

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划·重大出版工程规划项目



变革性光科学与技术丛书

High-Temperature Fiber
Optical Sensing Techniques

光纤高温传感技术

江毅 于永森 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

光纤高温传感器是近年来日益受到重视并发展起来的一类新型光纤传感器,涉及光学、电子、材料等学科。本书系统介绍了北京理工大学和吉林大学两个课题组在高温光纤传感器领域的最新研究成果,同时集结了国内同行的部分研究成果。全书包括 10 章,分为四大部分。第一部分包括第 1~2 章,讲述光纤传感器的信号解调技术;第二部分包括第 3~6 章,讲述温度、压力、应变、振动这 4 种石英光纤高温传感器;第三部分包括第 7 章,讲述光纤光栅高温传感器;第四部分包括第 8~10 章,讲述蓝宝石光纤高温传感器。

本书适合作为相关专业硕士研究生和博士研究生教材,以及从事光纤传感技术研究的科研工作者和工程技术人员的参考书籍。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

光纤高温传感技术/江毅,于永森著. —北京:清华大学出版社,2023.4
(变革性光科学与技术丛书)
ISBN 978-7-302-62686-2

I. ①光… II. ①江… ②于… III. ①高温—光纤传感器 IV. ①TP212.14

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 023837 号

责任编辑:鲁永芳

封面设计:意匠文化·丁奔亮

责任校对:欧 洋

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:23.5

字 数:474 千字

版 次:2023 年 4 月第 1 版

印 次:2023 年 4 月第 1 次印刷

定 价:169.00 元

产品编号:091790-01

丛书编委会

主 编

罗先刚 中国工程院院士,中国科学院光电技术研究所

编 委

周炳琨 中国科学院院士,清华大学

许祖彦 中国工程院院士,中国科学院理化技术研究所

杨国桢 中国科学院院士,中国科学院物理研究所

吕跃广 中国工程院院士,中国北方电子设备研究所

顾 敏 澳大利亚科学院院士、澳大利亚技术科学与工程院院士、
中国工程院外籍院士,皇家墨尔本理工大学

洪明辉 新加坡工程院院士,新加坡国立大学

谭小地 教授,北京理工大学、福建师范大学

段宣明 研究员,中国科学院重庆绿色智能技术研究院

蒲明博 研究员,中国科学院光电技术研究所

清华大学出版社

丛书序

光是生命能量的重要来源,也是现代信息社会的基础。早在几千年前人类便已开始了对光的研究,然而,真正的光学技术直到 400 年前才诞生,斯涅耳、牛顿、费马、惠更斯、菲涅耳、麦克斯韦、爱因斯坦等学者相继从不同角度研究了光的本性。从基础理论的角度看,光学经历了几何光学、波动光学、电磁光学、量子光学等阶段,每一阶段的变革都极大地促进了科学和技术的发展。例如,波动光学的出现使得调制光的手段不再限于折射和反射,利用光栅、菲涅耳波带片等简单的衍射型微结构即可实现分光、聚焦等功能;电磁光学的出现,促进了微波和光波技术的融合,催生了微波光子学等新的学科;量子光学则为新型光源和探测器的出现奠定了基础。

伴随着理论突破,20 世纪见证了诸多变革性光学技术的诞生和发展,它们在一定程度上使得过去 100 年成为人类历史长河中发展最为迅速、变革最为剧烈的一个阶段。典型的变革性光学技术包括:激光技术、光纤通信技术、CCD 成像技术、LED 照明技术、全息显示技术等。激光作为美国 20 世纪的四大发明之一(另外三项为原子能、计算机和半导体),是光学技术上的重大里程碑。由于其极高的亮度、相干性和单色性,激光在光通信、先进制造、生物医药、精密测量、激光武器乃至激光核聚变等技术中均发挥了至关重要的作用。

光通信技术是近年来另一项快速发展的光学技术,与微波无线通信一起极大地改变了世界的格局,使“地球村”成为现实。光学通信的变革起源于 20 世纪 60 年代,高琨提出用光代替电流,用玻璃纤维代替金属导线实现信号传输的设想。1970 年,美国康宁公司研制出损耗为 20dB/km 的光纤,使光纤中的远距离光传输成为可能,高琨也因此获得了 2009 年的诺贝尔物理学奖。

除了激光和光纤之外,光学技术还改变了沿用数百年的照明、成像等技术。以最常见的照明技术为例,自 1879 年爱迪生发明白炽灯以来,钨丝的热辐射一直是最常见的照明光源。然而,受制于其极低的能量转化效率,替代性的照明技术一直是人们不断追求的目标。从水银灯的发明到荧光灯的广泛使用,再到获得 2014 年诺贝尔物理学奖的蓝光 LED,新型节能光源已经使得地球上的夜晚不再黑暗。另外,CCD 的出现为便携式相机的推广打通了最后一个障碍,使得信息社会更加丰

富多彩。

20 世纪末以来,光学技术虽然仍在快速发展,但其速度已经大幅减慢,以至于很多学者认为光学技术已经发展到瓶颈期。以大口径望远镜为例,虽然早在 1993 年美国就建造出 10m 口径的“凯克望远镜”,但迄今为止望远镜的口径仍然没有得到大幅增加。美国的 30m 望远镜仍在规划之中,而欧洲的 OWL 百米望远镜则由于经费不足而取消。在光学光刻方面,受到衍射极限的限制,光刻分辨率取决于波长和数值孔径,导致传统 i 线(波长: 365nm)光刻机单次曝光分辨率在 200nm 以上,而每台高精度的 193 光刻机成本达到数亿元人民币,且单次曝光分辨率也仅为 38nm。

在上述所有光学技术中,光波调制的物理基础都在于光与物质(包括增益介质、透镜、反射镜、光刻胶等)的相互作用。随着光学技术从宏观走向微观,近年来的研究表明:在小于波长的尺度上(即亚波长尺度),规则排列的微结构可作为人造“原子”和“分子”,分别对入射光波的电场和磁场产生响应。在这些微观结构中,光与物质的相互作用变得比传统理论中预言的更强,从而突破了诸多理论上的瓶颈难题,包括折反射定律、衍射极限、吸收厚度-带宽极限等,在大口径望远镜、超分辨成像、太阳能、隐身和反隐身等技术中具有重要应用前景。譬如:基于梯度渐变的表面微结构,人们研制了多种平面的光学透镜,能够将几乎全部入射光波聚集到焦点,且焦斑的尺寸可突破经典的瑞利衍射极限,这一技术为新型大口径、多功能成像透镜的研制奠定了基础。

此外,具有潜在变革性的光学技术还包括:量子保密通信、太赫兹技术、涡旋光束、纳米激光器、单光子和单像元成像技术、超快成像、多维度光学存储、柔性光学、三维彩色显示技术等。它们从时间、空间、量子态等不同维度对光波进行操控,形成了覆盖光源、传输模式、探测器的全链条创新技术格局。

值此技术变革的肇始期,清华大学出版社组织出版“变革性光科学与技术丛书”,是本领域的一大幸事。本丛书的作者均为长期活跃在科研第一线,对相关科学和技术的历史、现状和发展趋势具有深刻理解的国内外知名学者。相信通过本丛书的出版,将会更为系统地梳理本领域的技术发展脉络,促进相关技术的更快速发展,为高校教师、学生以及科学爱好者提供沟通和交流平台。

是为序。

罗先刚

2018 年 7 月

前言

光纤传感技术是伴随着光纤通信技术发展起来的一门新型传感与测量技术,以光纤作为传输和传感介质,能够实现几乎所有物理量的测量。由于光纤本身是玻璃丝,因此以其为基础的传感器具有传统电子式传感器所没有的一系列优点,如抗电磁干扰、本征安全、无源、灵敏度高、远距离测量、便于传感器复用、能够实现分布式传感等。但我们也应该清楚地知道光纤传感器的显著不足:价格昂贵和使用困难。一套光纤传感器系统,光源、传感器和信号接收部分都是必需的,除了简单的强度调制型传感器,还需要复杂的信号解调,使其造价昂贵。另外光纤传感器目前还很难像传统的传感器一样,使用者不必知道传感器的原理,拿来安装上就可以使用。使用光纤传感器需要经过专业培训,甚至只有专业人士才能操作。这是由于该技术还处于发展阶段,传感器的种类繁多,规范性差,缺乏强制标准。因此在能够正常使用电子类传感器的地方,不建议使用光纤传感器。光纤传感器的最佳使用场合是传统的电子类传感器无法使用,或者使用很麻烦的地方。比如,在电力系统安全测试方面,由于存在高压电击、强电磁干扰等问题,光纤传感器就有很大的应用空间;在油气存储、煤矿等能源领域,对温度、压力、液位、流量等传感器的安全性要求极高,本征安全的光纤传感器就具有天然的优势;在大型建筑、桥梁、大坝等安全监测领域,光纤传感器便于复用及无源的优势,使其通过少量的光纤就可以将大量的传感器连接到测量仪器,非常适合大量传感器应用的场合;在军事领域,光纤干涉仪以其超高的灵敏度,成为先进光纤陀螺仪、光纤水听器的基石;在油气输送、隧道、电缆、铁路等长距离监测领域,分布式光纤温度、应变、振动和声传感器正在承担传统电子类传感器难以胜任的工作。

光纤传感器另外一个优势——耐高温特性,正在被深刻认识,并且已开始深入的研究和广泛应用。光纤的基础材料是 SiO_2 ,纤芯掺锗,因此普通的单模光纤可以长时间耐受超过 700°C 的温度,短时间耐受温度超过 1000°C ,因此完全用光纤做成的传感器耐受温度远远超过了半导体材料制作的传感器(一般小于 170°C)。对于纯石英光纤,耐受温度可以超过 1000°C ,短时间的耐受温度达到 1200°C 。因此在高温环境,尤其是超过 300°C 以上的高温环境,光纤传感器具有天然的优势,在深井油气探测、航空航天、各类发动机测试、高温冶炼与热处理等场合,有其独特的

应用优势。

随着技术的进步和应用的需求,对超过 1000°C ,甚至更高温度环境下的物理量测量也提出了需求,如高超音速飞行器表面的温度、压力测量,发动机尾部的压力、温度、振动、位移测量等,可能工作环境温度超过 1000°C 甚至更高,对传感器的耐高温性能提出了更加苛刻的要求,因此蓝宝石光纤传感器成为解决这类需求的必然选择。蓝宝石材料的熔点超过 2000°C ,以其为基础的全蓝宝石光纤传感器耐受温度超过 1500°C ,成为耐受温度最高的物理传感器。但蓝宝石光纤使用时具有很多困难,如无包层、多模传输、与普通光纤连接困难、长度短、价格昂贵等,因此在工程应用上,蓝宝石光纤传感器还有很多有待研究的地方。

由于传感器需要在高温环境下工作,需要仔细考虑温度对传感器可靠性造成的影响,以及对测量结果的交叉影响。环境温度很高,在一只传感器中使用不同的材料来制作,就有可能因为材料热膨胀系数的不同造成传感器损坏;同时,如果传感器的尺寸较大,高温使传感器产生的变形就很大,温度的影响就非常显著。因此高温传感器应该尽量使用同一种材料,做成微纳尺寸,这样能够大幅度减小温度的交叉影响,同时提高传感器的耐高温可靠性。

本书总结了作者团队最近 10 年在光纤高温传感器领域的相关研究成果,同时归纳和总结了国内外同行的部分相关研究成果,集结成书。高温光纤传感器主要基于外腔式法布里-珀罗干涉仪(EFPI)结构,这是因为这种传感器结构简单,只需要在光纤末端形成二次反射就可以构成干涉型光纤传感器,特别适合制作高温传感器。对这一传感器的信号解调分为两种:一种是使用光纤白光干涉测量技术的绝对测量,通过测量干涉仪的光程差(比如 EFPI 的腔长)来测量静态或缓变的物理量,如温度、压力、应变、位移;另一种是使用激光干涉测量技术的相对测量,通过测量干涉仪的光程差的变化来测量动态变化的物理量,如振动和声。因此本书内容包括四大部分:第一部分是光纤传感器的信号解调技术,包括第 1 章的光纤白光干涉测量技术,第 2 章的光纤激光干涉测量技术;第二部分是基于石英光纤的 EFPI 高温传感器,包括高温温度、压力、应变、振动这 4 种物理量传感器,包括第 3~6 章;第三部分是为了全书完整性,专门开辟第 7 章来讨论石英光纤布拉格光栅(FBG)高温传感器,这一章内容主要是集结国内外同行的研究成果;第四部分是蓝宝石光纤高温传感器,包括蓝宝石光纤 EFPI 和蓝宝石光纤光栅传感器以及蓝宝石衍生光纤高温传感器,包括第 8~10 章。蓝宝石光纤高温传感器还在发展过程中,很遗憾我们最近的很多研究成果因为出版时间的问题,来不及放进书中。

本书的第 1~6 章由北京理工大学江毅教授负责撰写,博士研究生贾景善、马维一、崔洋、冯新星、张树桓、邓辉参加了这部分内容的撰写和修改工作。第 7~10 章由吉林大学的于永森教授负责撰写,博士研究生陈超、国旗、刘善仁、张轩宇

参加了这部分内容的撰写和修改工作。本书引用了很多国内外同行的研究成果,在此表示感谢,对没有清楚标出的引用来源,请原文作者海涵。

作者感谢清华大学出版社鲁永芳编辑的帮助和支持,使本书得以出版。作者还要感谢国家科学技术学术著作出版基金的资助。本书的研究成果受国家自然科学基金(重点项目 U20B2057,面上项目 61775020、61575021),国家“863”重点项目 2015AA043504,国家重大基础研究计划(2018YFB1107202),装备研究基金及航空基金等的支持,在此一并感谢。

本书彩图请扫二维码观看。



江毅 于永森

2022 年元旦

清华大学出版社

目 录

第 1 章 光谱域光纤白光干涉测量技术	1
1.1 技术背景	1
1.2 光程扫描式光纤白光干涉测量技术	2
1.3 光谱获取技术	5
1.4 光谱域光纤白光干涉测量技术	16
1.5 峰值探测白光干涉测量技术	19
1.6 双波长干涉级次白光干涉测量技术	20
1.7 傅里叶变换白光干涉测量技术	21
1.8 波长扫描白光干涉测量技术	31
1.9 相移光纤白光干涉测量技术	41
1.10 波数域傅里叶变换光纤白光干涉测量技术	42
1.11 互相关白光干涉测量技术	43
1.12 步进相移白光干涉测量技术	45
1.13 本章小结	47
参考文献	48
第 2 章 光纤激光干涉测量技术	50
2.1 引言	50
2.2 正交工作点直接解调法	51
2.2.1 正交工作点直接测量法基本原理	51
2.2.2 正交工作点的补偿技术	52
2.3 双波长正交解调法及相位补偿技术	55
2.3.1 双波长正交解调法基本原理	55
2.3.2 双波长正交解调法的相位补偿技术	57

2.4	直流补偿双波长干涉解调技术	59
2.5	三波长激光干涉被动解调技术	65
2.6	光纤激光干涉型传感器的移相解调法	71
2.7	本章小结	75
	参考文献	75
第3章	石英光纤 F-P 高温温度传感器	77
3.1	引言	77
3.2	国内外研究现状	78
3.3	石英光纤 F-P 高温温度传感器	79
3.3.1	光纤 F-P 高温温度传感器的结构及测量原理	79
3.3.2	石英光纤本征型 F-P 干涉型高温温度传感器	81
3.3.3	石英光纤外腔型 F-P 干涉型高温温度传感器	85
3.3.4	石英光纤 F-P 薄膜干涉式高温温度传感器	87
3.3.5	石英光纤偏芯熔接式高温温度传感器	90
3.3.6	石英光纤凹型 F-P 式高温温度传感器	92
3.4	超高温下石英光纤主要物理参数的实验测量	94
3.4.1	光纤 EFPI 及光纤热膨胀系数的测量	94
3.4.2	光纤 IFPI 及光纤热光系数的测量	98
3.5	光纤 F-P 高温温度传感器实验验证	104
3.5.1	光纤 F-P 高温温度传感器的测量原理	104
3.5.2	光纤 F-P 高温温度传感器的测量实验	105
3.6	石英光纤 F-P 高温温度传感器在引信桥丝中的工程应用	107
3.6.1	光纤 F-P 高温温度传感器在引信桥丝的应用背景	107
3.6.2	光纤 F-P 高温温度传感器的高速信号解调技术	108
3.6.3	光纤 F-P 高温温度传感器在引信桥丝的测量实验	111
3.7	本章小结	115
	参考文献	116
第4章	石英光纤 F-P 高温压力传感器	118
4.1	引言	118
4.2	高温压力传感器研究背景	119

4.2.1	高温压力传感器分类	119
4.2.2	光纤高温压力传感器	122
4.3	光纤玻璃管式 F-P 高温压力传感器	128
4.3.1	石英玻璃特性及加工方法	128
4.3.2	光纤玻璃管式 F-P 压力传感器的加工制作	131
4.3.3	小结	134
4.4	全光纤 F-P 高温压力传感器	135
4.4.1	膜片式 F-P 压力传感器传感原理	135
4.4.2	无膜片式 F-P 压力传感器传感原理	136
4.4.3	全光纤 F-P 高温压力传感器	137
4.4.4	全光纤 F-P 高温压力传感器加工技术问题和注意事项	149
4.5	光纤高温 F-P 温度/压力复合传感器	150
4.5.1	光纤复合 FPI 的基本原理及解调	151
4.5.2	膜片式光纤 F-P 高温温度/压力复合传感器	156
4.5.3	无膜片式光纤 F-P 高温温度/压力复合传感器	163
4.6	光纤 MEMS 压力传感器	173
4.6.1	概述	173
4.6.2	光纤 MEMS 压力传感器加工工艺	175
4.6.3	基于光纤准直器的高精细度光纤 MEMS 压力传感器	178
4.6.4	温度交叉敏感问题	183
4.7	本章小结	183
	参考文献	184
第 5 章	石英光纤 F-P 高温应变传感器	188
5.1	引言	188
5.2	石英光纤 F-P 高温应变传感器	189
5.2.1	光纤 F-P 应变测量原理	189
5.2.2	常规光纤 EFPI 高温应变传感器	191
5.2.3	气泡式光纤 F-P 应变传感器	193
5.2.4	偏芯熔接式光纤 F-P 应变传感器	196
5.2.5	插入悬臂式光纤 F-P 应变传感器	199
5.2.6	非空气腔的高温 F-P 应变传感器	201
5.3	高温 F-P 应变传感器的性能校准及应用	203

5.3.1	传感器基本特性的测试	203
5.3.2	光纤 EFPI 高温应变传感器的温度补偿	210
5.3.3	高温应变传感器的工程应用	213
5.4	本章小结	214
	参考文献	215
第 6 章	石英光纤 F-P 高温振动传感器	217
6.1	引言	217
6.2	光纤振动传感器的研究进展	218
6.3	光纤振动传感器的传感原理	220
6.3.1	EFPI 传感器原理	221
6.3.2	悬臂梁结构及原理	222
6.3.3	简支梁结构及原理	223
6.3.4	EFPI 振动传感器的模型	224
6.4	光纤高温振动传感器的研究	228
6.4.1	全光纤结构的径向加速度测量的光纤振动传感器	228
6.4.2	全石英结构的轴向加速度测量的光纤振动传感器	235
6.4.3	全光纤结构的轴向加速度光纤振动传感器	240
6.5	本章小结	245
	参考文献	246
第 7 章	石英 FBG 高温传感器	248
7.1	引言	248
7.2	FBG 高温传感器的制备	249
7.2.1	再生光栅的 FBG 高温传感器	250
7.2.2	飞秒激光写入的 FBG 高温传感器	255
7.3	FBG 高温传感器	261
7.3.1	FBG 高温应变传感器	261
7.3.2	FBG 高温温度传感器	264
7.3.3	FBG 高温压力传感器	267
7.4	FBG 高温传感器的工程应用	269
7.4.1	石油井内的压力与温度测量	270

7.4.2 航空航天的应变和温度测量	272
7.5 本章小结	275
参考文献	275
第 8 章 蓝宝石光纤高温传感器	278
8.1 背景	278
8.2 蓝宝石光纤传感器的分类	282
8.2.1 热辐射型蓝宝石光纤传感器	282
8.2.2 干涉型蓝宝石光纤传感器	287
8.2.3 蓝宝石光纤光栅传感器	294
8.2.4 基于散射信号的分布式蓝宝石光纤传感器	303
8.3 本章小结	306
参考文献	308
第 9 章 单晶蓝宝石光纤布拉格光栅及应用	315
9.1 引言	315
9.2 单晶蓝宝石光纤布拉格光栅基本原理	316
9.2.1 光学模式及多模激励特性	316
9.2.2 多模布拉格谐振特性	317
9.3 单晶蓝宝石光纤布拉格光栅制备	318
9.3.1 金刚石刀片雕刻方法	318
9.3.2 等离子体刻蚀方法	318
9.3.3 飞秒激光相位掩模刻写方法	319
9.3.4 飞秒激光 Talbot 双光束干涉刻写方法	321
9.3.5 飞秒激光逐点刻写方法	323
9.3.6 飞秒激光逐线刻写方法	325
9.4 布拉格谐振的反射率和带宽调控	327
9.4.1 增加折射率调制面积提高布拉格谐振反射率	328
9.4.2 降低布拉格谐振带宽	335
9.5 单晶蓝宝石光纤布拉格光栅传感应用	338
9.5.1 传感机制	339
9.5.2 温度和应变传感	339

9.5.3	高温环境的应变传感	340
9.5.4	分布式传感应用	341
9.6	本章小结	344
	参考文献	344
第 10 章 蓝宝石衍生光纤高温传感器		349
10.1	引言	349
10.2	蓝宝石衍生光纤的制备及表征	349
10.3	蓝宝石衍生光纤布拉格光栅的制备及传感特性	351
10.3.1	SDF 布拉格光栅的飞秒激光制备	351
10.3.2	蓝宝石衍生光纤布拉格光栅的传感特性	352
10.4	蓝宝石衍生光纤其他类型传感器	354
10.4.1	蓝宝石衍生光纤法布里-珀罗干涉传感器	354
10.4.2	蓝宝石衍生光纤马赫-曾德尔干涉传感器	356
10.4.3	蓝宝石衍生光纤长周期光栅传感器	358
10.5	本章小结	359
	参考文献	359

第 1 章

光谱域光纤白光干涉测量技术

1.1 技术背景

光纤传感技术已经有 40 余年的发展历程了,各种技术已经相继成熟并走向工程应用。点式光纤传感器按照调制方式的不同分为强度调制型、干涉调制型、波长调制型和偏振调制型。强度调制型的光纤传感器抗干扰能力差,需要采取各种技术来克服外界其他物理量和环境的干扰,而干涉型、波长型和偏振型的光纤传感器并不直接调制光功率。此外,几乎所有的光纤传感器都需要对传感器的信号进行解调。

因此光纤传感技术的研究分为两大类:传感器技术和解调技术。点式光纤传感器以光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG)传感器和非本征型法布里-珀罗干涉型传感器(也称为外腔式法布里-珀罗干涉仪,extrinsic Fabry-Perot interferometer,EFPI)最具代表意义,获得最广泛的工程应用。对这两类传感器的信号解调又可以大致分为相对测量和绝对测量两种。一般认为相对测量适合测量高频动态信号,绝对测量适合测量低频静态信号,但随着最新应用需求和技术的发展,高速绝对测量技术已经成为技术发展的前沿。

对于 FBG 传感器而言,相对测量是获得 FBG 波长的变化量 $\Delta\lambda$,适合用于测量振动、声一类信号,并不关心 FBG 的绝对波长;绝对测量需要测量出 FBG 的波长,通过 FBG 的波长,就可以得到被测缓变或静态物理量,如温度、应变、压力、位移等。对于 EFPI,相对测量获取的是法布里-珀罗(Fabry-Perot,F-P)腔的腔长的变化量,使用激光干涉测量技术,一般用于测量振动、声,或者是从一个时间到另一个时间内光程差的连续变化,这部分内容将在第 2 章讨论;绝对测量获取的是干

涉仪的绝对光程差,使用白光干涉测量,可以测量缓变或静止变化的物理量,如距离、温度、应变、折射率等参数,这部分内容将在本章讨论。

光纤中的 FBG 和 EFPI 这两种传感器(有点像电路里面的电阻和电容的对应关系)虽然一个是波长调制型,另一个是相位调制型,但在绝对测量时都可以具有相同的解调硬件系统,即通过扫描传感器的光谱获得被测物理量。对于 FBG 来说,扫描光谱后可以直接得到 FBG 的反射波长。对于 EFPI 来说,扫描光谱后还需要根据干涉仪的白光光谱获得干涉仪的光程差,即 EFPI 的腔长,才能真正得到被测物理量。因此通过白光光谱来获得被测 EFPI 的腔长成为一门重要的技术,即光纤白光干涉测量术(white light interferometry, WLI)。

由于 EFPI 既可以由两根光纤的端面对准后形成传感器,也可以由一根光纤端面与另一个反射面组成,测量光纤出光端面与反射面之间的距离,所以光纤白光干涉测量技术除了应用于光纤传感领域,还可以应用于微小距离的测量,结合扫描装置,就可以构成纳米精度的三维面形测量系统,能够用于微纳器件的面形测量中。

光纤白光干涉测量又分为光程扫描白光干涉测量和光谱扫描白光干涉测量。传统上的光程扫描白光干涉测量需要一套机械装置来扫描光程,在一个干涉仪(传感干涉仪)的光程差为零,或两个干涉仪(传感干涉仪和补偿干涉仪)的光程差相等时出现干涉条纹最大值。但这种技术很明显的缺点是精度低、测量速度慢、体积大、稳定性差。通过测量光谱来测量干涉仪光程差称为光谱域白光干涉测量技术,即通过测量干涉仪的输出光谱就可以测量出干涉仪的光程差。这一技术最显著的优点是系统中没有机械扫描装置,从而稳定性、可靠性、测量精度、测量速度有了极大的提高。

高温光纤传感器测量原理以干涉型的光纤传感器和高温光纤光栅传感器为主,其中干涉型光纤传感器由于传感器结构灵活、可以测量的物理量多而备受关注。干涉型光纤高温传感器的测量对象主要包括温度、压力、应变、位移、振动等,除了振动信号的测量主要使用光纤激光干涉测量技术,其他物理量都使用光纤白光干涉测量技术。因此本章专门讨论光纤白光干涉测量技术,这是光纤高温法珀传感器信号解调的技术基础。

1.2 光程扫描式光纤白光干涉测量技术

传统的光程扫描式白光干涉测量需要一套机械扫描式接收干涉仪,在测量系统的接收端扫描传感干涉仪的光程差(OPD),如图 1.2.1 所示。光程扫描式白光干涉测量系统使用的是宽带光源。两束光波发生干涉的基本条件为:频率相同,

振动方向相同和相位差恒定；此外，这两束光波的光程差还要小于光源的相干长度。光源的相干长度由其线宽决定。线宽有两种表述方法： $\Delta\lambda$ （波长宽度）和 $\Delta\nu$ （频率宽度）。光子寿命 $\tau = 1/\Delta\nu$ ，光源的相干长度 $L_c = c\tau = c/\Delta\nu$ （ c 为光速）。波长和频率的关系为 $\lambda = c/\nu$ ，因此频率宽度和波长宽度的关系为

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (1.2.1)$$

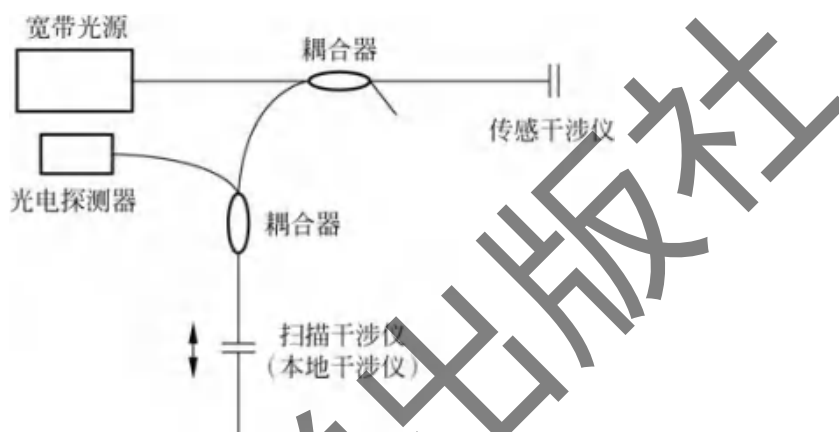


图 1.2.1 光程扫描式白光干涉测量系统

光源的相干长度也可以表示为

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1.2.2)$$

光源的相干长度与线宽成反比，线宽越宽，则相干长度越短。因此，当使用宽带光源时，本地接收干涉仪和传感干涉仪的光程差必须相匹配，只有当它们之间的差小于光源的相干长度 L_c 时，光电探测器才会有干涉信号输出。调节本地接收干涉仪的光程差，当接收干涉仪和传感干涉仪的光程差相等时干涉条纹出现最大值，如图 1.2.2 所示。光纤传感干涉仪的结构可以是法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot interferometer, FPI)、迈克耳孙干涉仪 (Michelson interferometer, MI)、马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 等。但这种光程扫描系统体积大、测量速度慢、测量精度和分辨率低、可靠性差。这种测量方法的分辨率一般只有几微米，最好的能够达到零点几微米，这主要是受机械扫描装置的稳定性、精度和分辨率的限制。该技术最大的优势是测量的光程差动态范围大，这是由机械扫描装置的扫描距离决定的。

基于菲佐 (Fizeau) 干涉仪的光程扫描白光干涉测量系统是一种电扫描式白光干涉测量，其原理如图 1.2.3 所示。宽带光源经光纤耦合器注入传感 EFPI 干涉仪，而后反射进入透镜组。其中菲佐腔由两个玻璃平面或者楔块构成，使得菲佐干涉仪中不同位置处的光程差不同。透镜组由准直透镜和会聚镜构成，准直透镜对

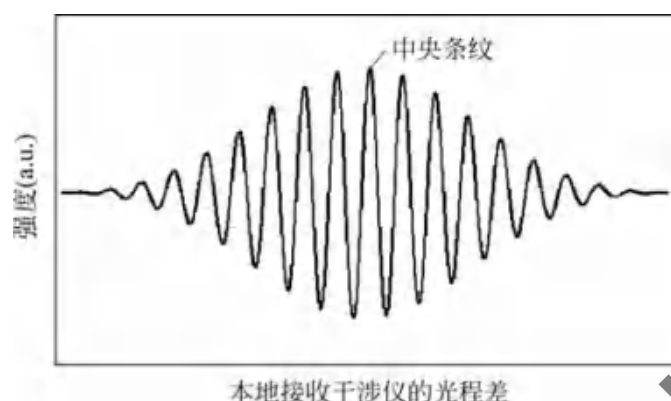


图 1.2.2 本地接收干涉仪的输出光谱

光纤传感器调制后的光信号进行准直,以形成等厚干涉的平行光入射条件,会聚镜把平行光转换为会聚光线以获得足够的光强度。用光电探测器阵列(如线阵电荷耦合器件(CCD))接收菲佐干涉仪对应点的输出光强。可以把楔块菲佐干涉仪看作一个空间分布的 F-P 干涉仪,在不同的位置上有不同的腔长,传感干涉仪的输出光与楔块菲佐干涉仪的输出光相关后注入 CCD 阵列,CCD 阵列的光强对应菲佐干涉仪不同光程差位置处的干涉条纹,这就形成了对传感干涉仪光程差的空间扫描,最大光强点位于菲佐干涉仪与 EFPI 干涉仪腔长相同位置。由空间分布的 F-P 干涉仪代替了传统的机械扫描干涉仪,这也是一种光程扫描技术。这一方法克服了机械扫描速度慢、稳定性差等问题。但是由于受楔块菲佐干涉仪的厚度限制,从而该系统可以测量的光程差动态范围小,同时 CCD 阵列的数量也限制了该系统的测量分辨率。

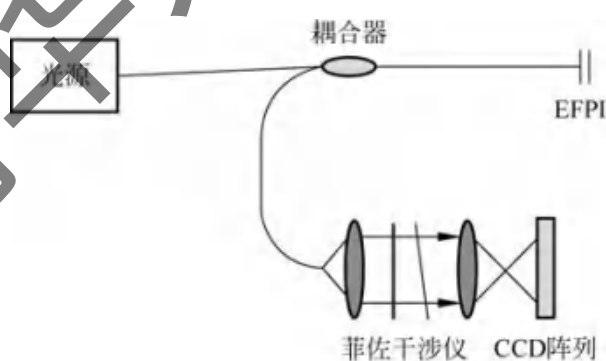


图 1.2.3 基于菲佐干涉仪的白光干涉测量系统

以上两种光程扫描式光纤白光干涉测量系统原理相似,前者使用机械装置扫描传感干涉仪的光程差,后者使用空间分布的干涉仪扫描传感干涉仪的光程差,都是相关解调系统。前者使用机械扫描装置,测量光程差的动态范围大,但是系统的稳定性差。后者无机机械扫描装置,稳定性得到改善,具有长期可靠性,但是测量光

程差的动态范围小,测量精度有限。

1.3 光谱获取技术

光谱域光纤白光干涉测量技术的第一步是要获取干涉仪的白光光谱。用商用的光谱仪测量光谱是一种最直接的方法,但一般商用光谱仪体积大,价格昂贵,并且波长测量分辨率不够高,也不便于仪器化,一般只用于实验室中。目前光纤白光干涉测量技术中获取干涉仪光谱的技术手段与 FBG 解调仪完全一样,主要包括 3 个主流的技术手段: CCD 光谱仪法、扫描可调谐光纤 F-P 滤波器法和扫描半导体激光二极管法。

第一种获取光谱的技术是用 CCD 光谱仪,即用平面光栅衍射后投射到 CCD 线阵来采集光谱。基于 CCD 阵列的光谱仪可以放入测量仪器内部,便于工程化应用。但由于 CCD 的响应波长一般小于 $1.1\mu\text{m}$,与目前主流光纤系统的工作波长 ($1.55\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$) 不符合,所以 $1.55\mu\text{m}$ 的红外 CCD 像元数较少,一般只有 256 个点或者 512 个点。即使是 512 个像素,对于 40nm 的光谱范围,每个像素对应约 80pm 的波长范围,也远大于光谱测量中对 1pm 波长测量分辨率的要求。一个解决的方法是采用插值细分的方法,可以得到大约 1pm 的波长测量分辨率,但这样测量的波长受光谱本身的特性影响大,可能会经常出现数个甚至数十个皮米的波长跳变。基于 CCD 光谱仪的另外一个缺点是不便于复用,实际中采用光开关来切换不同的光纤。基于 CCD 光谱仪的光谱采集技术的优点是采样速度快,甚至可以高达几十千赫兹的扫描速度。CCD 的背景噪声低,可以做到比较大的动态范围。此外 CCD 光谱仪构成的解调系统非常容易实现,对技术人员的要求低。

下面是北京理工大学利用 CCD 光谱仪获取光纤外腔式 F-P 干涉仪光谱的一个实验,其测量系统如图 1.3.1 所示。光源为宽带的非平坦的掺铒光纤(EDF)放大自发辐射(ASE)光源,光源的光谱范围是 $1525\sim 1565\text{nm}$,输出光功率为 20mW ,光源的光谱图如图 1.3.2(a)所示。光源的光经过 2×2 耦合器入射到传感器中,在反射端利用基于线阵 CCD 微型光谱仪(BaySpec FBGA-F-1525-1565)来获取 F-P 干涉仪的干涉光谱,图 1.3.2(b)为获取到的一个 $148\mu\text{m}$ 的传感器的干涉光谱图。受非平坦掺铒光纤放大自发辐射光源轮廓的影响, 1530nm 附近的波峰要明显比其他的波峰强。

为了提高测量的精度,利用样条插值的方法改进微光谱仪的波长分辨率。首先,将干涉仪的光谱采集到计算机中,微光谱仪的 CCD 线性阵列中包含 512 个像素点,覆盖的波长范围为 $1513\sim 1572\text{nm}$,因此该微光谱仪的分辨率为 0.115nm ;另外,该传感器的光谱呈正弦分布,其干涉峰并不锐利,这就增加了确定峰值位置

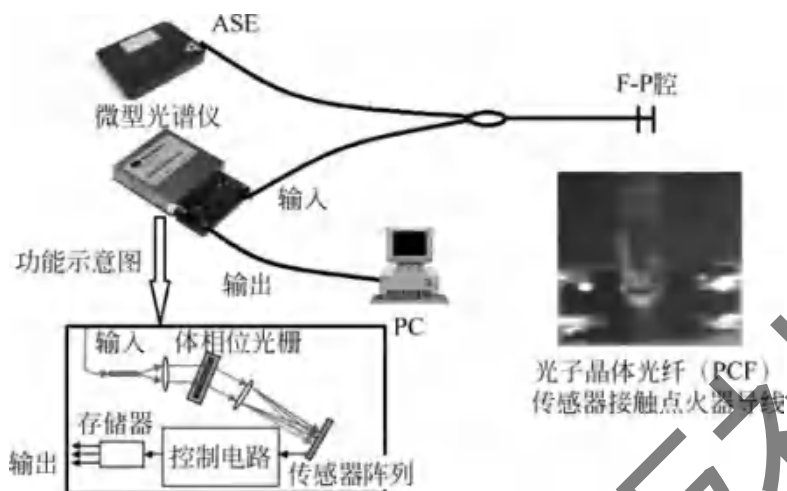


图 1.3.1 利用 CCD 光谱仪获取 F-P 干涉仪光谱的测量系统
(请扫Ⅶ页二维码看彩图)

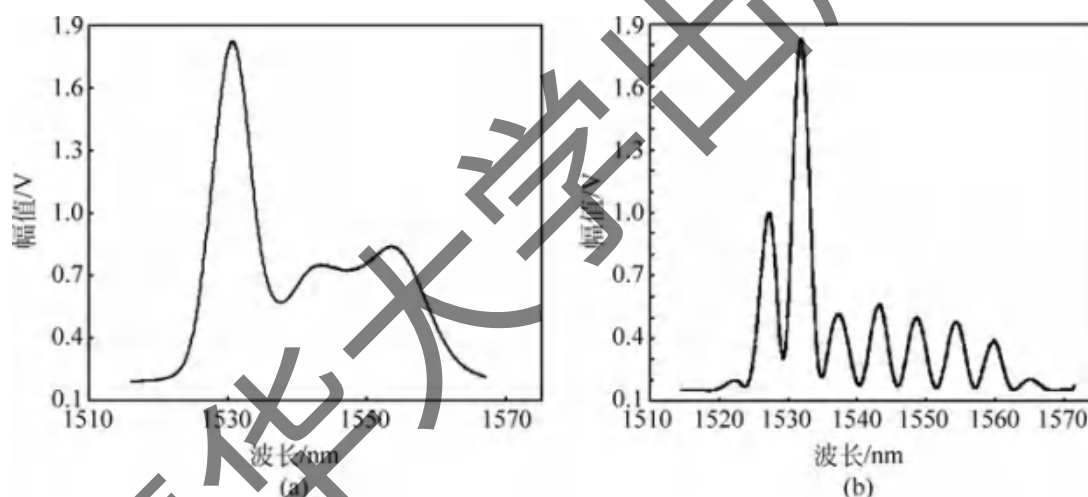


图 1.3.2 CCD 光谱仪获取的光谱图
(a) 光源光谱图；(b) F-P 干涉仪的干涉光谱图

时的不确定性,也就降低了测量的分辨率。在实验中,通过一种细分技术,将 CCD 线性阵列的像素进行细分,该细分技术是基于样条差值的算法进行的。实验结果显示,通过细分的方法可以更加精确地确定峰值波长的位置,从而提高测量的准确性。

将光谱采集到计算机中,对波长对应的像素点进行重采样,重采样的波长间隔设置为 1pm,所以重采样的亚像素的长度为 40000,其对应的波长范围为 1525~1562nm,利用样条差值的方法获得这 40000 个亚像素点的值,最终得到相邻亚像素点之间的波长间隔为 1pm。因此,微光谱仪的波长分辨率由 0.115nm 提高到了 1pm。

提高 CCD 光谱仪波长测量精度亚像元细分的方法如下：对于线阵 CCD 微型光谱仪采集到的包含像元位置信息和光谱功率信息的二维数组，波长校正后，找出所有整数位置 CCD 像元对应的波长值，分别记为 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{m-1}$ ，其中 m 为 CCD 像元总数，波长单位为纳米 (nm)。将所有相邻像元对应的波长作差，即 $\lambda_1 - \lambda_0, \lambda_2 - \lambda_1, \dots, \lambda_{m-1} - \lambda_{m-2}$ ，结果分别记为 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_{m-1}$ ，然后把所有相邻像元相应细分为 $\Delta\lambda_1 \cdot 1000/\text{nm}, \Delta\lambda_2 \cdot 1000/\text{nm}, \dots, \Delta\lambda_{m-1} \cdot 1000/\text{nm}$ ，则相邻像元之间的波长间隔被细分到 1pm，细分后任意像元位置对应的波长为

$$\begin{aligned}\lambda_n &= \lambda_{\lfloor n \rfloor} + (n - \lfloor n \rfloor) \cdot (\lambda_{\lceil n \rceil} - \lambda_{\lfloor n \rfloor}) \cdot (1000/\text{nm}) \times 0.001\text{nm} \\ &= \lambda_{\lfloor n \rfloor} + (n - \lfloor n \rfloor) \cdot \Delta\lambda_{\lfloor n \rfloor} \cdot (1000/\text{nm}) \times 0.001\text{nm}\end{aligned}\quad (1.3.1)$$

其中， n 对应细分后的任意像元位置； λ_n 为对应的波长； $\lambda_{\lceil n \rceil}, \lambda_{\lfloor n \rfloor}$ 分别表示 n 向上、向下取整后像元对应的波长，对应 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{m-1}$ 中两个相邻的波长； $\lfloor n \rfloor$ 表示 n 向下取整， n 可以从线阵 CCD 微型光谱仪采集到的数据中直接读出。

但实际上，在光纤传感器中，我们常常只关心少数几个点的波长信息，因此将上述波长算法应用在 FBG 和 EFPI 的峰值波长测量时，可以进一步简化，只需要找到光谱谱峰在 CCD 像元中对应的位置，再进行波长细分。对于一只 FBG 传感器，只有一个谱峰，先读取谱峰对应的像元位置，记为 m_0 ，然后对 m_0 分别向下、向上取整，结果分别记为 $\lfloor m_0 \rfloor, \lceil m_0 \rceil$ 。通过波长校准，获得 $\lfloor m_0 \rfloor, \lceil m_0 \rceil$ 对应的准确波长值，分别记为 λ_1, λ_2 。则 $\lfloor m_0 \rfloor, \lceil m_0 \rceil$ 两个像元之间的波长间隔为

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (1.3.2)$$

将 $\Delta\lambda$ 细分到 1pm，得出 m_0 像元位置对应的波长

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \lambda_1 + (m_0 - \lfloor m_0 \rfloor) \cdot \Delta\lambda \cdot (1000\text{nm}^{-1}) \times 0.001\text{nm} \\ &= \lambda_1 + (m_0 - \lfloor m_0 \rfloor) \cdot \Delta\lambda\end{aligned}\quad (1.3.3)$$

则可以精确获得光纤光栅的峰值波长。EFPI 传感器由于有多个峰值，所以需要读取更多的谱峰信息，细分同样只对峰值位置进行，这样可以在几乎不降低测量速度的同时提高波长测量分辨率。

用该方法测量了腔长为 $144\mu\text{m}$ 的 EFPI 传感器，同样设置采样频率为 100Hz，采集时间为 60s，采集到的 EFPI 传感器的光谱如图 1.3.3 所示。取 EFPI 传感器反射光谱的第一个峰进行连续波长测量实验，得到的数据如图 1.3.4 所示。图 1.3.4 中的数据显示，测量波长波动为 $\pm 5\text{pm}$ 。温度连续变化时，测量得到的 EFPI 传感器波长和温度的关系曲线如图 1.3.5 所示，当温度从 51.5°C 升高到 64°C 时，该峰波长移动了 105pm ，表明该 EFPI 的温度灵敏度为 $8.4\text{pm}/^\circ\text{C}$ ，则对应的温度分辨率和波动分别为 0.12°C 和 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 。

该线阵 CCD 模块仅有 512 个像元，波长测量范围 59nm，则每个像元对应的波长约为 0.115nm，硬件的波长分辨率只能达到 0.115nm，而作者团队提出的波长测

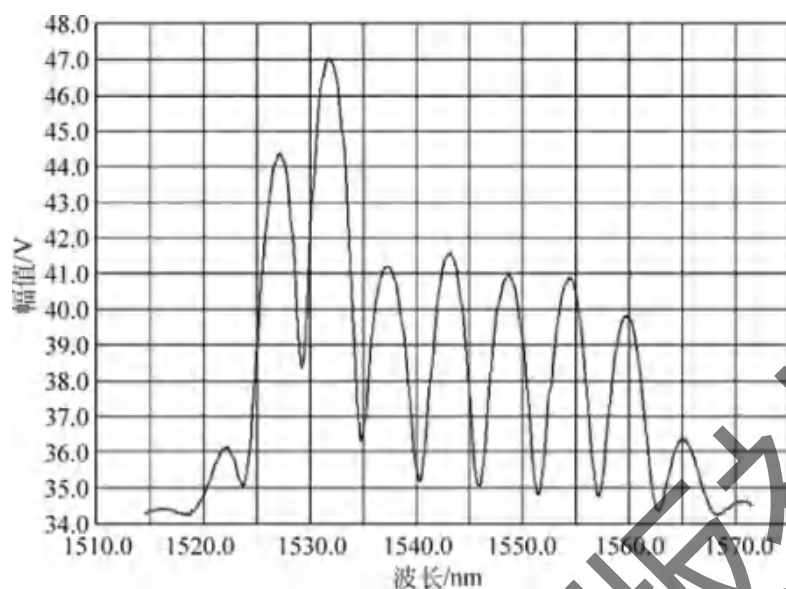


图 1.3.3 EFPI 传感器的反射光谱

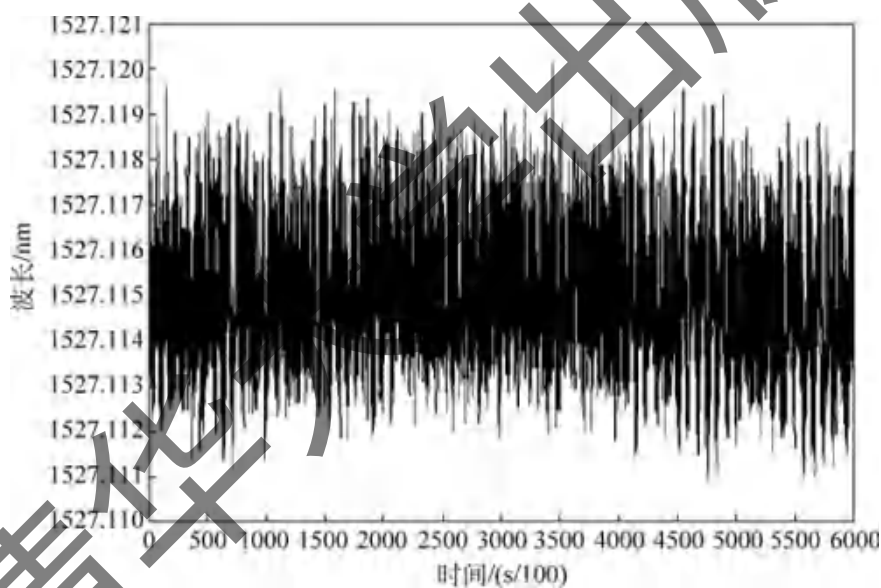


图 1.3.4 EFPI 传感器峰值波长的连续测量

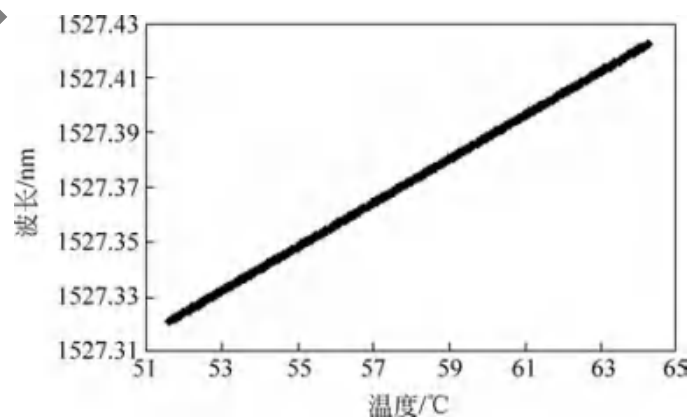


图 1.3.5 EFPI 传感器峰值波长随温度的变化关系

量方法,通过波长测量实验表明,采用新算法的波长测量系统其实际测量光纤光栅波长分辨率达到了 1pm ,测量 $144\mu\text{m}$ 的 EFPI 传感器时,波长波动为 $\pm 5\text{pm}$ 。会发现测量 EFPI 传感器时的波长波动明显比 FBG 传感器的波动要大,主要原因是,FBG 的反射光谱谱峰较锐,测量峰值位置的精度高;而 EFPI 的干涉光谱谱峰则较平坦,判断峰值波长时波动较大。

第二种获取光谱的方法是基于可调谐光纤 F-P 滤波器(fiber Fabry-Perot tunable filter, FFP-TF)的技术。可以在宽带光源的输出后接 FFP-TF,形成波长扫描光,也可以将 FFP-TF 做到激光器里面,形成波长扫描激光器。例如使用作者团队研制的 FFP-TF,线宽 0.12nm ,自由光谱范围(free spectral range, FSR) 80nm ,损耗 1.5dB ,在 1550nm 上对应的相干长度为 20mm ,即能够测量干涉仪的最大光程差为 20mm 。以之为基础开发的可调谐光纤激光器的输出功率超过 10mW ,线宽小于 10pm ,不仅可以测量非常大的光程差,而且由于输出功率高,还便于空分复用多路传感光纤。

图 1.3.6 展示了作者团队研制的高精细度 FFP-TF 的透射光谱,它的自由光谱范围宽,带宽窄。将高精细度的 FFP-TF 接在宽带光源的输出后面,FFP-TF 两端的反射镜固定在压电陶瓷上,利用锯齿波调节施加在压电陶瓷上的驱动电压, F-P 腔长随之发生变化,FFP-TF 的透射波长即发生变化,形成波长扫描光。宽带光源可以是宽带的发光二极管(LED),超辐射发光二极管(SLD)或者掺铒光纤放大自发辐射光源等。也可以直接将 FFP-TF 接入激光器内部结构,形成波长扫描激光器。

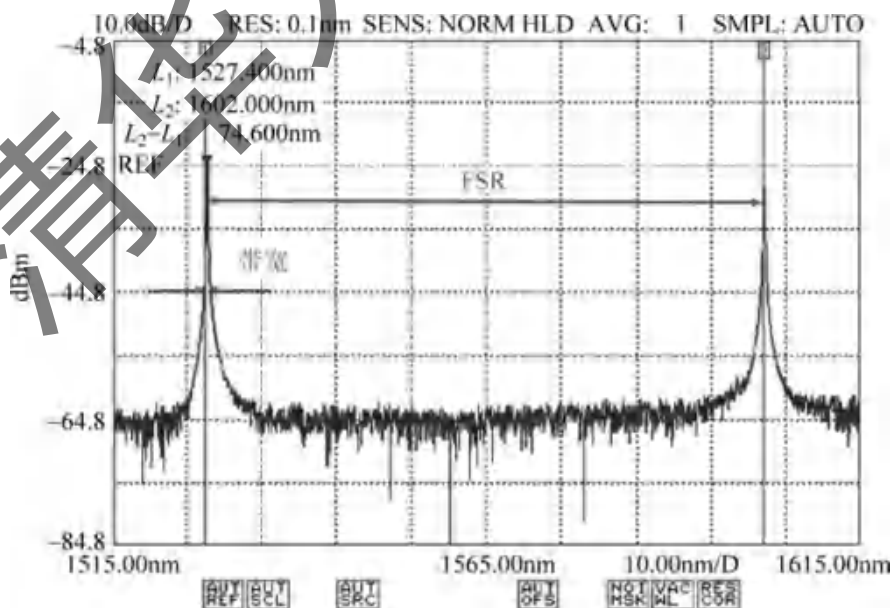


图 1.3.6 高精细度 FFP-TF 的透射光谱

图 1.3.7 是用 FFP-TF 获取白光光谱的原理图,分别用于采集 EFPI、MZI、MI 的光谱。由于 FFP-TF 存在非常大的非线性,且重复性差,从而部分波长扫描光经耦合器分光后进入由标准具和 FBG 组成的波长校正器,对光源的输出波长进行校

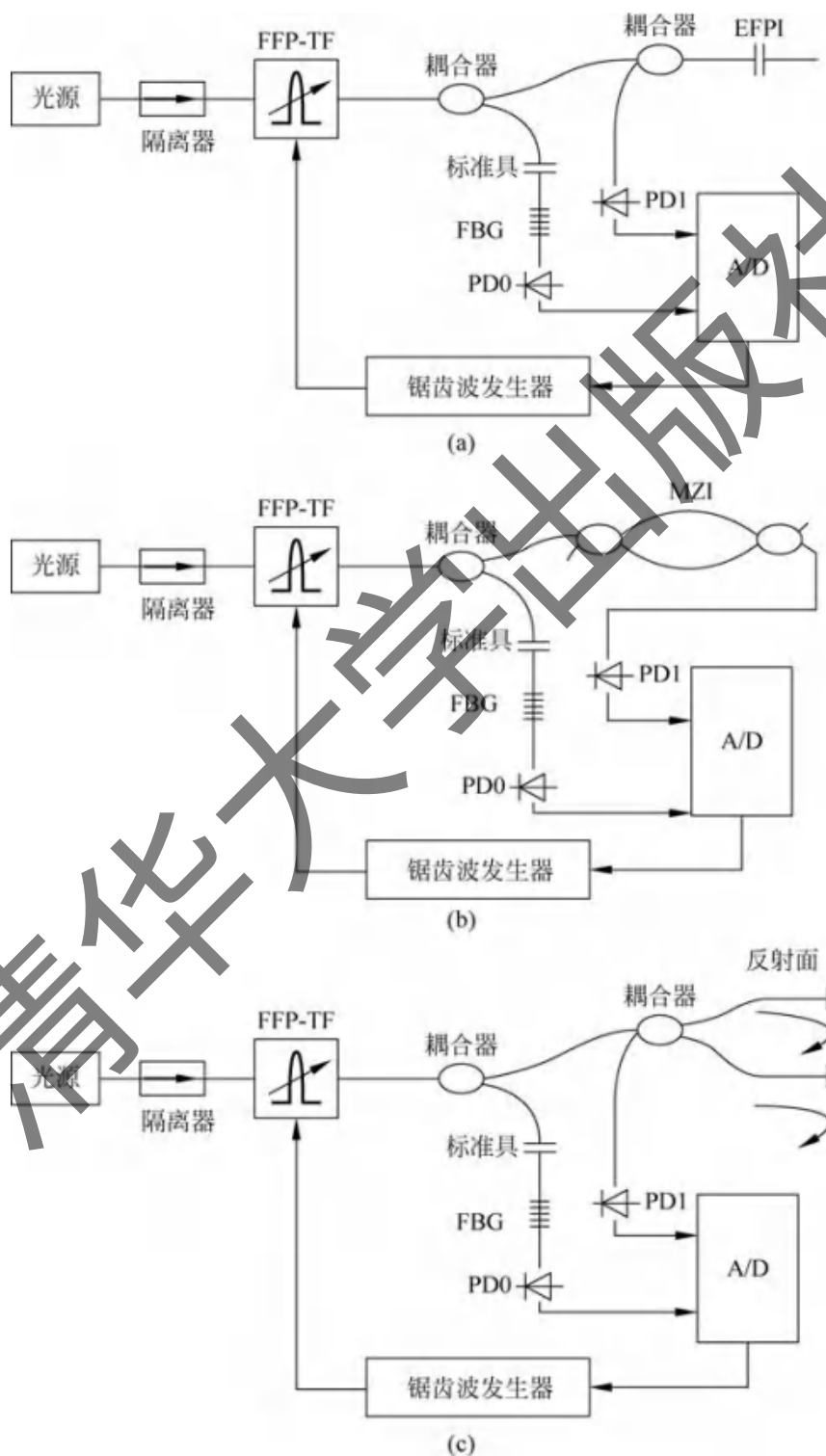


图 1.3.7 基于 FFP-TF 的光纤白光干涉测量系统
(a) EFPI 结构; (b) MZI 结构; (c) MI 结构

正。这种波长获取技术不仅小巧,便于仪器化及多路空分复用,而且能够获得等时间间隔(采样间隔)、等波长间隔的光谱,这样的一维数据组对于后续的数据处理,如傅里叶变换,非常方便。

由放大自发辐射光源和可调谐 F-P 滤波器构成的波长扫描光源可以直接用作波长扫描激光器,利用光纤 F-P 滤波器作为调谐器件的可调谐光纤激光器结构如图 1.3.8 所示。

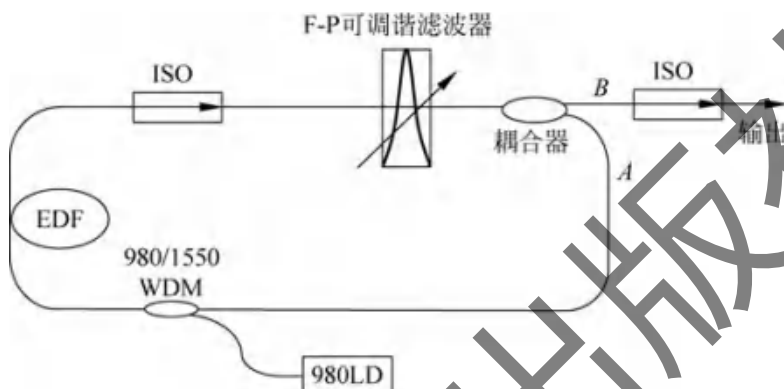


图 1.3.8 基于光纤 F-P 滤波器的可调谐光纤激光器

利用一个 1×2 耦合器构成环形腔,耦合比为 $80 : 20$,其中 80% 作为输出, 20% 与输入臂构成环形腔,泵浦光通过波分复用器(WDM)耦合入掺铒光纤(Er-doped fiber, EDF),腔内隔离器(ISO)确保单向传输,插入的光纤 F-P 可调谐滤波器对其透射波长的光损耗很低,所以在其透射波长上的光可以在腔内起振形成激光输出,而其他非透射波长的光无法起振。通过改变加在光纤 F-P 可调谐滤波器的电压来改变 F-P 腔的腔长从而改变它的透射波长,可以实现在 EDF 增益谱内连续可调谐的激光输出。F-P 滤波器的自由光谱区为 110nm ,透射峰半峰全宽(FWHM)为 0.2nm ,调谐范围可以覆盖整个掺铒光纤的增益波长,至少有一个透射峰落在增益范围内。掺铒光纤使用 Liekki 公司生产的 Er20-4/125 高掺杂光纤,它在 1530nm 处的吸收峰值为 $(20 \pm 2)\text{dBm/m}$, 1550nm 处模场直径为 $(6.5 \pm 0.5)\mu\text{m}$,截止波长为 $800 \sim 980\text{nm}$,长度为 5m 。

我们利用上述结构获得了 $1515 \sim 1610\text{nm}$ 范围内连续可调谐的激光输出,泵浦功率约 200mW ,因为 EDF 增益谱不平坦,所以输出功率在不同波长上不同,输出功率大于 5mW 。

图 1.3.9 和图 1.3.10 分别为 0.5nm 范围 0.01nm 分辨率和 80nm 范围 0.1nm 分辨率下三个波长上的调谐光谱。从光谱图中可以观察到,激光的线宽小于光谱仪的分辨率 0.01nm ,远远小于 F-P 滤波器 0.2nm 的透射峰半峰全宽。由于环形腔腔长较长,从而在 F-P 滤波器透射峰的 0.2nm 范围内,对应谐振腔内很多个纵模。由于 F-P 腔的透过率约为 70% ,插入损耗相对较小,基于激光增益大于损耗的起振条件,则只有在滤波器透射峰中心附近,损耗最低的几个纵模增益高

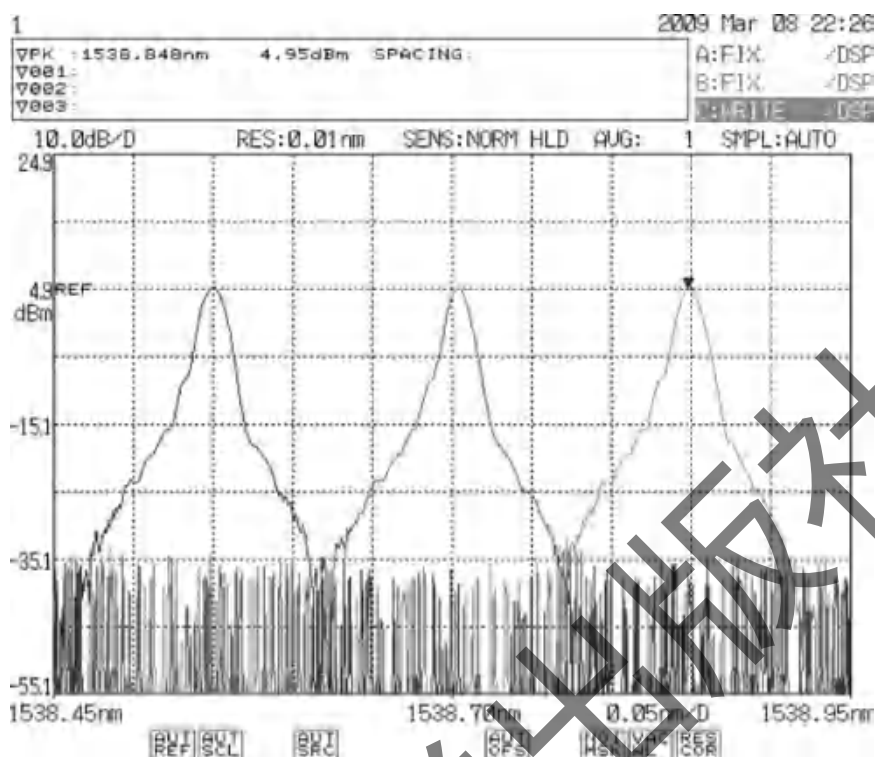


图 1.3.9 0.5nm 范围调谐光谱
(请扫二维码看彩图)

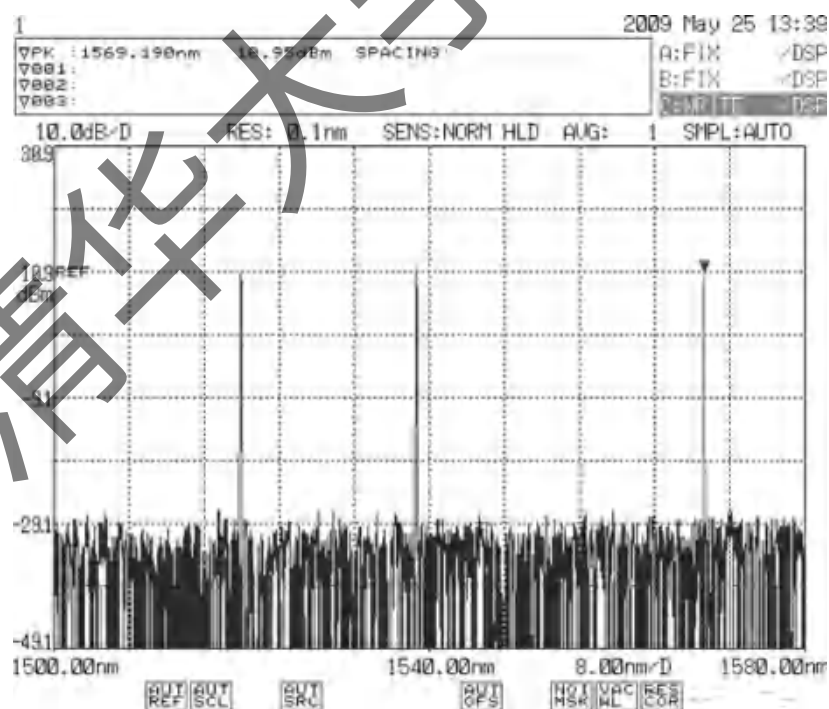


图 1.3.10 80nm 范围调谐光谱
(请扫二维码看彩图)

于起振阈值。在 F-P 滤波器透射峰的 0.2nm 范围内增益谱线应主要考虑均匀加宽因素,即在该 0.2nm 波长范围内,具体每个纵模上的受激辐射效应对于上能级的每个粒子都是等同的,每个纵模的振荡都会使各个纵模的增益共同下降,相邻纵模间存在竞争的效应,最后只应在透射峰附近的一个纵模维持振荡。由于光纤中偏振态的变化,则可能会在透射峰中心频率附近形成多模振荡,但输出激光的线宽远小于 F-P 滤波器的透射峰半峰全宽。

在 FFP-TF 内部,使用了压电驱动器(PZT)作为波长调谐的驱动器。由于 PZT 有很大的迟滞效应,所以用 FFP-TF 扫描 EFPI 时,光谱图中每个采样点所对应的波长间隔并不相等,在确定两个相位相差 2π 的峰-峰值间的波长间隔时,在不同波长上测量出的 EFPI 腔长有很大的差异。因此需要使用标准具来对 FFP-TF 的扫描光进行波长校正。校正前采集到的白光光谱原始信号如图 1.3.11(a)所示,横坐标是采样序号,是一个等时间采样序列。图 1.3.11(b)是标准具的输出信号,用来对 WPI 光谱信号的波长进行校正。经过波长校正后,所得到的白光光谱沿波长方向等间隔采样,是一个等波长采样序列,如图 1.3.11(c)所示。波长范围是由激光器的扫描范围决定的,采样间隔为 1pm。

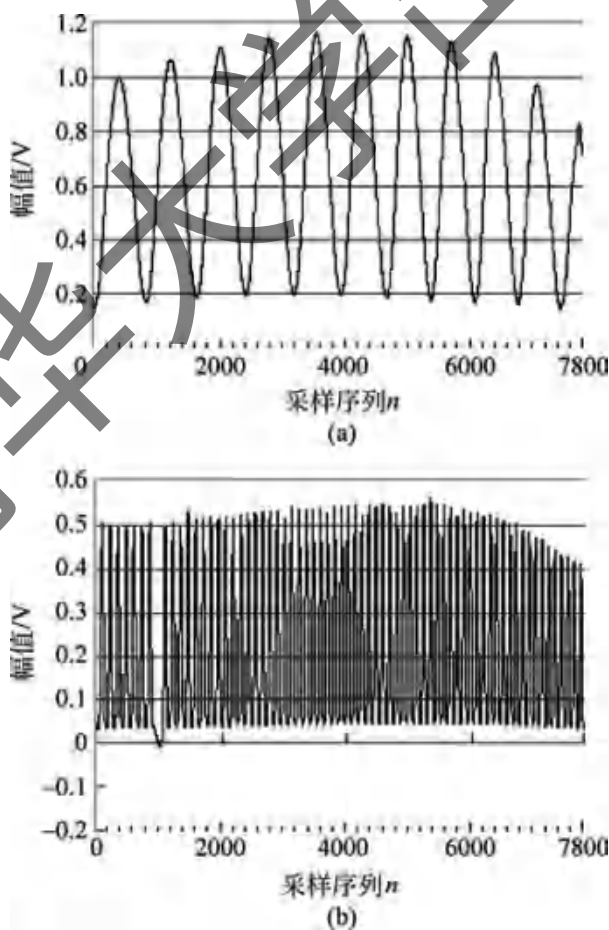


图 1.3.11 光谱获取过程

(a) 干涉仪输出原始信号; (b) 标准具输出原始信号; (c) 校正后的干涉仪输出光谱

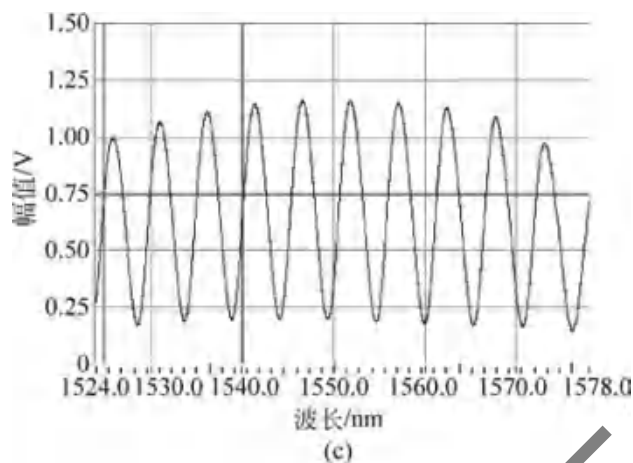


图 1.3.11 (续)

图 1.3.12 分别给出了用光谱仪采集的光谱和用图 1.3.11 所示方法采集的另外一只 EFPI 干涉仪的光谱,可见两个光谱是一样的。

图 1.3.13 为北京理工大学自主研发的多功能光纤传感测量仪,可同时用于 FBG 和 FPI 等干涉型光纤传感器的测量,且可多通道同时测量。目前已经研制出 16 通道,每通道扫描速度达 2kHz 的高速光纤传感测量仪。

第三种获取光谱的方法是使用可调谐分布式布拉格反射 (DBR) 半导体激光器,通过改变激光器的注入电流而实现波长调谐,将此波长调谐的光注入干涉仪来获取干涉仪的白光光谱。图 1.3.14 是三节 DBR 激光器的动态模型示意图,它由

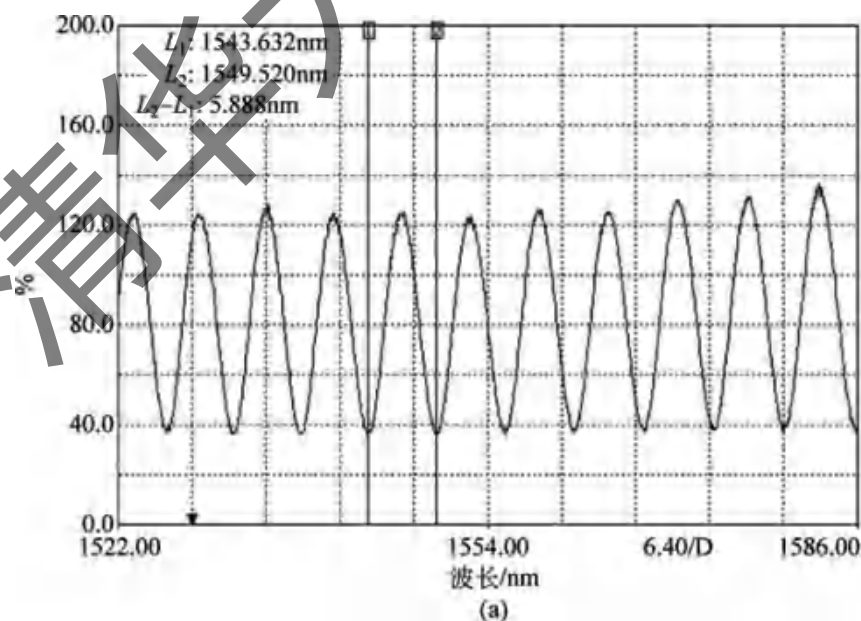


图 1.3.12 EFPI 干涉光谱

(a) 光谱仪 AQ6317C 采集的归一化光谱; (b) 扫描 FFP-TF 方案采集的光谱