描写方法	74
3.2.2	偏振度的概念	75
3.2.3	部分偏振光的部分相干性	76
3.3	部分偏振光的内禀相干不变性	80
3.3.1	内禀相干度的概念	80
3.3.2	部分偏振光的内禀相干不变性理论	84
3.3.3	光波电场部分偏振与相干之间的线性关系	92
3.3.4	来自同一光源的部分偏振与部分相干光干涉条纹可见度的优化	95
3.4	单模光纤中的偏振光传输	97
3.4.1	单模光纤中的偏振光描写方法	97
3.4.2	外界扰动导致的正交偏振模式耦合	103
3.4.3	偏振光波传输的矩阵表示	115
3.5	光纤中光偏振扰动及其等效变换矩阵	119
3.5.1	挤压所致的线性双折射	119
3.5.2	扭转引起的偏振特性变化	122
3.5.3	温度与温度梯度效应对偏振态的影响	124
3.6	偏振控制方法与控制技术	126
3.6.1	保偏单模光纤	127
3.6.2	光纤偏振态控制技术	129
3.6.3	光学线性变换等效补偿器	130
	参考文献	132
第4章	光纤白光干涉仪与解调仪	138
4.1	引言	138
4.1.1	光纤白光干涉仪	138
4.1.2	光纤白光干涉解调仪	138
4.1.3	本章的内容	139
4.2	光纤白光干涉仪与解调仪的基本器件	139
4.2.1	光纤准直器	139

4.2.2	光纤反射器	140
4.2.3	光纤隔离器	141
4.2.4	光纤环形器	143
4.2.5	光纤耦合器	144
4.3	光纤白光干涉仪的基本构造	146
4.3.1	散射光场及其 Born 近似	146
4.3.2	空-时域光纤白光干涉仪	152
4.3.3	谱域光纤白光干涉仪	156
4.3.4	偏振相关的光纤白光干涉仪	159
4.4	光纤链路对串接干涉仪之间的相干信号偏振态的影响	168
4.4.1	连接光纤对干涉测量的影响	168
4.4.2	基于内禀相干不变性原理的信号恢复方法	169
4.5	光纤白光干涉解调仪	171
4.5.1	空域干涉解调方法(一):单探测器系统	171
4.5.2	空域干涉解调方法(二):CCD 线性阵列探测器系统	188
4.5.3	谱域干涉解调方法	198
4.5.4	时域相干与谱域相干的关系	202
	参考文献	208
第 5 章	白光干涉信号处理方法	213
5.1	引言	213
5.2	白光干涉信号特征与信号预处理	215
5.2.1	白光干涉信号特征	215
5.2.2	合成光源方法	218
5.2.3	白光干涉信号的预处理算法	224
5.2.4	基于多光源的预处理算法	230
5.2.5	信号预处理小结	234
5.3	时(空)域信号处理方法	235
5.3.1	条纹重心法	236
5.3.2	包络提取法	239
5.3.3	空间频率法	251
5.3.4	相移干涉法	255
5.3.5	时(空)域信号处理方法小结	257
5.4	频(谱)域信号处理方法	257
5.4.1	白光干涉的频谱域探测	258
5.4.2	多点法	261

5.4.3	傅里叶变换法	264
5.4.4	频(谱)域信号处理方法小结	270
	参考文献	271
第6章	白光相干域测量技术	277
6.1	引言	277
6.2	白光相干域测量基本原理	279
6.2.1	白光相干域测量原理	279
6.2.2	空间分辨率	287
6.2.3	色散效应影响	289
6.2.4	探测信号频率与带宽	291
6.2.5	本征噪声源	293
6.2.6	测量灵敏度	295
6.2.7	关键性能之间的平衡	299
6.3	白光相干域反射测量技术与应用	300
6.3.1	OLCR 系统典型结构	303
6.3.2	OLCR 测量的关键技术	309
6.3.3	OLCR 测试技术的应用	318
6.4	白光干涉偏振测量技术	336
6.4.1	分布偏振串扰测量原理	339
6.4.2	OCDP 测量关键技术	344
6.4.3	OCDP 测试系统构建	365
6.5	Y 波导测试方法与应用	372
6.5.1	测试原理	375
6.5.2	测量方法	379
6.5.3	实验结果	384
6.5.4	分析与讨论	388
	参考文献	390
第7章	光纤白光干涉传感技术	399
7.1	引言	399
7.2	光纤白光干涉传感测量的物理参量	400
7.2.1	位移测量	401
7.2.2	压力测量	403
7.2.3	倾角测量	405
7.2.4	折射率测量	408
7.2.5	应变测量	411

7.2.6	温度测量	413
7.3	光纤白光干涉单点传感器	414
7.3.1	光纤白光干涉传感器的尺度特性	414
7.3.2	典型的单点传感器及其解调方法	421
7.4	光纤白光干涉分布式传感技术	426
7.4.1	准分布应变传感器	427
7.4.2	白光干涉分布式扰动定位传感系统	431
7.4.3	运动扫描式白光干涉仪及其分布式振动传感系统	438
7.5	光纤白光干涉传感多路复用与网络技术	448
7.5.1	白光干涉光纤传感器的多路复用技术	449
7.5.2	发展光纤传感网络技术的理由	454
7.5.3	白光干涉传感网络拓扑结构与关键问题	455
7.5.4	白光干涉传感网络应用方案举例	462
	参考文献	468
第8章	白光相干层析成像技术	474
8.1	引言	474
8.1.1	OCT的基本结构	475
8.1.2	OCT的信号处理方法	476
8.2	OCT信号特性	478
8.2.1	单散射和光层析成像	478
8.2.2	样品的多重散射	483
8.2.3	探测深度	483
8.2.4	灵敏度	486
8.2.5	散斑	488
8.2.6	分辨率	490
8.3	OCT光源	493
8.3.1	相干特性	493
8.3.2	波长	495
8.3.3	光谱结构	497
8.4	低相干干涉仪和 OCT	500
8.4.1	时域 OCT	500
8.4.2	傅里叶域 OCT	504
8.4.3	并行 OCT	508
8.5	功能性 OCT	511
8.5.1	偏振敏感 OCT	511

8.5.2	多普勒 OCT	514
8.5.3	依赖波长的 OCT	518
8.6	OCT 应用	524
8.6.1	眼科中的 OCT	525
8.6.2	OCT 活检和功能 OCT	526
8.6.3	非医学 OCT	531
	参考文献	532

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

光纤白光干涉技术与方法是光纤技术多领域交叉应用中较为有代表性的一个分支。该项专门技术在宽谱光干涉特性研究、绝对形变光纤传感测量、光波导器件的结构及其对光波反射特性参量的检测、光纤陀螺环中光偏振态横向耦合测量与评估,尤其是在医学临床诊断的组织结构形态的光学层析技术等方面,都具有广泛的应用。

本章首先简要对光纤白光干涉技术的发展给出一个概略性的描述。从需求牵引与技术本身发展规律的视角出发,分析该技术发展的动力基础。最后,给出对该项专门技术及其发展趋势的描绘和展望。

光纤白光干涉原理与技术的发展既取决于基础理论上的深刻认识,又受益于技术上重大进步的启迪,在社会发展需求的牵引下,历经了几十年的研究与积淀,在传感技术、计量与测量学、生物学、医学与临床应用等领域取得了较大的进步,获得了广泛的应用。

在该技术发展过程中,具有里程碑意义的事件包括:

(1) 1955 年, Wolf^[1] 和 Blanc-Lapierre^[2] 分别独立建立了部分相干光理论,引进了关联函数。对关联函数的深入认识与系统研究,奠定了白光干涉的理论基础。

(2) 1983 年, Culshaw 领导的小组^[3] 首次报道了基于白光干涉原理在光纤传感中的应用,开启了光纤白光干涉传感技术的研究方向。

(3) 1986 年, Takada 等^[4] 提出了采用超辐射半导体激光二极管(super luminescent light emitting diode, SLD) 宽谱偏振光源来测量沿保偏光纤传输的光的横向耦合特性的方法,奠定了光学相干域偏振测量(optical coherence domain polarimetry, OCDP) 的研究基础。

(4) 1987 年, Youngquist 等^[5] 展示了一种光学低相干反射技术(optical low-coherence reflectometry) 的光学评估新技术,后来被简称为 OLCR。

(5) 1991 年, Fujimoto 等^[6] 首次展示了基于白光干涉的二维层析成像方法,有力地推进了光学相干层析成像(optical coherence tomography, OCT) 技术的研究。

(6) 2003 年,发展了频域光学相干层析成像(Fourier domain optical coherence tomography,FD-OCT)技术,该技术与之前的时域 OCT 技术相比,同时解决了测量灵敏度与扫描测量速度的问题^[7~12]。

(7) 2003 年,Wolf^[13]在对部分偏振光相干特性的分析时,指出干涉的基本作用。基于这种考虑,他构造了一种相干与偏振的统一理论,这预言了随机光场的大量未知特性。

(8) 2005 年,Réfrégier 等^[14]提出了一种测量相干特性具有的一般不变性的新方法,称为内禀相干不变性理论,深化并拓展白光干涉理论的内涵,被用于解决信号处理过程中偏振衰退的问题,进一步导致了光纤白光干涉偏振传感解调新技术的发展。

1.2 白光干涉理论及其发展

白光干涉理论基础主要源于光的部分相干理论^[1,2],这在 Born 与 Wolf 所著的《光学原理》(1999 年的第七版)^[15]中有较为详细的阐述。由于普遍的相关函数的引入,介于完全相干和完全不相干光的两个极端情况之间的空白地带得以进行充分的研究。这为“白光”——宽谱光源的干涉及其应用奠定了理论基础。之后发现,Wolf 所引入的关联函数服从两个波动方程:不仅光波扰动本身以波动的形式传播,而且其关联也以波动的方式进行传播。这导致了 Wolf 后来又进一步发展了部分相干光的光谱相干规律及其光谱相干的传播理论。

在光纤白光干涉理论的讨论中,与空间中光波传播的情况不同,光波在光纤中传输时其偏振态易受到影响,因此光的偏振问题就显得格外重要。尽管偏振光学中极少严格讨论部分相干光的偏振态问题,尤其是部分偏振光问题;但是传统的偏振光的概念及其对光的偏振分析方法仍然可以用于讨论部分相干光的部分偏振性质。2003 年 Wolf^[13]在对部分偏振光的相干特性进行分析时,指出干涉的基本作用。因此他构造了一种相干与偏振的统一理论,这预言了随机光场的大量未知特性。事实上,部分偏振光及部分相干光的理论只有近来才受到人们的关注。Wolf 发展的理论对相干分析方法做出了新贡献,并开启了迷人的光学领域新问题的讨论,这个问题就是:在干涉实验中,必须使光偏振才能获得最大的相干度吗?

2005 年,Réfrégier 和 Roueff^[14]为了回答上述问题,提出了一种测量相干特性具有的一般不变性的新方法,给出部分偏振光的内禀相干不变度的概念并建立了内禀相干不变性理论。该理论指出,两光波电场之间的内禀相干度与每一个光波电场的偏振度紧密相关,偏振度描写的是每个光波电场自身的统计相关的有序程度,而内禀相干度则是指两光波电场之间的统计相关的有序程度。因为两者所描

述的对象是不同的,因此两者不仅能通过内禀相干度的新概念得以分开,而且两者具有不同的物理意义。内禀相关理论表明部分偏振光的相干分析可分解为具有不同不变特性的四个参数的分析。偏振度与每个电场分量自身间的随机性相关,而内禀相干度表征的是矢量电场之间的随机性。正是在内禀相干不变性理论的基础上,发展了光纤中部分偏振相干的偏振补偿测量方法,并将其进一步应用于远程白光干涉偏振扫描的传感解调系统中。

1.3 光纤白光干涉技术发展历程

光纤白光干涉技术的发展,可以从以下三个方面进行概括性的阐述:光纤白光干涉传感技术、光纤白光干涉测量技术和基于白光干涉的光学相干层析技术。

1.3.1 光纤白光干涉传感技术

白光干涉测量(有时称为低相干测量方法)在经典光学中已有详尽阐述^[15]。它使用低相干、宽谱光源,如超辐射半导体激光二极管(SLD)或半导体发光二极管(light emitting diode, LED)作为光源。所以这种传感方法通常被称为“白光”干涉测量方法。同所有的干涉原理一样,光程的改变可以通过观测干涉条纹来进行分析。

尽管早在1975年就提出了相干原理^[16],并于1976年在光纤通信领域中实现了可能的传输方案^[17],但其在光纤传感技术中的应用却是由Culshaw的研究小组首次报道于1983年^[3]。第一个完整的基于白光干涉技术的位移传感系统是在1984年报道的^[18]。此成果显示出白光干涉测量技术可以应用于任何可以转换成绝对位移的物理量的测量,并且具有很高的测量精度。1985~1989年,基于白光干涉原理的传感器被广泛应用于压力^[19~21]、温度^[22~25]和应变^[26,27]测量的研究中。通过一系列研究和技术改进,如发展了光强度噪声衰减技术^[28]、扫描范围扩展延迟技术^[5]和测量范围扩展技术^[29],使得该技术的研究内涵和应用范围得以迅速发展。

利用低相干技术的光纤传感器,其最基本的构成如图1.1所示。相对于传感干涉仪,串接的第二个解调干涉仪对于获得干涉条纹的信息来说是必需的。这个串接的结构将取决于处理干涉信号的方法,选用分光计还是第二解调干涉仪的结构,要取决于光谱分析还是相位分析。

自1990年以来,光纤白光测量技术已持续发展,并逐渐形成了一个研究方向,众多研究者指明了这项技术的优点。白光干涉测量技术为绝对测量提供了更多的解决方案,而这些都是采用高性能相干光源的传统光纤干涉仪所无法解决的。近二十余年,在信号处理、传感器设计、传感器研制、传感器多路复用等方面,

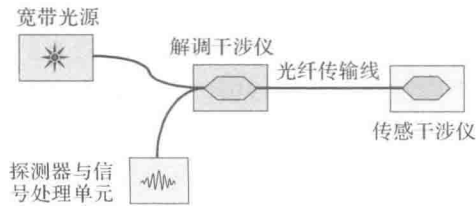


图 1.1 基于白光干涉式光纤传感系统的基本构成

白光干涉测量技术得到了较大发展。在信号处理方面,一些新方案的提出,提高了光纤白光干涉仪的性能;发展了高速机械扫描法技术,扫描速度从 21m/s 逐步提高到了 176m/s ^[30~32]。电子扫描技术相对于机械扫描方法的优点是更紧凑、精密与快捷,并且避免了使用任何移动装置^[33~37]。光源合成方法是对光纤传感器信号处理的一大改进,显著提高了识别并确定干涉传递函数中心条纹位置的能力^[38,39]。在此之后,其他研究人员的工作,又进一步发展了这项技术^[40,41]。另一种改进对中心条纹识别精度的方法是使用多阶平方(multi-stage-squaring)信号处理方案^[42]。

光纤白光干涉仪的另外一个优点就是可以很容易地实现多路复用。多个传感器在各自的相干长度内,只存在单一的光干涉信号,因而无需更复杂的时间或者频率复用技术对信号进行处理。20 世纪最后十年的研究工作,主要集中在发展多路复用传感器结构,以增加应用领域对传感器数量与容量的需求。这些典型的白光干涉多路复用方案使用了分立的参考干涉仪,并进行时间延时,以匹配遥测传感干涉仪。传感干涉仪是完全无源的,而且用于解调的复用干涉信号对光纤连接导线中的任何相位或长度改变不敏感。在分布式传感器^[43]概念的基础上,为了构成准分布式光纤白光干涉测量系统,研究者进行了许多探索和尝试。Gusmeroli 等^[44]发展了低相干多路复用准分布单线路偏振传感系统,用于结构监测;Lecot 等^[45]所报道的实验系统中包含超过 100 个多路复用的温度传感器,用于核电站交流发电机定子发热量的监测;Jackson 等^[46]所建立的通用系统是基于空间多路复用,最大可以连接 32 个传感器;Sorin 和 Baney^[47]提出了一种新型的基于迈克耳孙(Michelson)干涉仪和自相关器的干涉多路复用传感阵列方案;Inaudi 等^[48]建立了一种并行多路复用方案。此外,基于简单的光纤迈克耳孙干涉仪,分别使用光纤开关和 $1 \times N$ 星型耦合器的串行和并行多路复用技术分别报道于文献^[49]和^[50]。近来,文献^[51]又提出了一种光纤环型谐振腔方案。使用环型谐振腔的目的是取代文献^[49]中价格昂贵的光纤开关。它的优点是大大减小了多路复用传感阵列的复杂性和成本。

随着光纤白光干涉传感技术的不断发展,该技术日趋完善,同时也发展了越来越多的应用。Inaudi 等^[52]发展了低相干大尺度光纤结构传感器,在瑞士工业建

筑业中被广泛使用,获得了几微应变的分辨率,其测量范围超过几千微应变。通过采用与通道截取光谱法相似的信号处理方法,绝对外部应力传感系统展示了低于 $100\mu\epsilon$ 的轴向应变分辨率^[53]。文献[54]~[56]报道了基于白光干涉技术的光纤引伸计用于监测混凝土试样内部的温度和测量一维、二维应变。可以预期,这种基于白光干涉技术的绝对应变传感器将在智能结构和材料中起到越来越重要的作用^[57]。

与国外开展的光纤白光干涉技术研究相比,国内的研究起步稍晚。早期研究集中在光纤白光干涉仪构建和白光干涉原理在器件测量的应用方面,如上海大学的张靖华等^[58,59]分别开展了利用白光干涉原理实现保偏光纤测量与连接对轴,以及光源功率谱对白光干涉测量影响的研究;华中科技大学王奇等^[60]于1993年报道了一种用多模光纤连接的双法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪传感系统,可用于温度和压力的测量;清华大学李雪松、廖延彪与中国计量科学院李天初等^[61]于1996年合作报道了一种白光干涉型迈克耳孙光纤扫描干涉仪,可在 $150\mu\text{m}$ 的测量范围内,实现测量不确定度为 $1.5\mu\text{m}$ 的测量;浙江大学周柯江等^[62,63]于1997年报道了利用白光干涉技术用于偏振模式分布的测量;上海交通大学张美敦等^[64,65]报道了光纤干涉仪的臂长差和基于白光光纤干涉仪的折射率测量方法。

近年来,在传感与测量研究方面,国内的研究人员广泛地关注将白光干涉原理与光纤技术相结合的研究,发展了多种新型结构的光纤白光干涉仪、白光干涉信号解调方法、白光光纤传感器以及应用,实现各种物理量诸如位移^[66]、温度与应变^[67]、压力^[68]、折射率等的测量传感器及其应用的研究。上述研究主要集中在高等院校中,如天津大学的张以谟等^[69]开展了数字化白光干涉扫描仪及其信号处理^[70]和包络提取^[71]、保偏光纤分布式传感^[72,73]、基于白光干涉原理的光学相干层析技术^[74,75]等诸多方面的研究;重庆大学饶云江^[76,77]和大连理工大学荆振国等^[78,79]分别发展了基于非本征 F-P 腔的光纤白光传感器及其智能结构的应用;北京理工大学江毅等^[80~82]发展的傅里叶变换(Fourier transform)波长扫描的白光光纤 F-P 传感器及其信号解调方法;电子科技大学周晓军等^[83,84]发展的基于白光干涉原理和保偏光纤的分布式传感器。哈尔滨工程大学则专注于光纤白光干涉传感技术的研究,发展了光纤白光干涉的理论分析方法,构造了多种新型结构的白光光纤干涉仪^[85],拓展了准分布线阵、矩阵和环形网络光纤传感器网络拓扑结构^[86,87],并发展了一系列对于混凝土内部进行应力-应变测量的方法^[88,89]。

1.3.2 光纤白光干涉测量技术

光学白光干涉测量技术是一种非接触无损光学测量技术,适合对光波透明或可穿透的材料或者器件进行评估与测量。该技术起源于光纤通信工业,为了检测光波导器件或光纤中的缺陷,发展了 OLCR^[5]。OLCR 技术的发展得益于许多器

件的发展,如宽带半导体光源、单模光纤以及光纤耦合器等。该技术用于测量光学波导装置尺寸和小型光学元件中的缺陷评估中,其典型的分辨率在数十微米^[90~92]。OLCR技术的快速、精确及无损伤测量等一系列技术优势,使其成为一个十分活跃的研究方向。

在解决高精度光纤陀螺技术过程中,人们需要发展一种能够评估光纤陀螺系统中各个元件的特性参量的技术,以便确定各个相关参量之间的关系,从而提高系统的综合性能。特别是保偏光纤环这一关键单元在绕制过程中以及绕制后保偏特性的变化对陀螺性能将产生较大的影响,因此进一步发展了OCDP技术^[4],用于保偏光纤正交偏振模的横向耦合相关分析,目的是解决光纤陀螺环中绕环技术的评估与检验。OCDP技术是光纤白光干涉技术中的透射式测量技术,该技术目前已经成为高精度光纤陀螺光学元器件检测与评估的重要方法之一。

1.3.3 基于白光干涉的OCT技术

在许多方面,由于使用安全且成本低廉,光学技术在医学中扮演了很重要的角色。在过去的二十多年中,迅速发展的低相干干涉仪(low-coherence interferometry, LCD)以及OCT技术为医学领域提供了先进的研究与诊断方法^[6,93,94]。OCT技术引领了宽谱光源的短距离瞬态相干技术,由可以深至组织内部2mm的后向散射信号,可获得组织深部的高分辨率微结构图像,这种方法完全是非侵入的。OCT技术作为一种生物组织微结构图像的获取工具在医学临床诊断中具有潜在的应用价值,并逐渐获得了广泛的应用^[95~104]。在过去的十年中,OCT技术快速发展并取得显著的成就。与此同时,在过去的十年里,纳米技术也取得了快速的进步并在医学领域中开创了被称为“纳米医学”的新兴领域。尽管纳米医学尚处于其发展的初期,但在未来的十年里该研究方向极具发展潜力。而低相干测量技术将被证明是一种关键的成像工具,必将在纳米医学中获得广泛的应用。

1. OCT技术的起源与演进

OCT技术的发展可上溯至20世纪80年代^[5,105~108],Fercher等^[109]和Fujimoto等^[110]将该技术引入眼科学。在20世纪80年代末期,他们采用一维光程扫描技术测量了眼睛内部各部分组织尺寸。Huang等在1991年进一步扩展了该技术^[6],使其可以进行二维层析成像,这就是今天众所周知的OCT。首次进行体内视网膜成像是在1993年由Fercher等^[111]和Swanson等^[112]分别独立获得的。此后,OCT技术作为一个需求牵引应用研究领域,人们开展了大量的工作,并被广泛应用于医学成像的研究中。随后,发展了宽带激光光源、高灵敏度高速成像技术,并与标准医学导管和内窥镜相结合,发展了先进的OCT集成探头。这些技术又进一步推动了各种OCT功能的深化与发展,如多普勒OCT技术、偏振敏感