

分类号_____

学号 M201072699_____

学校代码 10487_____

密级_____

華中科技大學

硕士学位论文

折射率、温度及故障定位新型 光纤传感技术研究

学位申请人： 解振海

学科专业： 光学工程

指导教师： 夏 历 副教授

答辩日期： 2013. 1. 19

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Research on Novel Fiber Sensing
Technologies of Index, Temperature and
Fiber Fault Location**

Candidate : Zhenhai Xie

Major : Optical Engineering

Supervisor : Associate Prof. Li Xia

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P. R. China

January, 2013

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名:

日期: 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 保密□， 在_____年解密后适用本授权书。
不保密□。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名:

日期: 年 月 日

指导教师签名:

日期: 年 月 日

华中科技大学硕士学位论文

摘要

光纤传感器是传感器一个重要的研究方向，光纤传感器具有结构简单、质量轻、易塑形、耐高温、耐腐蚀、抗电磁干扰等优点，而被广泛应用到各个领域当中。现代光纤传感器正向着智能化、微小化及高灵敏性等特点发展，这也意味着光纤传感器在未来生产生活以及科研工作中有更为广泛的应用。

本论文根据文中的主要工作深入分析了光纤传感技术的研究背景以及现状，并阐述了其主要意义。依据工作的不同性质，文中将研究结果分三部分进行相关阐述：

(1) 首先在折射率光纤传感技术研究工作中，证明了载氢光纤熔接气泡的主要损耗是由光纤纤芯微弯曲损耗造成的，并在此基础上提出了一种简易的折射率光纤测量技术。

(2) 其次根据光纤 bragg 光栅 F-P 梳状滤波器一个特性，即 F-P 梳状滤波器窄带通的自由光谱范围是渐变的，提出了一种新的传感解调方法，这种方法基于双波长激光器的拍频技术，实现了在一定温度范围内的温度传感。

(3) 最后文中提出了一种基于半导体光放大器的环腔混沌光源，这种环腔光源取消了滤波器、光隔离器等常用的光纤激光器无源器件，降低了系统的复杂性及费用，并产生了性能良好的光混沌信号，最后我们依据 SOA 环腔混沌光源及混沌光相关技术提出了一种高稳定、高精度的混沌光时域反射仪技术，这种光时域反射仪的光纤故障定位达到 $50\mu\text{m}$ ，稳定在 $\pm 150\mu\text{m}$ 。

关键词：光纤折射率传感 熔接气泡 光纤温度传感 拍频 混沌 相关光时域反射仪

Abstract

The optical fiber sensor is an important research direction of sensor, it has many advantages, such as simple, light, shaping easily, thermostability, corrosion-resisting, immunizing to the electromagnetic interference etc., and it has been widely used in various fields. The development directions of modern fiber sensor are intelligent, miniature and highly sensitive etc., these characteristics mean that the optical fiber sensor will be more widely used in the future.

According to the main job, the paper makes a deep analysis on the research background and situation of the optical fiber sensing technology. The paper will expound the study result by different research fields with three parts,

(1) first of all, proofing that the main loss of the load-hydrogen fiber is the optical fiber core micro bending loss, and putting forward a kind of simple fiber index sensing technology based on the splicing bubble.

(2) Secondly, according to a characteristic of the optical fiber Bragg grating F-P comb filter (FBG-FPF), which is that the free spectral range of the FBG-FPF is changed, we put forward a new sensing demodulation method, which is based on the double wavelength laser beating frequency technology, and realize a fiber temperature sensor in a certain temperature range.

(3) Finally, proposing a kind of chaotic light source based on a SOA ring without filter, isolator, which reduces the system's complexity and cost, and the output chaotic signal has a good performance. Using the chaotic light source based on the SOA ring cavity and the correlation analysis technology, we put forward a kind of high stability, high precision chaotic OTDR, the spatial resolution of the COTDR is 50 μm , and the time stability is + 150 μm .

Key words: fiber RI sensor welding bubble fiber temperature sensor beat frequency chaotic light correlation analysis OTDR

华中科技大学硕士学位论文

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
1 绪论	1
1.1 光纤及光纤传感的发展及特点	1
1.2 国内外研究近况	4
1.3 主要研究内容	7
2 基于光纤微弯曲的折射率传感技术.....	8
2.1 折射率光纤传感技术及光纤损耗	8
2.2 微弯曲折射率传感技术原理	11
2.3 系统结构及实验结果	14
2.4 本章小结	17
3 基于双波长光纤激光器拍频原理的温度传感技术.....	19
3.1 引言	19
3.2 光纤光栅传感器的原理及光纤光栅 F-P 腔的制作	23
3.3 拍频温度传感技术原理	29
3.4 实验结果及分析	31
3.5 本章小结	33
4 基于 SOA 环腔混沌光源的高精度光纤时域计.....	34
4.1 混沌信号相关技术及新型光时域反射仪的研究现状.....	34
4.2 系统结构	39
4.3 实验及结果分析	41
4.4 本章小结	43

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

5 总结与展望	44
致谢	46
参考文献	47
附录 1 攻读硕士学位期间发表论文目录	51

1 绪论

1.1 光纤及光纤传感的发展及特点

自从工业革命之后，世界就一直处于工业化的普及过程中，然而随着二十世纪现代科技技术的快速发展，特别在计算机诞生之后，信息化产业得到爆炸式的成长，现代社会也逐步步入了信息化的时代，不论农业、工业、服务业还是军工、科研，各个领域都与信息日益联系紧密。如果说计算机的发展解决了获得信息的处理问题，那么传感器就解决了信息的获得问题，我们可以想象，如果没有各种传感器对于信息的准确获得，无论对于信息处理技术多么成熟，信息化科技都不会对社会的发展产生多大的影响，所以传感技术对于信息获取的重要性令其在现代文明中有着不可代替的位置。传感器本身可以说是现代科技技术发展与创新的前导，在近年来，随着各个领域科技技术的不断发展，他们对于传感技术的要求也变得越来越高的，为了迎合社会需要，相应的传感技术也向着高灵敏度、高精确性、高稳定性、智能化、微型化和对极限环境的高适应性等特点发展，在这一要求下，各式各样不同原理不同结构的传感器也应运而生，其中光纤传感器以其高灵敏度、高精度、微型化、智能化以及耐高低温、耐腐蚀、对电磁环境免疫、经济等优点在这些传感器当中脱颖而出，受到国内外学者的关注。

从 1966 年，英国华裔科学家高锟在理论上提出了光纤作为光长距离传输距离介质的可行性，随后 1970 年美国康宁公司依据这一原理研制出来第一代低损耗光纤（光纤损耗为 20dB/km），到如今，随着光纤理论的不完善及制造工艺技术的不发展，各种应用于不同环境下的光纤也被推出，如应用于光纤通信系统的 G.651、G.652、G.653、G.654、G.655 等标准光纤，以及掺杂铒、镱等微量元素的掺杂光纤、光纤晶体光纤(PCF)、塑料光纤等应用于特殊情况下的特种光纤。光纤是一种圆柱型一维光波导介质，其结构如图 1-1 所示，光纤从外到内分为涂覆层、包层及纤芯三部分，标准的光纤其直径约为 250 μm ，单模光纤的纤芯直径一般为 9 μm ，多模光纤的纤芯直径为 50 μm 或 62.5 μm ，涂覆层一般为高分子材料（普通的光纤涂覆层材料一般并不耐高温），光纤的包层和纤芯为二氧化硅材料，为了满足光纤波导中传输光可以发生全反射而不会逸出，纤芯的

华中科技大学硕士学位论文

折射率要略高于包层，光纤的包层及纤芯折射率大小一般为 1.45 左右，根据纤芯与包层折射率变化规律，我们可以将光纤分为阶跃型光纤及渐变型光纤。

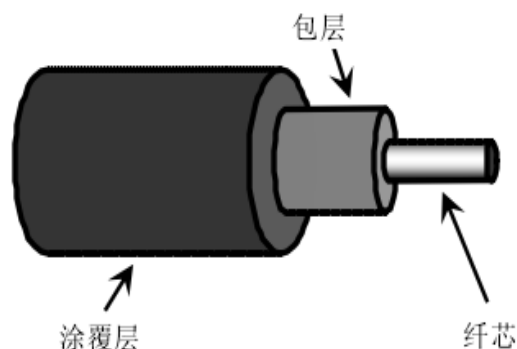


图 1-1 标准波导光纤的结构示意图

光纤作为光波导介质而诞生，但其研制成功不仅为信息的传输提供了一种新的途径，也为专注于传感技术的研究者提供了新的传感技术思路，如在 20 世纪 70 年代，美国的科学家 Charles M. Davis 就接手了一项名为“FOSS 计划”的光纤传感项目，这也成为光纤传感器发展的里程碑。一个典型的光纤传感器是由一个能在光纤中传播的光源、光纤、传感元件和探测器四部分组成，如图 1-2 所示，常用的光纤传感器传感元件一般也是由光纤构成，如光纤光栅、光纤 M-Z 干涉仪等。

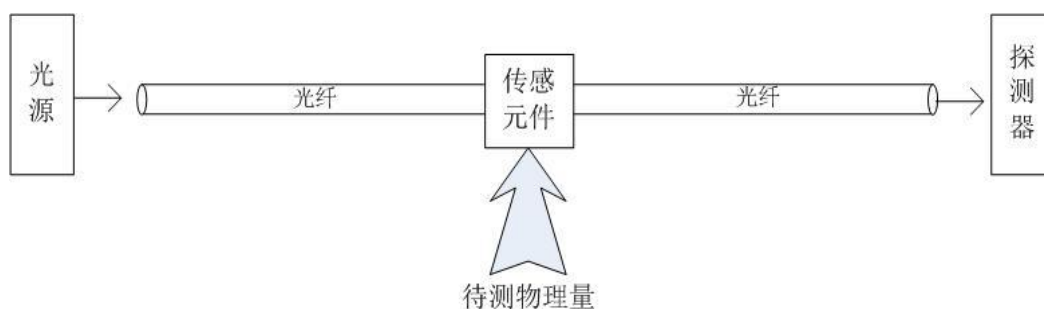


图 1-2 典型光纤传感器传感结构示意图

光纤传感器作为一种近几十年发展起来的新兴传感器，其与传统的传感器相比有许多独特的优点，其主要的特点有：

(1) 结构简单、质量轻、体积小、具有一定的柔韧性。依据光纤作为传感单元的光纤传感器可以根据不同的环境制作成不同的形状，适合应用于空间狭小或比较复杂的传感环境。

(2) 成本低，制作材料取之不尽。光纤的主要制作材料是二氧化硅，而这种材料在

华中科技大学硕士学位论文

世界上广泛分布，可以说是取之不尽用之不竭的，光纤相对于铜、铁等传统的材料来说非常经济且不会对环境造成太大损害。

(3) 可以探测的物理量多，其中对于许多物理量光纤传感器具有独特优势，而光纤传感器的灵敏度和稳定性都很好。经过几十年的研究，目前可以探测的物理量有几十种，可以说几乎分布不同的领域，如温度、应力、PH 值，湿度、特殊气体、电磁场、声音、加速度、流量、浓度计、震动等。

(4) 可以实时在线传感，并能形成网络，实现准分布及分布式光纤传感。光纤作为一种即时通信的信息传输介质，在作为传感器的时候同样也能将信息即时传达到探测器上，这也成为光纤传感器实时在线功能的基础，特别的，光纤传感器与光纤通信网络有着高度的兼容性，这让光纤遥测传感提供了可能性，近些年出现的结合光纤传感器技术的物联网系统就是集成了互联网的优势而成为光纤大范围分布式传感的重要支撑。

(5) 光纤具有耐高温、抗腐蚀、对电磁干扰免疫、工作频带宽、易塑性且其本身绝缘的优点，光纤传感器是以光纤为基础研制，所以光纤传感器也同样具有上述优点。这些优点使得光纤传感器在高温、易爆、强磁场等极限环境中成为一种安全可靠的传感系统。

上述的优点是光纤传感器普遍意义上的优点，在一些特殊情况下光纤也会具有一些特殊的优点，比如在光纤中传输信息时光纤是一种保密安全系数很高的传输介质，相对于电缆而言，其辐射在外的电磁信号十分微小不易探测而成为军工方面一种高保密信息传输工具。

按照光纤传感器构成，我们可以将光纤传感器分为传光型光纤传感器以及功能性光纤传感器：如果在光纤传感器中光纤仅仅是作为传输介质存在，而传感元件是由其他的敏感元件组成，那这种光纤传感器称为传光型光纤传感器；如果在光纤传感器中光纤不仅作为传输介质存在，同样也作为传感元件存在，则我们称这种光纤传感器为功能型光纤传感器。若按照光纤传感器探测的物理量来分类，则我们可以分为温度光纤传感器、应力光纤传感器、PH 值光纤传感器、湿度光纤传感器、乙烷光纤传感器等。若根据光纤传感器中传输光被外界环境信号调制的光学参量来分，可将光纤传感器分

华中科技大学硕士学位论文

为光强度调制型光纤传感器、波长调制型光纤传感器、相位调制型光纤传感器以及偏振态调制型光纤传感器。由此可见，对于光纤传感器的分类是非常多的，但总结近些年来对光纤传感器的研究，其重点主要有两个：一个是光纤陀螺、一个是光纤光栅传感器。光纤陀螺是利用光纤传感技术测量空间惯性转动率的一种新型传感器，其工作原理基于光纤萨格纳克环中产生的萨格纳克效应，在环境稳定的一般情况下，位于光纤环腔中同一点以不同传输方向传输的两束具有相同光学性质的光，在其到达传输点的时间也是一样的，若绕垂直于光纤环腔所在平面的轴线，相对惯性空间存在着转动角速度，则不同方向传播的两束光走过的光程是不同的，由此就会产生光程差，根据光程差与角速度的关系，只要知道光程差相应的相位差，我们就可以得到旋转角速度。光纤陀螺根据其生成机制可以分为干涉型光纤陀螺、环形谐振腔光纤陀螺、受激布里渊散射环形激光陀螺及干涉型光纤陀螺等，对于光纤光栅传感器的研究将会在第三章有详细的叙述，在这里本章将不予赘述。

1.2 国内外研究近况

对于光纤传感器的研究在国内外正呈现出欣欣向上的局面，而不同领域、不同功能、不同原理、不同结构的光纤传感器也如雨后春笋般出现，光纤传感器系统也逐步迈向微型化、智能化、高灵敏、高稳定性的方向发展，因此光纤传感器涉及的领域也越来越广，除了传统的温度、应力等领域的传感研究领域外，光纤传感器可以探测的物理量变得越来越多，对物理量探测的精度也越来越高。为了尽可能的体现出本论文中主要工作的研究背景，本节将重点对光纤折射率传感器、光纤温度传感器等光纤传感领域以及光时域反射仪 OTDR 相关领域近几年发表的研究成果及相关问题做一个粗略的概述。

光纤传感器虽然涉及的原理很多，但光纤光栅无疑是其中重要的一个组成部分，光纤光栅传感器的研究已经持续了几十年，其原理及制作技术也相对成熟，近些年来对光纤光栅传感器研究也重点放在其封装上，例如在 2012 年 P. Saidi Reddy 等人就提出了一种基于双金属悬臂的光纤光栅封装增敏技术，这种封装技术可以较好的提高光纤光栅的温度灵敏度，作者事先将两个长宽相同但温度膨胀系数不同的金属条焊接在一起，并将光纤光栅固定在温度膨胀系数较大的一面，作者从理论及实验上证明了这

种封装方法对光纤光栅温度灵敏度的增益，实验证明这种技术可以有效的将光纤的温度灵敏系数增加 5 倍以上，并且这种封装可以维持很好的传感线性度及可重复性^[1]，其结构如图 1-3 所示。在 2012 年华中科技大学的夏历等人利用光纤布拉格光栅中包层模耦合损耗成功地实现了对温度和微量位移的同时探测，文中作者根据载氢光敏光纤制作出高达 30dB 包层模耦合损耗及 0.1nm 带宽的光纤光栅，并且根据其波长漂移以及耦合损耗的变化得到周围环境的温度变化，如果使用精度可以达到 1pm 的波长解调仪进行解调，这种技术也可以实现精度为 25 微米的位移传感，而对温度的传感灵敏度则可以在 20℃到 120℃的传感范围内达到 0.1℃的传感精度^[2]。

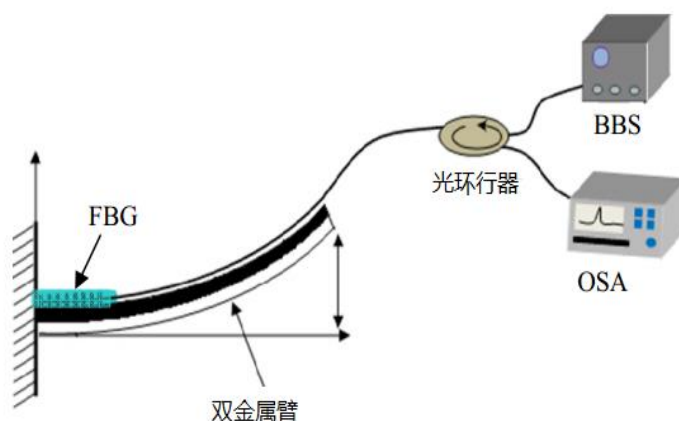


图 1-3 基于双金属臂光纤光栅封装技术的温度传感系统示意图

在 2006 年赵春柳等人利用具有 3° 倾斜角的多模光纤倾斜光栅实现对温度和折射率的同时探测，多模光纤倾斜光栅具有两个多窄带通波长群的光谱图，如图 1-4 所示。

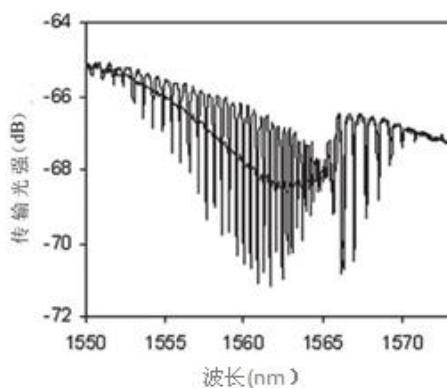


图 1-4 多模光纤倾斜布拉格光栅透射光谱图

华中科技大学硕士学位论文

其中一个波长群是由纤芯模和包层模耦合产生的，其对周围环境的温度和折射率的变化均有一定的敏感性，而另一个波长群是纤芯模和另一个纤芯模耦合产生的，其仅对环境温度的变化有一定的响应，而对周围环境折射率的变化不会产生变化，作者利用多模光纤倾斜布拉格光栅这一特性，并通过对探测到的波长漂移进行解调，最终解决了多模光纤倾斜布拉格光栅了温度及折射率的交叉传感，实现了对温度和折射率的同时探测^[3]。

除利用光纤光栅的传感特性，很多人也对其他的光纤传感原理进行了探究，例如 2012 年天津大学的魏涛等人基于 RF 信号的 M-Z 干涉技术提出了一种新型光纤传感装置，文中作者提出将经 RF 调制的激光入射到光纤 RF-MZI 装置中，而后利用光电探测器 PD 对传感后出射的光信号进行接收，并用网络分析仪对 RF 内的干涉部分进行扫描，实验结果显示这种传感装置可以对温度的变化有线性响应，其灵敏度约为 $-6\text{KHz}/^{\circ}\text{C}$ ^[4]。而在 2003 年 Ainhua Gaston、Ibon Lozano 等人则利用高灵敏且多用途的光纤倏逝波技术实现了对温度、湿度和 PH 值三种物理量的传感，作者在文中提到利用标准单模光纤在基于光纤倏逝波技术的基础上制作了不同结构的三种类型光纤传感，其中光纤温度传感器对温度的灵敏度为 $5\text{dB}/^{\circ}\text{C}$ ，光纤湿度传感器对空气环境湿度灵敏度在 70% 到 90% 湿度有 10dB 的线性变化，光纤酸碱度传感器对 PH 值的灵敏度则实现了在 PH 值在 2 到 11 之间有 15dB 的变化^[5]。

在这里除了对常见光纤传感方式做了相关调研，作者也对最近发表的光时域反射仪 OTDR 进行了调研，光时域反射仪传统的用法一般是用来探测通信光纤中的光纤损耗及光纤断裂、弯曲等常见故障，但一些传感器研究人员也开始利用 OTDR 对光纤损耗的响应来实现对一些物理量的分布式传感，这种想法一经提出就得到了很多学者的响应，并在近些年得到快速发展，基于 OTDR 技术的光纤传感器也常见于相关学术期刊，例如 2008 年渥太华大学的张志义等人发表了一种基于偏振光时域反射仪 P-OTDR 的震动分布式光纤传感器，P-OTDR 是一种在 OTDR 基础上发展起来的、通过检测光纤中信号偏振态的变化来达到分布式光纤传感的一种新型传感技术，文中作者表示没有通过任何数据平均化而在 5KHz 震动频率以上成功实现了长度为 1km 空间分辨率为 10m 的传感^[6]。常见的光时域反射仪是依据光纤中的瑞利散射实现的，但除此之外也有

华中科技大学硕士学位论文

其他原理的光时域反射仪技术被提出，例如布里渊光时域反射仪 BOTDR，而在 2010 年 AT&T 研究所的 J. A. Nage 等人更是利用这种布里渊光时域反射仪对长达 70km 的地下光缆进行了温度与应力的实时监测^[7]。

1.3 主要研究内容

光纤传感技术涉及的领域较为广泛，研究的横向跨度也较大，本论文主要内容是根据所在项目需要而做的相关研究，下文阐述的主要内容根据不同的原理可以分为三个部分，分别是基于载氢光纤熔接气泡的折射率光纤传感器研究、基于双波长光纤激光器拍频技术的光纤温度传感研究以及基于 SOA 环腔混沌光源的混沌光时域反射仪技术研究，三部分工作主要的贡献是：

(1) 在理论及实验上证明了载氢光纤熔接时产生的光纤熔接气泡损耗主要是由光纤熔接气泡部分纤芯微弯曲造成的，并基于此原理提出了一种新型光纤折射率测量方法，这种方法不仅结构简单且十分经济。

(2) 依据光纤光栅 F-P 腔的特性提出了一种新型的温度解调方法，这种方法将光拍频技术引入到光纤传感技术中，并无视多纵模激光拍频产生的多峰影响成功实现了温度的传感。

(3) 依据 SOA 环腔混沌光源及混沌光相干技术提出了一种高精度混沌光时域反射仪技术，这种技术不仅空间分辨率高，且有探测长度长，精度与探测长度无关，稳定性好等优点。

2 基于光纤微弯曲的折射率传感技术

本章将会对载氢单模光纤熔接气泡损耗原理进行深入研究，并在实验及理论上证明了载氢单模光纤熔接气泡带来的损耗主要来自光纤的微弯曲损耗，文章最后依据这一原理提供了一种基于这种气泡损耗测量液体折射率的方法。

2.1 折射率光纤传感技术及光纤损耗

2.1.1 折射率光纤测量法的一般原理及研究现状

折射率 (refractive index, RI) 定义为光从真空入射到介质发生折射时，光线入射角与折射角的正弦之比，又称为介质的绝对折射率。液体折射率是反映液体介质信息的一个重要的物理量，液体折射率的测量在科研、食品安全、化学化工、环境评估和医疗等方面有重要的应用，通过探测液体的折射率我们将液体折射率可以转化成我们需要的物理、化学和生物等参量（如含糖量、盐度、DNA 浓度等），所以对折射率的测量及研究在生活及商业中有着重要的意义。传统的液体介质折射率检测手段主要是利用临界角法（阿贝折射仪）进行的，然而阿贝折射仪有测量范围有限，无法实时在线测量等缺点。折射率传感器的发展一直向简单及实用性发展，特别是一些特殊环境及特殊情况下对折射率传感器有了很高的要求，而由于光纤具有结构简单、体积小、耐高温、耐腐蚀及抗电磁干扰等诸多优点，使得光纤折射率传感器在出现之后就有了长足的发展。近年来国内外的研究者提出了很多基于光纤的折射率测量方法，如光纤光栅检测法^{[8][9]}，表面等离子体检测法^[10]、熔融拉锥光纤法^[11]、马赫-曾德尔干涉法^[12]、F-P 干涉法^[13]等，这些新型的液体折射率测量方法不仅大大拓宽了液体折射率的测量范围和测量方式，也极大的提升了传感的灵敏度，除此之外，一种名为折射近场法的传感技术已经得到广泛应用，这种方法是 W.J.Stewart 在 1977 年提出改进并被 K.I.White^[14] 等人加以应用，这种方法能极大的提高测量的分辨率及可靠性，其原理如下图 2-1 所示，光纤预先放置在匹配液中，匹配液的折射率略高于光纤包层，光纤的断面经过平滑处理，测量光线被一透镜聚焦并进入光纤，射入光纤中的会聚光线可以分为三部分，

一部分进入光进入纤芯在光纤中传播，一部分光以小角度射出成为漏模光，最后一部分则以大角度射出，这一部分光线为纯折射光，光纤外面有一环形 PD 用来接收射出的折射光，而折射光光强分布就能直接说明光纤的折射率分布。这种测量方法分辨率高且可靠，但是市场上以此原理的商用仪器价格一般非常昂贵。

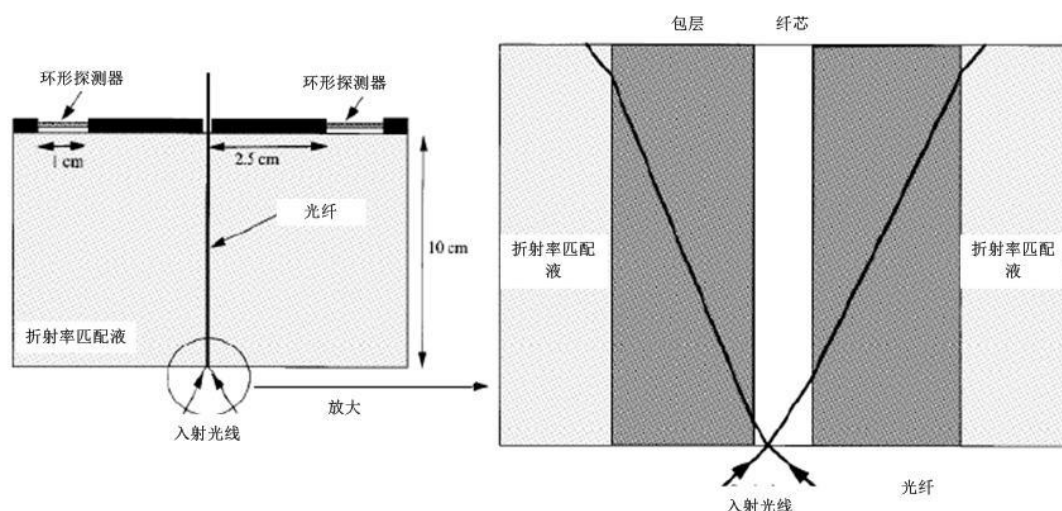


图 2-1 光纤近场法折射率传感原理图

需要指出的是，这些光纤折射率传感方法大部分的检测仪器都较为昂贵，制作方法也比较繁杂，为了增强光纤折射率传感方法的实用性，方便其在商业中的运用，一种简单、实用性强的光纤折射率传感器也迫切需要提出。而本章中提到的基于光纤损耗的方法就是一种结构简单、费用经济的光纤折射率传感技术。

2.1.2 光纤弯曲的损耗原理及应用研究

易弯曲是光纤的重要特性之一，这一特性使得光纤在一些特殊环境及要求下达到很好的应用，然而当光纤的弯曲半径达到一定值（一般的单模光纤约为 5cm 左右）时，弯曲带来的损耗会急剧增加。单模光纤的弯曲损耗是使信号劣化的主要因素之一，在早期许多学者对弯曲损耗进行了大量的理论及实验研究，弯曲损耗的理论及实验研究都趋近成熟，光纤的弯曲损耗有宏弯曲损耗和微弯曲损耗 2 种。当光纤弯曲时，传输光在光纤的弯曲部分中向前传播，传输光要想保持同相位的电磁场在一个平面里，则传导模的平面波前必须以弯曲光纤的曲率中心为旋转中心，所以越靠近波导的外侧，传输光沿光纤轴的纵向速度必须越大，当超过某个临界曲率时，相速度就会大于光纤包

层平面波的相速度，传导模就会变成辐射模，从而引起光纤中传输光束功率的损耗，这就是宏弯曲损耗；微弯曲是指光纤在正常（直的）位置附近以微小偏移做随机振荡，尽管偏移量小（曲率半径可以和光纤的横截面尺寸相比拟），但振荡周期一般也很小，因而可能发生急剧的局部弯曲，这两种光纤的弯曲损耗归根结底是光不满足全内反射条件^[15]。虽然一般情况下我们一般要求光纤传输网络尽量避免光纤弯曲造成的弯曲损耗，但也有学者利用光纤弯曲损耗来测量液体折射率。

1996 年 B.D.GUPTA 等人提出了一种光纤 U 型探针的结构来测量液体折射率的方法，如图 2-2 所示，他们预先将纤芯直径为 200 和 600 微米、NA=0.17 的光纤在高温下（其中直径为 200 μm 的光纤温度为 400-500 $^{\circ}\text{C}$ ，直径为 600 μm 的光纤温度为 700 $^{\circ}\text{C}$ ）弯曲并放入亚甲蓝染料（methylene blue dye）溶解液中，试验光源为波长 632.8nm 的氦氖激光器，最后作者利用光功率计探测了光强在不同折射率溶液下的损耗并作了详细的讨论^[16]。

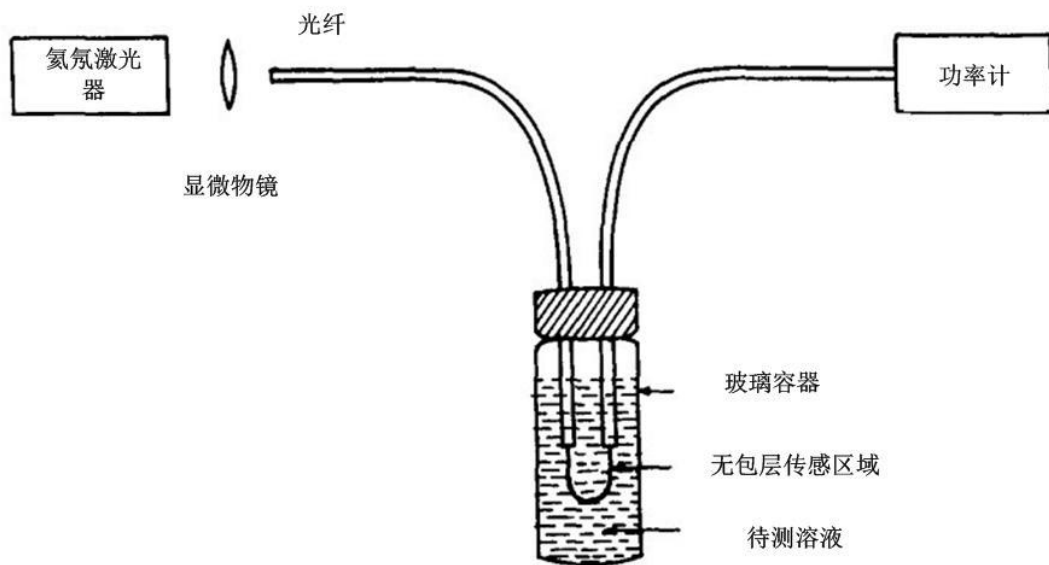


图 2-2 光纤 U 型探针折射率探测试验装置示意图

1982 年 Takashi Takeo 和 Hajime Hattori 将腐蚀过包层的光纤弯曲，并将煤油和轻油作为样本，利用弯曲的光纤光强损耗测量了样本的折射率并证实了实验的可行性^[17]。上述两种结构都是将光纤弯曲部分置于待测液体中，并通过不同折射率液体下光纤中

华中科技大学硕士学位论文

弯曲部分的损耗来测量折射率的大小。从结构上来讲,这种折射率传感系统只有普通光源、光纤及光功率计三个部分组成,这些材料及仪器的购买价格低廉,且由于光纤传感单元制作简单,所以这种检测液体折射率的方法有着系统简易,成本低,并可以实现实时在线检测等突出优点。学者从实验及理论分析方面的研究成果证明当光纤的弯曲半径越小的时候,其对折射率的探测灵敏度就越高,然而光纤的柔韧性是有一定的限制的,当光纤弯曲半径较小时光纤就会被轻易折断,实验中常用的光纤在弯曲到几毫米时就会断裂,这限制了弯曲光纤折射率传感器测量精度的增加,并且由于过长的弯曲长度也会引起非常高的光纤损耗,这些缺陷使得这种结构的研究在近些年没有得到进一步的进行。

2.2 微弯曲折射率传感技术原理

对光敏光纤载氢是试验中常用的光敏光纤增敏方法,这种增敏方法在光纤光栅制作时能明显的增强光纤光栅调制深度,然后不得不注意的是载氢光纤包层中会有很多因载氢产生的小气泡,这些气泡在光传输过程中会引起较强的光纤光传输损耗^[18]。而特别的,我们在熔接载氢光纤时,熔接机的电机在放电瞬间会产生瞬时热效应,瞬间产生的高温会引起载氢光纤气泡的迅速膨胀并最终破坏光纤的结构,因此一般在刻制光纤光之前,我们都会对载氢光纤的熔接端进行预热处理,即用热吹风等加热机将载氢光纤中的微小气泡慢慢溢出,这种加热装置的预热温度一般都不会很高,大约在100℃-300℃之间。

为了研究载氢光纤熔接气泡引起损耗的原因,我们依据气泡可能引起的光纤结构变化提出了两种设想:一是气泡膨胀造成光纤半径变化甚至是折断光纤线芯的连接,这种结构的变化半径改变引起的模场发生变化使得部分光耦合到包层外从而造成损耗,如图 2-3 (a) 所示;二是气泡膨胀使得光纤线芯在气泡内发生明显的弯曲,引起光纤微弯曲损耗,如图 2-3 (b) 所示。

为了验证两种设想的正确性,我们需要两种情况下光纤波导中传输光光强的变化以及其光谱的改变,所以文中我们将会分别模拟光纤半径与损耗的关系曲线和光纤微弯曲情况下包层外液体折射率与光纤损耗的关系曲线及波长与光纤损耗的关系曲线,以实验结果以及理论模拟结果的对比,最后从实验上验证理论解释的正确性,证明了

溶解气泡造成的损耗是由光纤的微弯曲造成的。

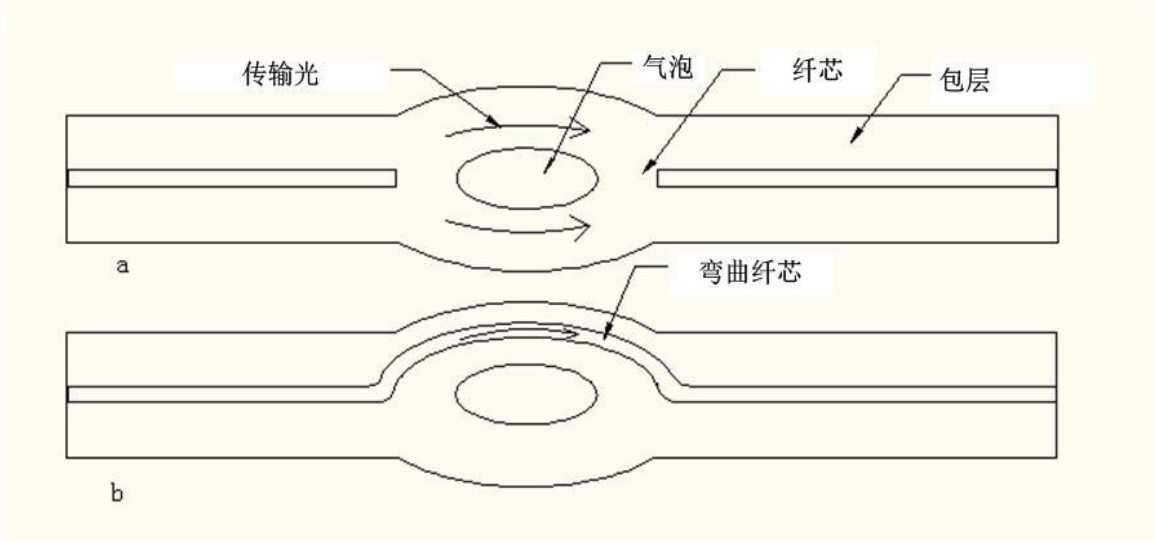


图 2-3 载氢光纤熔接气泡可能引起的两种光纤结构变化。

a 气泡膨胀导致光纤波导结构打断, b 气泡膨胀引起光纤纤芯发生弯曲

2.2.1 光纤半径与损耗

设光纤纤芯和包层的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 半径分别为 a 和 b , 待测溶液是水(折射率 $n=1.3325$)。为了说明传输损耗随光纤半径的关系,建立以下简单模型:将原来光纤的芯层和包层等效成模型的新芯层,而把待测溶液作为模型的新包层。新芯层的折射率可以由原光纤的有效折射率 n_{eff} 来等效,而新包层的折射率即为待测溶液的折射率 n , 为了说明当光纤半径 b 变化时, 芯层所携带的光功率与芯层和包层所携带的光总功率比值如何变化,我们以 LP_{01} 模为例。 LP_{01} 模的模场分布与高斯分布相似, 可以用高斯函数近似代替精确的场表达式, 于是新芯层所携带的光功率占总功率的比值为^[19]

$$\frac{P_c}{P_t} \approx 1 - \exp[-2(\frac{b}{S_0})^2] \quad (2-1)$$

式中 P_c 表示芯层携带的光功率, P_t 表示光总功率, b 表示新芯层半径, S_0 表示新模场半径。对于阶跃折射率光纤, 模场半径与芯层半径存在如下关系

$$S_0^2 = \frac{2b^2}{\ln(2\Delta k_0^2 n_{eff}^2 b^2)} \quad (2-2)$$

式中 $\Delta = \frac{(n_{eff} - n_0)}{n_{eff}}$ 为相对折射率差, 将(2-2)式带入(2-1)式, 并化简得

$$\frac{P_c}{P_t} \approx 1 - \frac{1}{C_1 - C_2} \quad (2-3)$$

式中 $C_1 = 2k_0^2 n_{eff}^2 b^2$, $C_2 = 2k_0^2 n_{eff}^2 b^2$, $k_0 = 2\pi / \lambda$ 。当公式选取 $\lambda = 1.57\mu\text{m}$, $n_{eff} = 1.45$ 时, 我们可以得到损耗随光纤半径变化关系曲线如下图 2-4 所示。结果证明光纤半径大于 $10\mu\text{m}$ 时损耗非常小, 而载氢光纤熔接气泡处的半径要远大于这一值, 这说明气泡膨胀引起的半径变化并不是其带来损耗的主要原因。

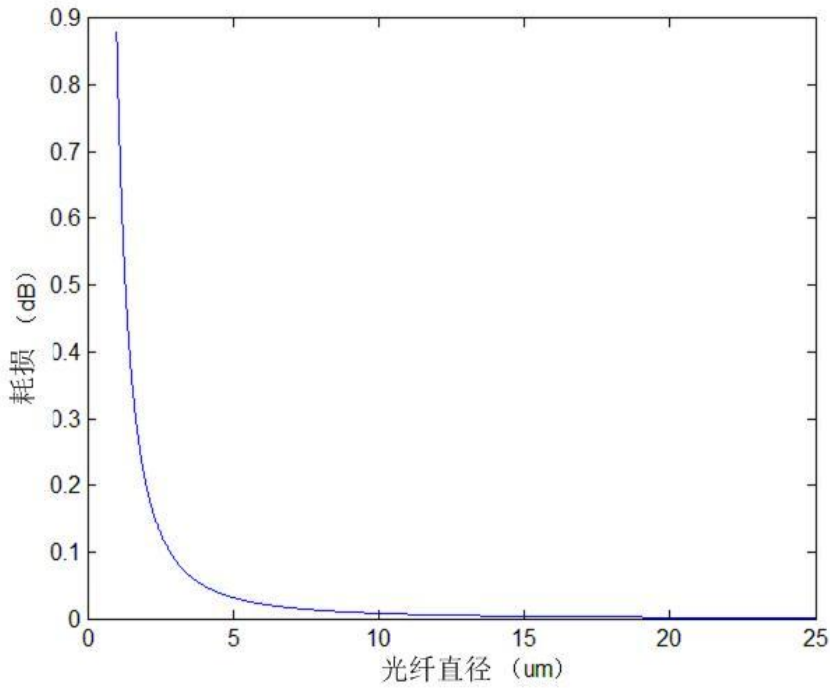


图2-4 光强损耗随光纤半径的模拟变化曲线

2.2.2 光纤膨胀弯曲损耗

光纤弯曲损耗与光纤弯曲半径存在一定的关系, 当弯曲半径 R 大于临界值 R_c 时, 弯曲带来的损耗会急剧增加, 并会使损耗随波长的曲线带来振荡现象。其 $R_c = 2k_0^2 n^2 b^2 / r^2$; $\gamma = (\beta_0^2 - k^2)^2$ 。通过对艾利函数的近似, 我们可以进一步求取后向场轴芯上的强度, 得到一个简单的弯曲损耗系数的表达式^[20]:

$$2\alpha = 2\alpha_B \frac{2(Z_3 Z_2)^{1/2}}{(Z_3 - Z_2) - (Z_3 - Z_2)\cos(2\theta)} \quad (2-4)$$

其中 $2\alpha_B$ 是传统理论中具有无限延伸包层的单模光纤的弯曲损耗系数。对于纤芯

华中科技大学硕士学位论文

折射率为 n_1 的光纤， $2\alpha_B$ 值为：

$$2\alpha_B = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\gamma^3 R} \right)^{1/2} \frac{K^2}{V^2 K_1^2(\gamma a)} \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R}{3\beta_0^2}\right) \quad (2-5)$$

$$Z_q = k_0^2 n_q^2 \left(1 + \frac{2b}{R}\right) - \beta_0^2, q = 2, 3 \quad (2-6)$$

$$\theta_0 = \frac{\gamma^3 R}{3k_0^2 n_2^2} \left(\frac{R_c}{R} - 1\right)^{3/2}, \quad k^2 = k_0^2 n_1^2 - \beta_0^2, \quad V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2-7)$$

其中 $K_1(\gamma a)$ 表示一阶修正贝塞尔函数。

2.3 系统结构及实验结果

图 2-5 是基于载氢光纤熔接气泡的折射率传感示意图，图中的光源由自发辐射宽谱光源 ASE 提供，输入光经过光纤熔接气泡后再由光功率计探测接收。光纤熔接气泡被预先固定在平滑的玻璃片上，随后在光纤熔接气泡的地方上滴下不同折射率的待测液体，待测液体是不同浓度下的氯化钠溶液，实验事先利用阿贝折射仪测量了不同浓度下氯化钠溶液的折射率，最后观测不同折射率氯化钠溶液下的光功率计接收到的出射光的光功率。

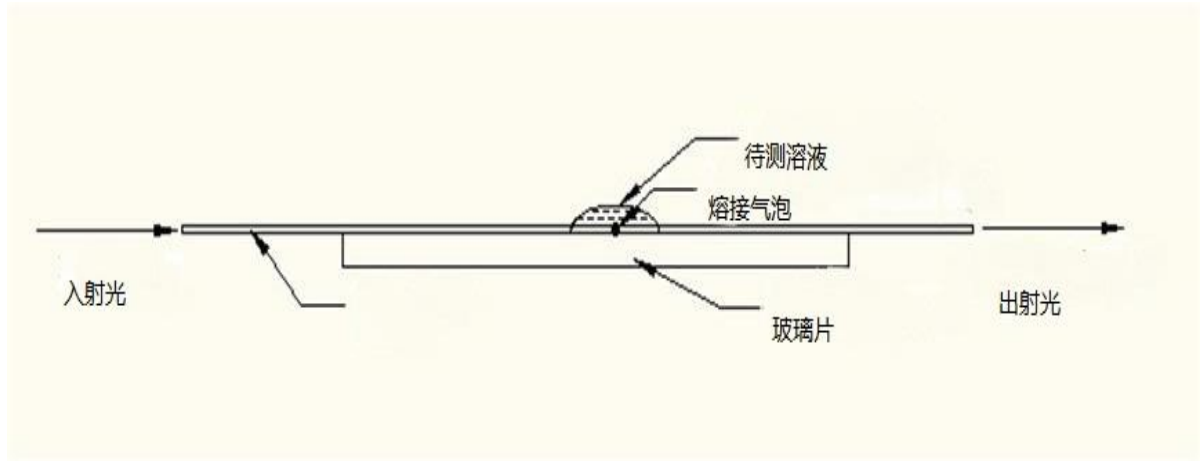


图 2-5 基于载氢光纤熔接气泡的折射率传感示意图

本论文利用 matlab 仿真软件模拟实验采用的单模光纤弯曲特性，为了真实的模拟实验情况下的关系曲线，我们预先将熔接机熔接光纤气泡时的气泡图片加以保存，并利用 aotuCAD 软件根据比例测量了气泡引起的弯曲半径大小 R 及弯曲长度 L ，如图 2-6 所示，光纤直径是已知的，该光纤为普通的单模光纤，其大小为 $125\mu\text{m}$ ，根据显微镜

显示的实物图的比例，我们可以轻易地计算出光纤弯曲半径 R 约为 $244.6\mu\text{m}$ ，弯曲的光纤长度 L 约为 $208.6\mu\text{m}$ 。

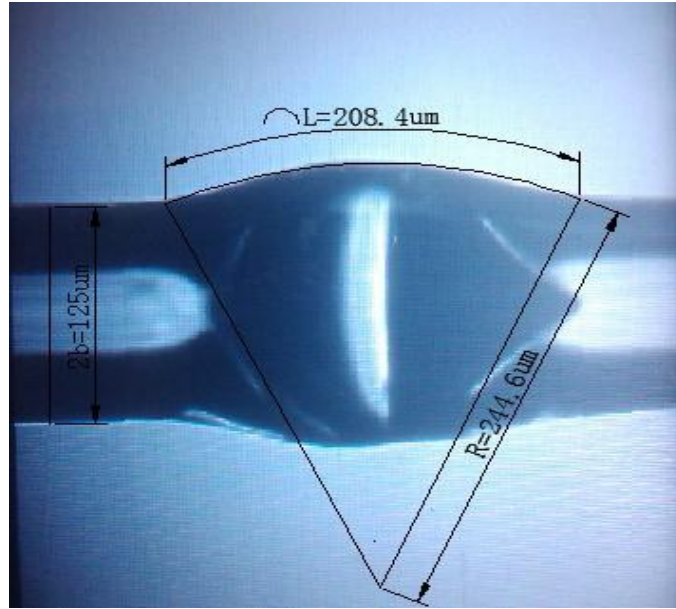


图 2-6 载氢光纤熔接气泡的显微图

图 2-6 中是利用 OriginPro8.0 软件分别绘制的归一化后光强随折射率的仿真曲线、实验曲线及实验数据拟合的二次曲线。其中 P_i 表示在不同折射率液体下透过气泡后的光强， P_0 表示在水中（折射率 $n=1.3325$ ）透过的气泡后的光强，仿真所用的掺锗单模光纤的纤芯折射率 $n_1=1.455$ 、包层折射率 $n_2=1.4475$ 、纤芯半径 $a=4.5\mu\text{m}$ 、包层半径 $b=62.5\mu\text{m}$ ，其中二次拟合曲线拟合程度 $R^2=0.9431$ ，从图 2-7 中的实验数据可以看出，起始阶段光功率计接收到的光强随氯化钠溶液折射率的增大而急剧减小，当溶液折射率 n_3 大于 1.355 时而趋于稳定，将实验数据进行拟合后发现实验拟合曲线较好的吻合了仿真曲线的变化规律，这验证了前面提出的关于气泡膨胀引起微弯曲损耗的设想，而且由于熔接气泡的光强损耗对外部折射率的变化敏感，这也提供了一种很好的折射率测量手段。然而从图 2-7 中我们发现当折射率大于 1.3562 时其变化曲线并不适合折射率传感的标定，因为与 1.3325 到 1.3562 的折射率-光强比变化曲线相比，其灵敏度小且无法在整个曲线内无法很好的拟合成直线，即没有很好的线性，所以我们将折射率范围为 1.3325 到 1.3562 的区域对数据进行线性拟合，其线性拟合度 R^2 为 0.9657，如图 2-8 所示，图中我们得到了 $-38.9941/\text{RIU}$ 的折射率传感灵敏度，而当我们将其^[16]中的折射率传感灵敏度转化后，其结果为 $-2/\text{RIU}$ ，所以这种方法将光纤弯曲折射率测量方法的灵

敏度提高了近 20 倍。

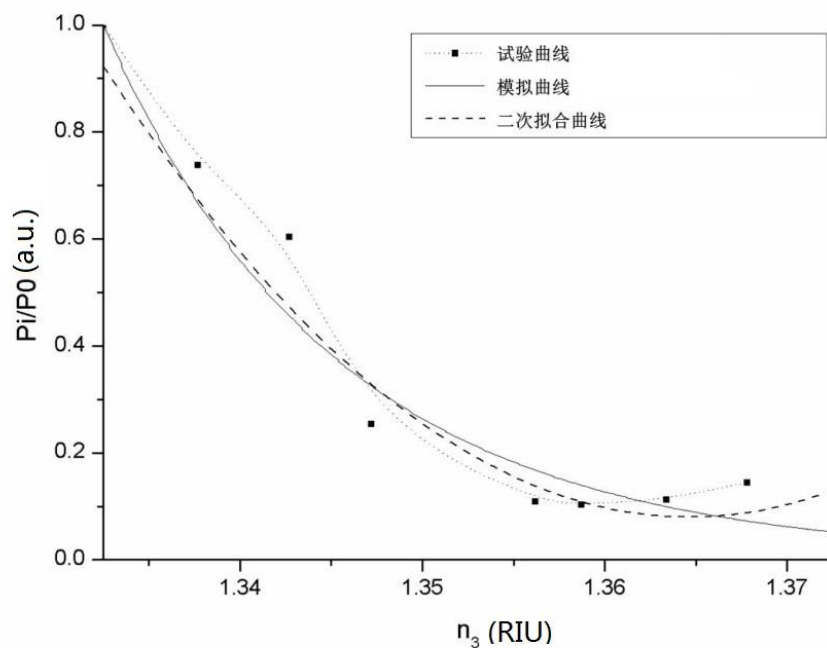


图2-7 P_i/P_0 随外部液体折射率的仿真曲线、实验曲线及实验数据的二次拟合曲线

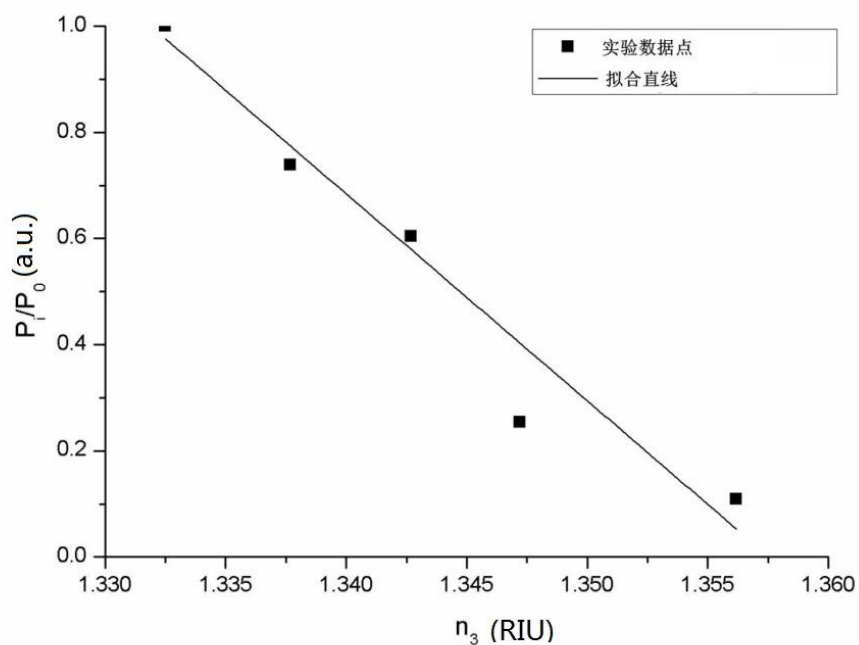


图2-8 折射率在1.3325到1.3562之间时折射率与光强比数据的拟合直线

华中科技大学硕士学位论文

另外值得注意的是，光纤弯曲也会带来光强-波长变化曲线的震荡。由式（2-4）中可以看出当 $2\theta = m2\pi$ ，式（4）可取得局部最大值，即波峰值；当 $2\theta = (2m-1)\pi$ ，（ m 为任意正整数），式（2-4）取得局部最小值，即波谷值。这种弯曲损耗的振荡现象是由光纤中的基模和在包层和待测液体中传播 whispering-gallery 模之间的耦合引起的^[21]。当两种模的相位同步，即同相耦合（ $2\theta = m2\pi$ ），弯曲损耗振荡曲线出现最大值；反之，当两模的相位异步，即异相耦合时（ $2\theta = (2m-1)\pi$ ），弯曲损耗振荡曲线出现最小值，如图 2-9（a）所示。图 2-9（b）是光纤熔接气泡在不同折射率环境中所得的光谱图，光谱图中光功率密度随着波长的变化曲线有较为强烈的震荡，这也同样验证气泡引起微弯曲损耗的设想。

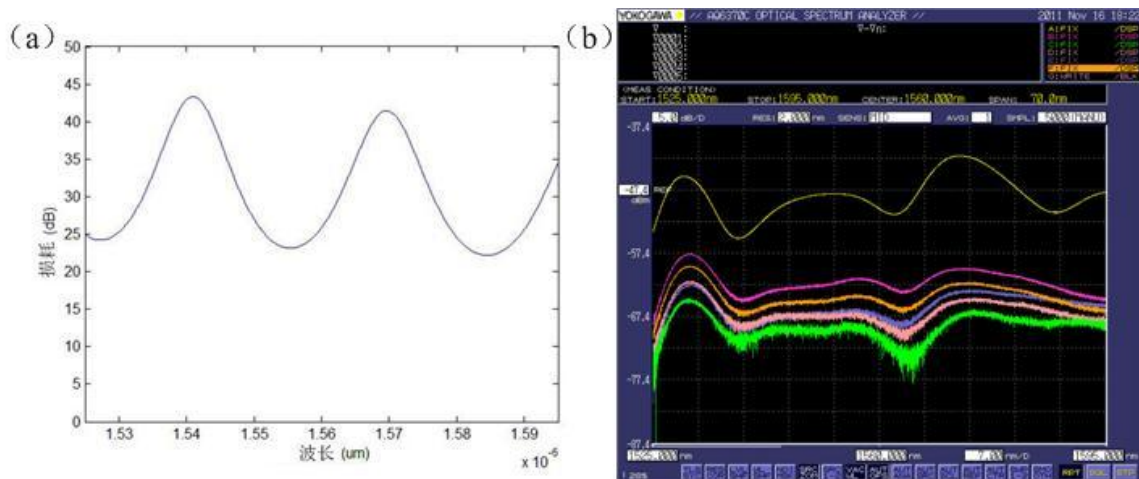


图 2-9 （a）表示气泡弯曲损耗在水中随波长的模拟变化曲线，（b）表示气泡在不同折射率环境下光谱仪所测得光功率密度曲线，其折射率环境自上而下分别为空气、水、 $n_3=1.3472$ 的 NaCl 溶液、 $n_3=1.3562$ 的 NaCl 溶液、 $n_3=1.3634$ 的 NaCl 溶液、 $n_3=1.3728$ 的 NaCl 溶液

2.4 本章小结

本章主要对载氢光纤熔接气泡的损耗产生原因进行了探讨，从结构上提出了两个可能的原理，并依据两种情况下损耗的行为表现进行了理论及实验比较，最终依据对光纤微弯曲损耗的仿真，并从实验上验证了气泡引起的损耗主要是由光纤微弯曲损耗造成的，最后利用这一原理提出了一种用于光纤折射率传感的新结构。与传统利用弯曲损耗测量折射率的手段相比，气泡膨胀引起的光纤弯曲半径小，测量精度更高，并且弯曲长度短，引起的损耗相对较低，而且制作简单，然而由于光纤气泡膨胀的可控

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

性低，不同光纤气泡膨胀造成的弯曲半径不同，使得其测量范围和精度不同，但应该注意到，液体介质折射率测量范围及精度与弯曲半径有关，这也提供了增加其测量范围及精度的可能性。

3 基于双波长光纤激光器拍频原理的温度传感技术

在本章中,我们基于光纤光栅法布里-珀罗 (FBG-FPF)腔提出了一种新型的温度解调方法,并将其应用到环形光纤激光器,其次我们提出了一个适用于长距离传感的传输式光纤光栅传感器探头。在这种传感器系统,我们得到一个高斯分布的拍频信号而非单纵模信号,最后基于一种新型的频移解调方式探测温度变化。这种传感方法克服了光纤环腔激光器腔长的限制,使光纤环腔激光器其更适合传感。

3.1 引言

3.1.1 光纤温度传感器技术的发展

温度是对自然界研究的一个基本物理量,无论是生产生活还是军工科研,我们都不得不无时无刻注意温度给我们带来的影响。所以温度传感器是社会开发最早及应用最为广泛的一类传感器。传统的温度传感器多以电信号为基础的半导体传感器,这类传感器一般具有结构简单、测量精度高、并且由于这类技术已经开发的很成熟,其成本也相当的低廉,然而在一些极限环境下,比如高低温、强电磁及强腐蚀等特殊环境,这类传感器往往无法承受。而光纤的制作材料导致了可以在这类工作环境中完美胜任,且随着光纤温度传感器的发展,光纤温度传感器也变的更加可靠和低廉,目前光纤温度传感器已经广泛应用到油气储存、电力、煤矿等特殊工作环境中,是社会安全不可缺少的一类安防系统。在这里特别值得指出的是在制作材料时我们可以把光纤温度分布式传感器植入其中,这一类材料我们称之为智能材料,这种材料可以实现实时的自我诊断,比如在航空航天、堤坝等重大工程中光纤温度传感器已经取得了其存在价值。

目前光纤温度传感系统按照其原理最要分为光纤光栅温度传感系统和分布式温度传感系统。光纤光栅温度传感器主要是利用了光纤光栅的温度敏感性原理,目前对光纤光栅温度传感器主要有三个方向的研究,一是对 FBG 温度传感器自身的研究,如增强其灵敏度和分辨率,二是根据 FBG 反射及透射的信号进行研究,主要是提供一些新

华中科技大学硕士学位论文

型的解调方式来增强其实用性，例如本论文提出的方法就属于这一类，最后一个方向是只对光纤光栅制作及封装的研究，如温度补偿技术及研究在材料中埋入光纤光栅传感器等研究。分布式光纤温度传感器可以把光纤线路上各个需要探测的离散点温度及距离信息用过光纤采集，从而实现对多点或大面积物体的温度实时监测。分布式光纤温度传感系统主要是依据拉曼散射或瑞利散射等原理对反射回来的光信号进行识别，最早的分布式的光纤温度传感器是上世纪七十年代由 Rogers 提出的偏振光时域后向散射技术，这种技术是后向散射光强随温度的变化来实现温度分布测量的方案^[22]。国内最早对光纤温度传感的研究是起于上世纪八十年代重庆大学，而后九十年代在国内众多高校及企业，如浙江大学、北京理工等也参与到光纤温度传感领域的研究。

目前光纤温度传感器正在往更加智能、灵敏度更高、结构更为简单的研究方法发展。在越来越广泛的工作生活场合中，光纤温度传感器以其高灵敏度和实时性已经成为了传统温度传感器的代替品。

3.1.2 光纤激光器的发展及光学拍频技术原理

光纤激光器是当今光电子领域最为前沿的课题之一，其最早的研究其起于上世纪六十年代，当时美国的 E.Snitzer 等人就提出了基于光纤进行激光器的研究，但由于当时光纤制作等技术不成熟所以发展十分缓慢，而后随着七十年代康宁公司制作出第一代低损耗光纤，八十年代英国 southampton 大学的 S.B.Poole 等制作出低损耗掺铒光纤，光纤激光器的研究得到了长足发展。光纤激光器经过多年的发展，在不同的研究方向都得到了一定的成果，按照输出激光及原理的特性，我们可以把光纤激光器大体分为单频光纤激光器、多波长光纤激光器、飞秒光纤激光器、锁模光纤激光器、超连续光纤激光器、布里渊光纤激光器和拉曼光纤激光器等。与传统的半导体激光器相比，光纤激光器具有很多其独有的特性和优点，由于光纤增益介质可以制作的很长，光纤具有很大的表面积体积比，易于散热，所以光纤激光器的输出功率可以做的很大，输出的激光亮度高；除此之外光纤激光器具有体积小，输出的激光光谱范围很宽，性能稳定，输出的激光光束质量可以做的很高等优点。这些优点使得它在通信、加工、医疗、雷达及光纤传感等工业及生活领域得到日益广泛的应用。光纤激光器的常用增益介质有半导体光放大器 SOA 和掺铒光纤放大器 EDFA 等，由于光纤通信在全光网发展的需

华中科技大学硕士学位论文

要及掺铒光纤放大器一些独特优点，对掺铒光纤放大器的研究显得越发重要，利用掺稀土铒元素的光纤研制成功给光纤通信等领域带来了革命性的发展，掺铒光纤放大器不仅能成功的实现光纤通信中通信信号的全光放大，也使得光纤激光器有了新的发展，特别是掺稀土的光纤其荧光光谱往往很宽，非常适合光通信 WDM 中的光放大及可调谐光纤激光器的研究，与半导体光放大器相比，光纤光放大器具有泵浦功率高、转化效率高、阈值低、增益高、增益质量高、结构简单、散热好、与光纤易耦合等优点，目前光纤激光器的研发也是主要以掺杂稀土元素的光纤为主。除了光纤增益介质，光纤滤波器也是光纤激光器重要的光学器件之一，由于掺铒光纤放大器的增益谱很宽，没有光纤滤波器的选取，其无法实现有效的激光输出，常用的光纤滤波器有光纤光栅滤波器、F-P 滤波器、M-Z 滤波器等，而本章使用的滤波器则是基于光纤光栅的 F-P 滤波器。

光拍频技术是稳频激光器出现之后的一种技术，我们把频率相近的两束激光同向传播叠加而成的光波称之为光拍频波，其强度包络的频率为两束光的频差。为了解释光拍频的原理，这里我们将光拍频与光干涉进行对比加以介绍。我们设两束光波分别为

$$E_1 = A_0 \cos[\omega_1 t + \varphi_1] \text{ 和 } E_2 = A_0 \cos[\omega_2 t + \varphi_2], \quad (3-1)$$

式中 ω_1 、 ω_2 为光频率， φ_1 、 φ_2 为频率，由于一般的光电接收器的响应频率远小于光频，我们可以把接收到的两束光的光强近似为

$$I = A_0^2 \{1 + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]\}, \quad (3-2)$$

上述公式中若 $\omega_1 = \omega_2$ ，则两束光波的相位差不会随着时间的变化而变化，这就是传统的光干涉表达公式，而若 ω_1 、 ω_2 具有一定的频差，则 $\omega_1 - \omega_2$ 会随着时间的变化而变化，根据上公示我们可知两束光的光强 I 会随着 ω_1 、 ω_2 变化，即会随着时间的变化而变化，我们将差频 $\omega_1 - \omega_2$ 称之为拍频，而这种光强的周期性变化就称之为光拍频干涉^[23]。

3.1.3 对基于光纤激光器的传感器研究现状

学者第一次将光纤激光器用作传感器来研究最早始于 1995 年，当时的美国海军实

实验室利用干涉波长解调技术实现了对应力的传感。基于光纤环腔激光器的传感器广泛应用于许多物理量检测,如温度、压力、液位等,与传统的光传感器不同,光纤环腔激光器不需要独立的光源,其作为有传感功能的激光器,我们只需要分析输出激光的光学性质,比如通过观察激光的强度^[24]、波长等特性的变化来检测待测物理量的变化,而大部分此方向的研究者都专注于将光纤激光器中的光纤光栅作为传感元件,这是因为光纤光栅在光纤激光器中常常作为滤波器来使用,而光栅在传感上的特殊作用使得它的变化直接反应到输出激光的光学性质当中,比如 2001 年 L. Talaverano 提出了一种基于 EDFA 环腔激光器的光栅传感器,如图 3-1 所示,从图中我们可以看出激光器中有多个光纤光栅作为滤波器,而相应的其输出光将会有与多个光栅波长对应的激光输出,而作者将多个光栅作为传感元件则可以同时对多个点的物理量就行探测^[25]。

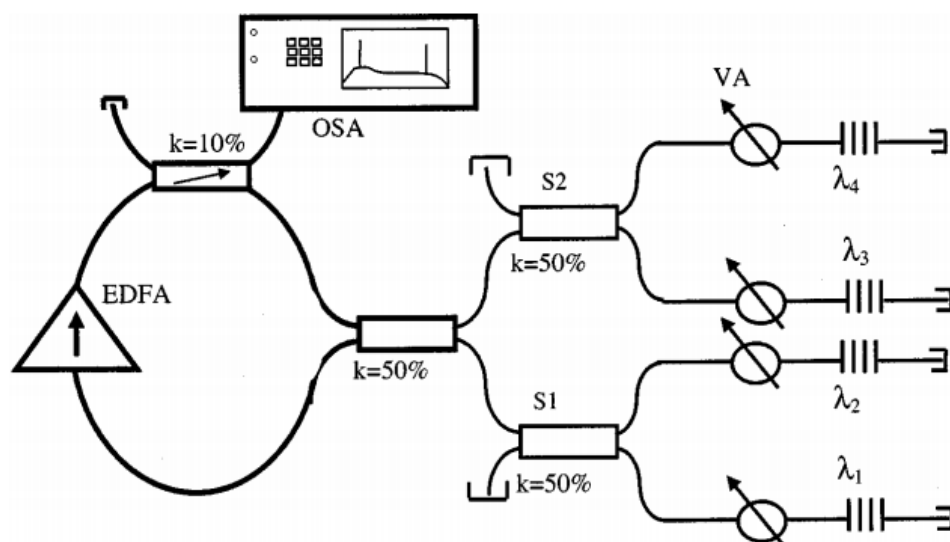


图 3-1 基于 EDFA 环腔激光器的光栅传感器

在本章中我们提出对输出激光进行拍频,因为拍频信号可以提供一个可视化结果来观察光纤环腔激光器激光纵模,并直接反应了激光器质量和参数变化。对于拍频信号的频率响应,许多研究人员已经做了很多研究,而一般的光纤环腔激光器常有许多纵向模式,输出激光纵模竞争限制了光纤环腔激光器的应用。为获得单纵模激光,我们必须增添一些设备^[26]并且要严格限制环腔的长度,但嵌入的设备多会降低系统的稳定性并增加激光的损耗,这一限制使其应用有许多限制。为了解决这一问题,我们提出了一种多纵模的传感解调方法,这种解调方法可以无视多纵模的干扰,第一次实现了多纵模拍频

传感。

3.2 光纤光栅传感器的原理及光纤光栅 F-P 腔的制作

3.2.1 光纤光栅的发展及其传感原理

光纤光栅是指光纤波导介质在光纤轴向有周期性的物理结构的一种光无源器件。光纤中永久光栅的形成是由 K. O. Hill 等人于 1978 年在加拿大渥太华的通信研究中心发现的。他们将氩离子激光器输出的 488nm 的激光耦合进一段掺锗的单模光纤中，几分钟后观察到反射光开始增强，直至几乎完全反射。这个现象被解释为一种新的非线性效应——“光敏性”。在他们的实验中，入射的激光与从光纤末端端面反射回来的激光发生干涉，形成驻波，而由于光敏性，在光纤芯区形成了周期性的折射率变化，这就是“光纤中的 Bragg 光栅”（in-fiber Bragg gratings）。Hill 等人的实验中，光敏性的发生是一个双光子过程。Meltz 等人由此意识到如果用光子能量为 5eV 的紫外光，可能会发生单光子过程的光敏性，因为 5eV (245nm) 对应着掺锗光纤中锗一氧空位的吸收带。他们发明了光纤光栅的外写入法，即用波长为 244nm 的两束相干的紫外光从侧面照射光纤，这两束光形成干涉条纹，在光纤芯区形成折射率的周期性变化。外写入法的优点是，干涉条纹的周期由写入光的波长和干涉光束的夹角同时决定。这样便可以使光纤光栅的 Bragg 共振波长满足光通信或光传感的需要。

光纤光栅因为其本身材料是光纤的原因而具有很多传承于光纤的优异的特性，比如在传感应用方面与传统的机电类传感器相比，它具有防爆、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、尺寸小、重量轻、无源、易于光纤传输介质介入、损耗小、具有一定的柔韧性等很多优点，因而广泛应用在土木、电力、航天等领域。在光纤传感领域不仅用于温度、应变、加速度、倾角等测量及监测，还在生化传感领域有广泛应用。光纤光栅传感器因其优异的特性而在最新的传感领域备受关注，尤其在最近几年得到了飞速的发展，1993 年，在加拿大卡尔加里附近的 Beddington Trail 大桥上，人们首次使用 16 个光纤光栅传感器粘贴在预应力混凝土支撑的钢增强杆和碳纤维复合材料筋上，对桥梁结构进行长期检测。这是光纤光栅传感器诞生以前，其他类型的传感器所不能实现的^[27]。2003 年，我国清江水布垭水电站地下厂房在岩锚梁施工时，在预应力锚杆上布设

华中科技大学硕士学位论文

了三十五个光纤光栅传感器，检测地下洞体围岩的稳定状况后期观测数据显示，大部分测点能够反映围岩实际受力的变化，为施工提供了可靠的安全信息。

而在通信领域中，光纤光栅色散补偿技术及慢光技术也是近几年的研究热点。特别是光纤光栅器件易与光纤集成、插入损耗低、偏振相关性小、制作工艺易于标准化、原材料简单便宜等优点，光纤光栅器件现在已经广泛应用于现代光纤通信系统，在光纤通信领域，可用于光源、编解码器、放大(EDFA 的增益平坦)、复用与解复用(上下路复用、波分复用)等。光纤光栅还应用于全光开关、全光逻辑，实现全光通信。在本论文中我们主要介绍大啁啾光纤光栅在光源、放大、复用与解复用上的应用。

FBG 传感原理主要是基于 FBG 对于应力、温度等环境因素的改变在光谱上有响应的变化，光纤光栅是一种重要的光滤波器件，当一束光通过光纤时光栅会反射满足其一定波长条件的光。不同反射谱对应的中心波长为

$$\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (3-3)$$

这里 n_{eff} 是光纤的有效折射率， Λ 是响应的光栅的周期大小。上世纪八十年代末 W.W.Morey 等人首次对光纤光栅的温度和应变传感特性进行了研究，得到了温度灵敏度为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ nm}/\mu\text{e}$ 和应变的灵敏度为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\text{e}$ 。其传感的原理是当外部环境的温度和应力发生变化时， n_{eff} 和 Λ 的大小也会发生变化，导致中心波长发生漂移。其与温度关系式为

$$\Delta\lambda = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda, \quad (3-4)$$

温度的变化会引起光栅周期的变化： $\Delta\Lambda = \alpha\Lambda\Delta T$ ，式中 α 是热膨胀系数，热光系数引起的有效折射率变化为： $\Delta n_e = \xi n_{\text{eff}}\Delta T$ 式中 ξ 是光纤的热光系数，将两者一起考虑时，我们可以将引入光纤 braag 光栅温度灵敏度系数简单的表示为：

$$K_T = \frac{\Delta\lambda / \Delta T}{\lambda_0} = \alpha + \xi, \quad (3-5)$$

而 FBG 光谱波长的漂移量与应力的关系则可以表示为：

$$\Delta\lambda = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T, \quad (3-6)$$

其中 K_ϵ 是应力灵敏度系数、 K_T 是温度灵敏度系数^[28]。由上式我们可以得出，当外界施加应力 ϵ 或温度变化 ΔT 时均会引起中心波长的漂移，其大小 $\Delta\lambda$ 除外界环境因

华中科技大学硕士学位论文

素外，与自身材料决定的应力灵敏度系数 K_ε 及温度灵敏度系数 K_T 均有关。除了可以对温度和应力进行检测，光纤光栅也可以对压力、位移、加速度、电流、电压、磁场、频率等物理量进行传感。

3.2.2 光纤光栅模拟及制作

对光纤光栅的理论分析常用的方法是耦合模理论，其主要诠释的是光纤波导中波导模、包层模、辐射模同类模之间及导波模与包层模、导波模与辐射模、包层模与辐射模之间的功率交换行为。根据耦合模理论的理想近似、在对光纤光栅分析时可以把光纤光栅区域内的横向分量无微扰的、很多理想模式的叠加。而在对光纤光栅模拟时最常用的方法是传输矩阵法，其原理是将光纤光栅视为许多小分段均匀光栅的组合，每个小分段的光栅都可以用一个 2×2 的矩阵来表示，如果将所有分段表示的矩阵相乘得到的 2×2 矩阵则表示整个光纤光栅的传输特性，传输矩阵法简单易懂，对于常见的啁啾光纤光栅、切趾光纤光栅以及相移光纤光栅都可以近似的表示出来。设光纤光栅分为 M 个小分段， R_i 及 S_i 是光纤中传输光波经过第 i 个光栅分段后的场振幅，对于布拉格光纤光栅来说 $R_0=R_{L/2}=1$, $S_0=S_{L/2}=0$ ，计算 $R_{-L/2}=R_M$, $S_{-L/2}=S_M$ 。对于光纤布拉格光栅 $R_0=R_{-L/2}=1$, $S_0=S_{-L/2}=0$ ，需要计算 $R_{L/2}=R_M$, $S_{L/2}=S_M$ 。第 i 个分段部分的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}, \quad (3-7)$$

对于布拉格光纤光栅，

$$F_i^B = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (3-8)$$

其中 Δz 表示第 i 个均匀光纤光栅的长度， $\hat{\sigma}$, k 表示第 i 个均匀光纤光栅的耦合系数， $\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}$ ，对于传输矩阵：

$$F_i^C = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_C \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_C} \sinh(\gamma_C \Delta z) & i \frac{k}{\gamma_C} \sinh(\gamma_C \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma_C} \sinh(\gamma_C \Delta z) & \cosh(\gamma_C \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_C} \sinh(\gamma_C \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (3-9)$$

华中科技大学硕士学位论文

其中 $\gamma_c = \sqrt{k^2 + \hat{\sigma}^2}$ ，总输出振幅为：

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}; \text{其中 } F = F_M \cdot F_{M-1} \cdot \dots \cdot F_i \dots \cdot F_1, \quad (3-10)$$

式中的 M 大小由模拟所需要的精确度决定，但其最大值也有一定的限制，因为我们要保证分成的均匀光栅小段长度要大于光纤光栅的周期。

光纤光栅根据其制作原理可以分为刻蚀光纤光栅与折射率调制光纤光栅，而常用的光纤光栅一般是指后者；一般的光纤光栅根据光栅周期的分布可以分为长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅；而根据光纤光栅周期分布的规律则可以分为均匀光纤光栅（如长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅等）和非均匀光纤光栅（如大啁啾光纤光栅和相移光纤光栅等）。自 1978 年研究者第一次成功在掺锗光纤中刻入光栅起，经过近三十多年的发展光纤光栅的制作技术得到了长足的发展，目前根据不同的光纤折射率调制机理，我们常用的光纤光栅制作方法主要分为干涉写入法及逐点写入法两种，逐点写入法的成栅机制是将脉冲激光聚焦并透射到光纤上，并使激光轴向移动使光纤上出现周期性的折射率调制，这种方法最大的好处就是灵活性非常高，但相应的其制作过程复杂不稳定，成功率低。干涉写入法可以分为驻波干涉法、全息相干法和模板衍射法三种，驻波干涉法是最早的光纤光栅制作方法，是由 Hill 等人最早提出，但目前已经很少有人使用，全息相干法亦称外侧写入法，是最早由 Melte 等人提出，而模板衍射法又称相位掩模法，最早也是由 Hill 等人在 1993 年提出，以利用紫外光写入光纤光栅。相位模板是一块对紫外光透明的二氧化硅平板玻璃，在其一面用光刻的方法形成一维的周期性条纹，从而使入射的紫外光发生衍射。条纹形状的设计使得衍射的紫外光的绝大部分能量分布在 ± 1 级中，而 0 级衍射光能量不超过 5%。将光纤紧邻相位模板放置， ± 1 级衍射光在光纤芯区形成干涉条纹，从而写入光栅，其原理如图 3-2 (b) 所示。光纤光栅的 Bragg 共振波长等于相位模板上条纹的周期与光纤的有效折射率的乘积。相位模板法具有以下优点：对紫外光相干性的要求低，重复性好，适于大规模生产光纤光栅。因此，相位模板法成为目前最广泛使用的方法。其缺点则是由于光栅的制作依赖于相位掩模板，而相位掩模板的周期是固定的，且相位掩模板的价格比较昂贵，本论文中光纤光栅的制作方法就是相位掩模法。

华中科技大学硕士学位论文

光纤光栅的制作要求光纤对紫外光具有一定的光敏性，现在常用的光敏光纤是指掺杂一定浓度铈离子的光纤，这种光纤对 190nm 和 240nm 左右的紫外光有较强的光敏性。对于掺铈光纤光敏性的物理机制现在还不是很确定，多数人比较认同的解释是色心说，色心模型认为掺铈光纤存在者因氧缺乏而导致的结构缺陷，当入射紫外光时会激发自由电子，这种激发的自由电子会被色心俘获形成新的缺陷，最终导致折射率的改变。一般普通的光纤中也会掺杂一定浓度的铈离子（一般为 3~5mol%），这种光纤在紫外光曝光下折射率可以达到 10^{-5} 的调制深度，掺杂高浓度铈离子的光敏光纤则可以达到 10^{-4} 的调制深度，为了有效的提高光纤的光敏性，1993 年 Lemaire 等人提出了光纤载氢技术^[29]，这种方法是将光纤置放在高压氢气罐中，使得氢离子渗入到光纤中，这种光纤增敏方法不仅成本低，制作简单且能大幅度的提高光纤的光敏性，如普通光纤在经过载氢之后折射率调制深度可以从 10^{-5} 提高到 10^{-2} 。

为了有效的增强光纤的光敏性，我们在实验前预先将掺铈的光敏光纤进行了载氢处理，载氢仪器的压强约为一百个大气压强，光敏光纤载氢时间约为一周，实验制作过程如下图 3-2 所示，输出激光由 1064nm 的 YAG 激光器提高，输出的 1064nm 激光经过四倍频晶体倍频处理之后转为 266nm 的紫外光，输出的紫外光先经过一米的稳定传输，再经过精密移动平台上的紫外全反镜并入射到柱面透镜上，柱面透镜对紫外光在 X 方向进行聚焦，聚焦之后的紫外光入射到相位掩模板上，相位掩模板之后放置剥除涂覆层的光敏光纤，当紫外光经由相位掩模板衍射后，正负一级衍射光将会发生干涉并将光敏光纤调制，如图 3-2（b）所示。由于制作的光纤光栅 F-P 腔两个光栅之间

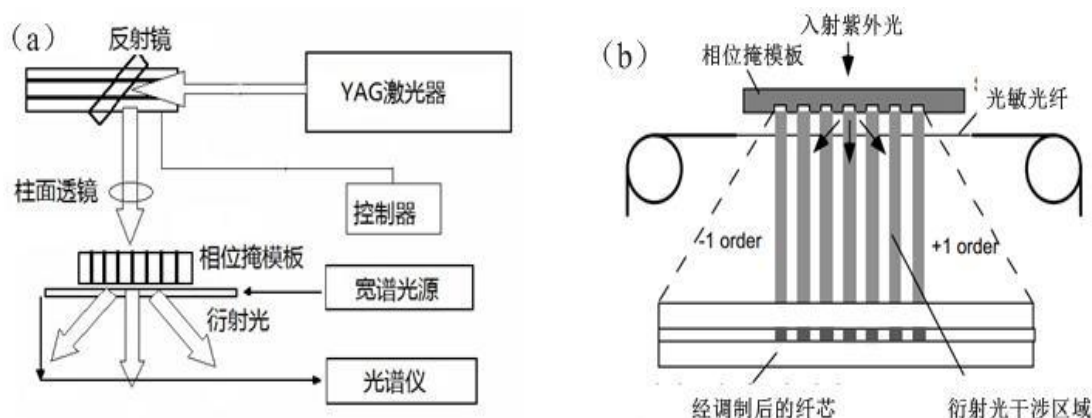


图 3-2（a）光纤光栅的制作平台示意图。（b）相位掩模板法制作原理图

的距离很小, 约为 1.4cm, 在制作光栅时我们没有移动反射镜使紫外光在掩模板上扫描, 而是让紫外光在光纤一点长时间曝光, 经过一段时间后将反射镜移动 1.4cm 进行第二次曝光, 实验室光纤光栅制作平台实物图如图 3-3 所示。

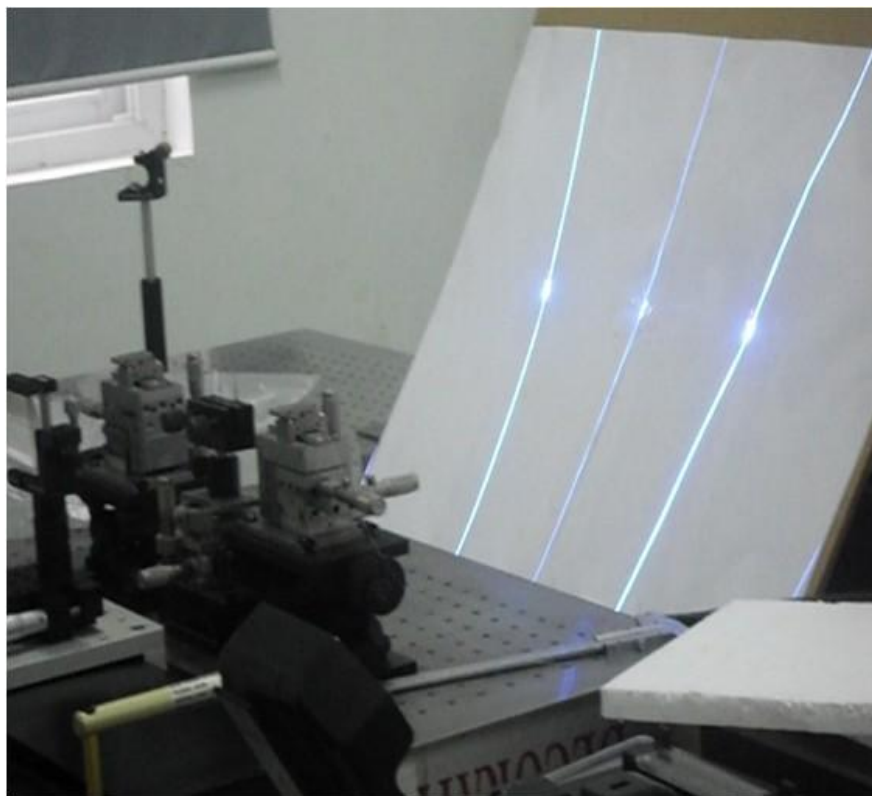


图 3-3 光纤光栅制作平台实物图

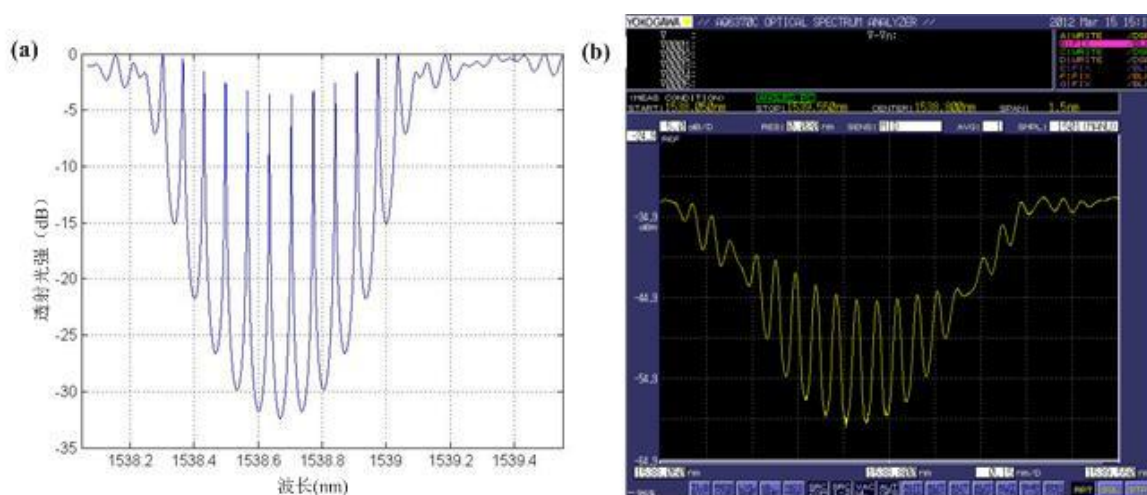


图 3-4 (a) 光纤光栅 F-P 透射光谱模拟图, (b) 光纤光栅 F-P 透射光谱实验图

实验前为了提高实验效率, 我们事先依据矩阵传输法在模拟软件matlab上对光纤光

栅F-P腔的光谱进行模拟,并最后选取了合适的参数来指导实验,模拟的光谱图如图3-4 (a)所示,模拟选取的光纤有效折射率 $n_0=1.455$,图3-4 (b)表示在实验所得光栅F-P腔光谱图。

3.3 拍频温度传感技术原理

光纤光栅 F-P 腔能够得到普通均匀 FBG 不能得到的窄带通,所以它是可以用来选择光纤激光器的纵向模式。而在光纤光栅 F-P 腔中不同的窄带宽的自由光谱范围(FSR)有一定的微小差别,这种特性已经被证明^[30],在光频谱分析仪(OSA)中这种自由光谱范围的微小的差别是很难被观测的,但我们可以在频谱分析仪(ESA)中通过滤出的双波长激光拍频来观测。

光纤环腔激光器的结构如图 3-5 所示。实验中为了提供足够的光增益,以抵消光纤环腔激光器中较大的插入损耗,保证足够的激光输出功率来对输出双波长激光拍频和保持稳定的纵向模式,我们在光纤环腔内同时使用一个半导体光放大器(SOA)和 10 m 掺铒光纤用作增益介质。结构示意图中的可调带通滤波器用于选择光纤布拉格光栅 F-P 腔(FBG-FPF)的波长,可调带通滤波器的最小可调带宽是 80pm,其带宽大小及带通的中心波长可以预先设定,图中的偏振控制器(PC)用来对环腔内传输光的极化方向对齐。环腔上的两个光环行器可以实现光纤光栅 F-P 传感器探头往返传感信息的单线传输,这也为这个温度传感系统长距离传感提供了可能性。其中 FBG-FPF 的中心波长和波长间距大约为 1538.7nm 和 0.065nm (如图 3-6)。一个端口为 3dB 光耦合器输出激光,其中 10%的输出光被光谱仪 OSA 接受,90%的输出光被光电探测器 PD 接受,实验中的频谱仪 ESA 可以检测的最高拍频频率为 40GHz。

测量的基本原理如图 3-6 所示。因为环腔内没有可以实现单纵模选择功能的器件,所以其输出激光中有许多纵向模式,而其输出光拍频信号也将有很多频率产生,然而我们发现在 ESA 中两个波长的输出激光拍频信号的响应频率是遵循高斯分布的,因此我们可以过拍频信号的中心频率移动来探测到输出激光的双波长间隔变化。通过在可调谐滤波器上选择合适的参数,其带通滤波将选择 FBG-FPF 相应的两个窄带通,两个窄带通的产生可以实现环腔内对应的两个波长上的光振荡,当输出的双波长激光经过光电探测器的接受,频谱仪可以探测到双波长激光的拍频信号。实验中当我们改变 FBG-FPF

华中科技大学硕士学位论文

的中心波长时,我们发现拍频信号的中心频率也会有一个微小的变化,这与上面提到的理论相符。实验的目的是通过 FBG-FPF 传感探头实现对环境温度的探测,所以我们要求可调带通滤波器可以实现对 FBG-FPF 相邻两个波长的选择,而对其他波长的带通过滤掉,这种情况下我们可以实现一个至两个波长激光的轮流输出,通过多次实验,我们将可调带通滤波器的带宽设置为 0.16nm,这一带宽值不到三波长间距但超过双波长的间距。

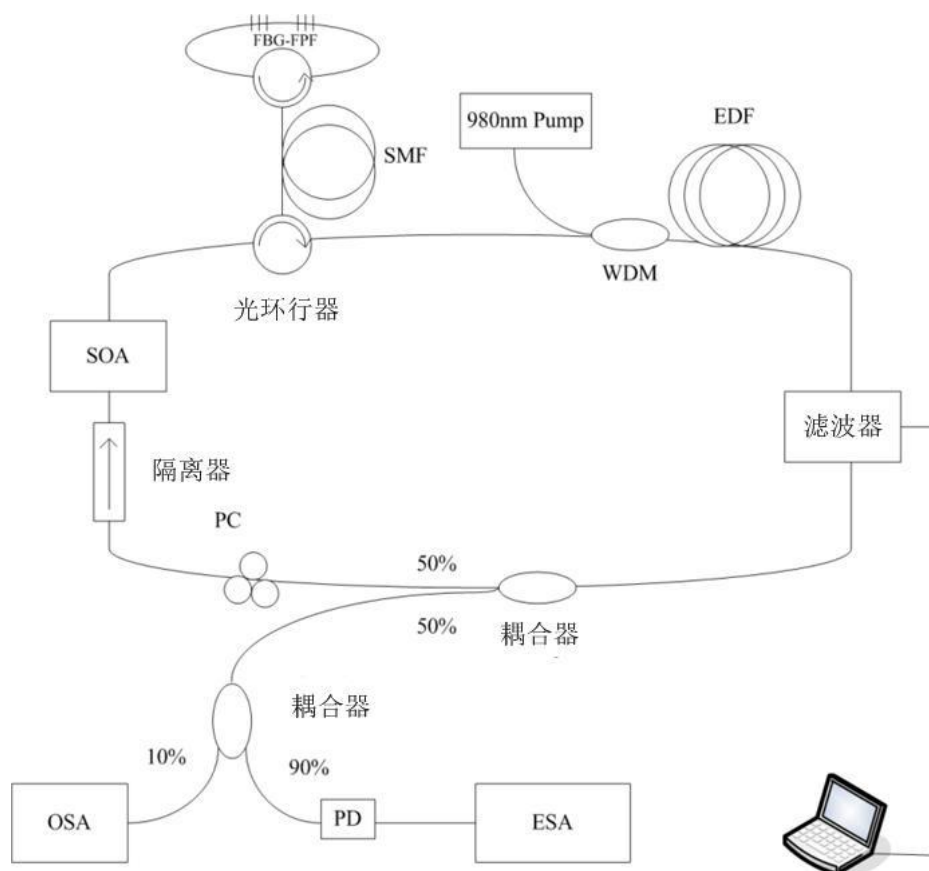


图 3-5 光纤环腔激光器温度传感结构图示

实验中我们将以 FBG-FPF 梳状滤波器做的温度传感探头侵入到具有恒温效果的水浴箱中,实验过程是先将处于室温的水浴箱中的水逐渐加热,并依次记录下来产生拍频信号频移时的水温度,当加热到 FBG-FPF 最外端窄带通移除可调谐带通滤波器的带通范围时,我们将水浴箱中的水温逐渐降温,并再次记录下来产生拍频信号频移时的温度。然而在实验过程中我们必须注意到,当滤波器选择的值为 FBG-FPF 的中心波长时频移值会比较小,但从实验结果中我们会发现输出的双波长激光拍频信号的 3dB 带宽要小于 50MHz,而最小的频率变化超过 50MHz,由于这一原因,我们可以轻易地检测拍频信号频

率的改变，即可以实现温度的跳变传感。

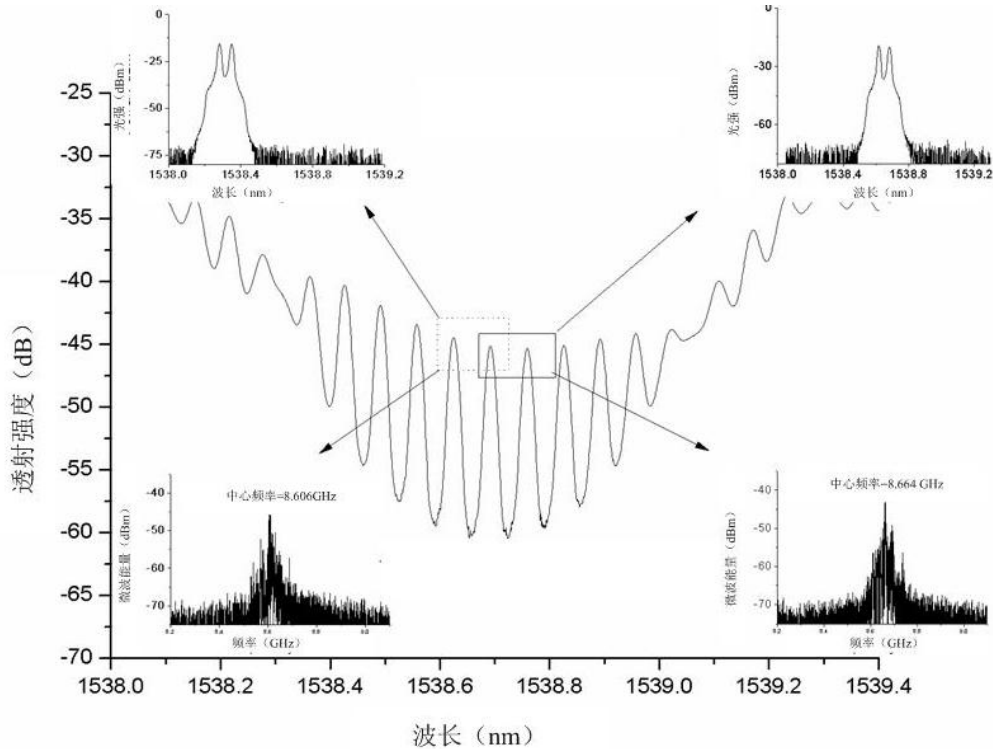


图 3-6 FBG-FPF 的透射光谱及传感解调原理

(图示上边的两幅光谱图表示双波长输出激光，下边两幅频谱图表示双波长激光的拍频信号)

3.4 实验结果及分析

实验中我们认为采用的 FBG-FPF 的温度敏感性与光纤光栅的温度敏感性近似相等，其值大约是 $0.028\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ ，实验的原理如上所述，FBG-FPF 的波长会随着环境温度变化，而由于除了实验开始时会对带通滤波器进行设置，实验过程中可调谐带通滤波器的值是不会改变的，所以当传感器的外界环境温度上升或下降时，FBG-FPF 的窄带通将会轮流通过可调谐带通滤波器的带通。为了很好的理解实验结果，我们预先模拟了环境温度与拍频中心频率的传感关系曲线图，如图 3-7 中拟合的虚线所示，图 3-7 中的两条曲线表示实验及模拟所得的环境温度与拍频信号中心频率之间的关系图，从图中我们发现当温度从中心到边缘移动时，其中心频率的值会减小，即 FBG-FPF 的自由光谱范围 FSR 从其光谱中心到两边会逐渐减小，这一特性已经证明被 J. L. Zhou 在文章^[30]中证明。在图中我们发现模拟的传感曲线与实验所得非常的吻合，这也证明了这种传

感解调方式在原理和实践中都是可行的。

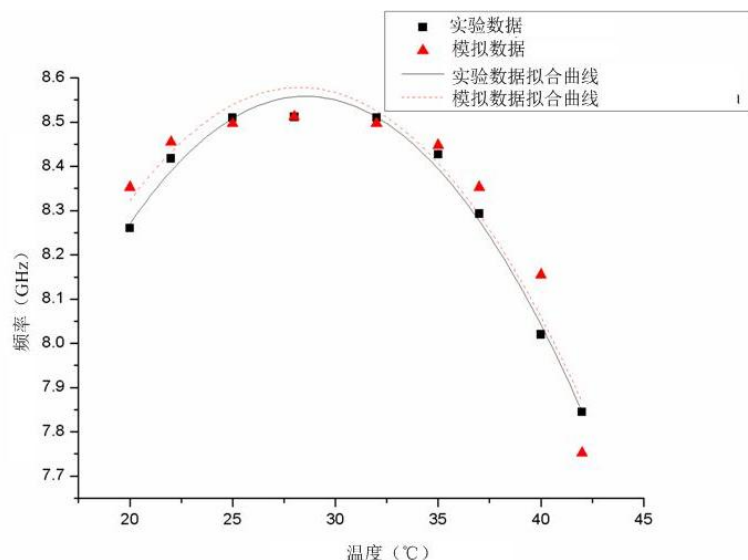


图 3-7 环境温度与拍频信号中心频率之间的关系图

(图中的实线表示实验结果的拟合曲线, 虚线表示模拟数据的拟合曲线)

实验结果显示可以探测的最小温度变化为 2°C , 考虑到单波长激光输出, 传感器的温度灵敏度可以增加 1°C 。从图 3-7 中发现, 尽管实验结果表现出来的曲线是不利于传感的离散抛物曲线, 但我们发现曲线的两侧仍具有良好的线性关系, 对其外侧进行线性拟合后发现其 R^2 是 0.99562, 如图 3-8 所示。

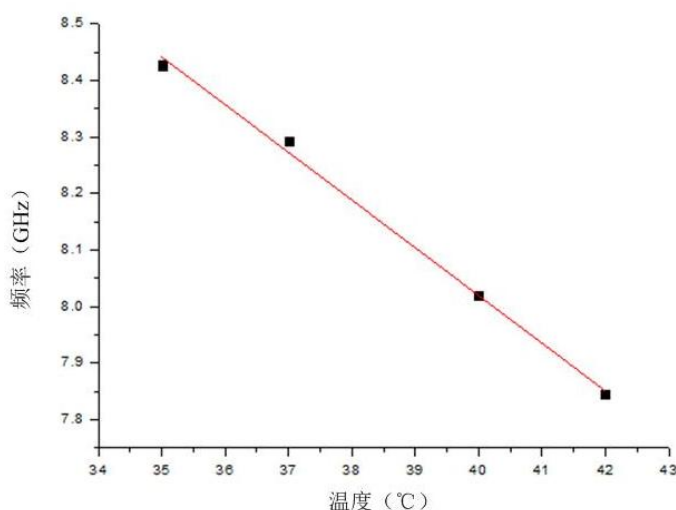


图 3-8 35°C 到 42°C 之间拍频信号中心频率与环境温度的线性拟合关系图

此外, 根据传感的原理, 我们发现检测范围和灵敏度与 FBG-FPF 的带宽、波长间距

和温度敏感性有直接关系,换句话说,我们可以改变 FBG-FPF 的参数来优化温度传感器,扩大其检测范围和灵敏度。所以如果选择合适的 FBG-FPF 参数,我们将会进一步提高这套系统的传感特性,改善其传感的灵敏度及传感范围。

3.5 本章小结

本章根据光纤布拉格光栅 F-P 腔自由光谱范围渐变的特性提出了一种新颖的 FBG-FPF 环腔激光器传感技术方案,这种技术利用了一种新型的温度传感解调方法,通过光纤布拉格光栅 F-P 腔的特性以及双波长输出激光拍频信号中心频率的频移来观测温度的变化。本章提出的传感方案可以忽略激光拍频时多纵模的影响,并且由于采用了一种双光环形器的设计,使得 FBG-FPF 温度传感探头比较适合长距离传感。虽然这种方法的传感灵敏度不高,仅仅可以实现 1°C 的温度响应,但由于其灵敏度与 FBG-FPF 的参数有较大关联,在以后的应用中我们可以使基于这种原理的温度传感器获得更好的提升。

4 基于 SOA 环腔混沌光源的高精度光纤时域计

在本章中,我们提出一个基于 SOA 环腔的新型混沌光学信号源,并在实验中发现基于这种混沌光源的光时域反射仪具有较高的空间分辨率和很好的稳定性。

4.1 混沌信号相关技术及新型光时域反射仪的研究现状

4.1.1 光学混沌的研究现状

混沌现象是指在非线性系统中一种确定的但不可预测的运动状态,混沌行为具有类随机性,即它的外在运动轨迹和随机运动很相似。但和随机运动不同的是,混沌运动在动力学上是确定的,它的不可预测性是来源于其行为的不稳定性,或者说混沌系统对初值变化极具敏感性,无论多小的初值扰动在一定时间以后,也会使系统结果偏离原来的演化方向,具体表现为混沌行为在短时间内具有可预测性而在长时间内则具有不可预测性。如上所述,混沌系统的最大特点就在于对初始条件极具敏感性,因此从长期意义上讲,系统的未来行为是不可预测的。混沌系统有三个关键要素:一是对初始条件的敏感性;二是临界水平,这里是指非线性事件的发生点;三是分形维,它表明有序和无序的统一。混沌系统常是自反馈系统,出来的东西会回去经过演化再出来,循环往复,所以初始条件的微小差别都会在反馈演化中使差别按指数放大,最终使得系统的演化结果在不可长期预测。混沌科学是在计算机科学的发展和广泛应用的基础上发展起来的新兴交叉学科,混沌科学的快速发展打破了不同学科之间的界限,成功地与其他学科相互交错、相互渗透、综合发展,最终在通信、安防、传感、雷达技术、信息科学、生物科学等多个领域中得到了广泛的应用。

光学混沌是混沌科学的一个研究方向,最早在上世纪六十年代世界第一台红宝石激光器诞生时,研究人员就发现激光器的输出激光具有尖峰效应的跳模现象,这种激光系统的不稳定性表现就可以认为是光学混沌的现象。而在七十年代中期, H.Haken 等人为了研究激光系统不稳定性提出了“洛仑兹-哈肯”方程,第一次预言了激光器的混沌输出,这也在随后的研究中得到证实。进入到八十年代之后,对激光器的混沌输

出研究有了长足的发展，如在 1982 年，F.T.Arechi 等人在实验中证实了通过调制光学谐振腔的内损耗，可以得到 CO_2 激光器的混沌输出。而在近年来，大量学者尝试将电学混沌的研究技术引入到光学混沌当中，由于对于电学中的混沌现象研究起步很早，电学混沌技术也相对比较完善，这种不同学科间的辅助使得光学混沌的研究得到快速发展，比如在混沌同步的研究上的大量研究让其在光纤通信上的应用取得了突破性的进展。而在这里需要指出的是，在光纤激光器的混沌输出上的研究也使得光学混沌控制技术快速发展，本章中提出的 SOA 环腔混沌光源也是其中的一部分研究。

在这里，根据光纤混沌光源根据形成机理将其分为外注入式混沌光源和内增益混沌光源，外注入式混沌光源是指依靠独立的外部激光器作为光源并将激光入射到可以形成反馈的系统中，通过持续的外部光源入射和非线性反馈系统产生混沌光，如 2008 年王云才等人提出的将半导体激光器（LD）入射到一个光纤环腔中，使得入射腔内的激光形成振荡反馈，而内增益混沌光源则是依据调整激光器参数，使激光器本身振荡自反馈形成不稳定的激光输出，如应用到光纤通信中的双环掺铒光纤混沌光源等。对于混沌光源的研究除了在保密通信中的应用，在传感、安防、雷达的领域也有涉及，比如 2010 年单超等人就对混沌光纤系统及入侵定位方法进行了研究，作者提出了一种基于半导体光放大器的光纤环腔激光器混沌光源，并将其环腔光纤作为连续的传感元件应用到围栏入侵传感系统中，作者提出的激光器其输出激光是具有帧结构的偏振混沌光，当传感光纤被触及改变时，其双折射分布也会发生变化，这种改变就是作为混沌系统的光纤激光器的初始条件改变，，由于混沌系统对初始值极具敏感性，所以光纤激光器输出光的光学性质也会发生较大的改变，当作者将相邻帧进行互相关运算就会发现入侵，并能在一定程度上确定对入侵的地点，如下图 4-1 所示^[31]。

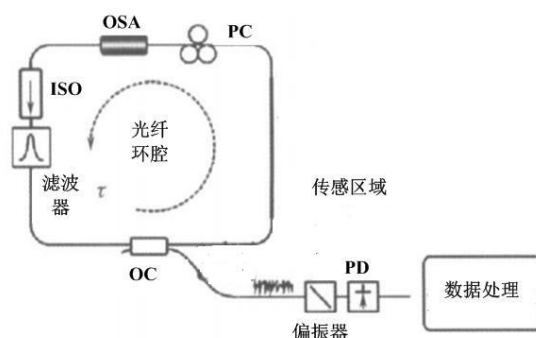


图 4-1 混沌光纤围栏实验系统

4.1.2 相关分析技术的原理

在科研活动及工程中我们常需要确定一对信号之间的关系（如其相近或相似程度）。对于可预测的确定性信号我们可以明确的函数关系式来表征，然而研究工作中我们会常常碰到类似于不可预测的、具有随机性质的信号，这种信号是无法用明确的数学表达式来描述的，但由于这种信号是由一个系统中探测得到，其间会存在一定的联系，对于这种信号的分析现在常常会用到相关的概念。相关分析技术是用相关系数来计量的两个或几个随机变量协同变化的程度，这种技术以信息论和随机过程理论为基础在近几十年快速发展的，经过几十年的研究，相关分析技术已经被广泛应用到力学、电子学、光学、声学等基础科学研究及地震监测、工业生产、环境监测、图像处理等工程实践中。

在时域上分析两路信号的相关程度，要对两个信号进行相关分析，相关是表示两个信号的线性相关程度的量，其相关程度可以用相关系数来表征，相关系数表达式是

$$\rho_{12} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t)f_2(t)dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f_1^2(t)dt \int_{-\infty}^{+\infty} f_2^2(t)dt}}, \quad (4-1)$$

式中 $f_1(t), f_2(t)$ 表示两个连续的实能量序列， ρ_{12} 的取值在 -1 与 +1 之间，当 $f_1(t), f_2(t)$ 时完全线性关系时， ρ_{12} 为 -1 或者 +1，当 $f_1(t), f_2(t)$ 是非线性关系时， $-1 < \rho_{12} < 1$ ，当 $f_1(t), f_2(t)$ 两信号完全没有关系时 ρ_{12} 则为 0，由此可见相关系数 ρ_{12} 可以表征 $f_1(t), f_2(t)$ 的相关性。然而需要注意的是，相关系数 ρ_{12} 只能描述时间轴上两列独立信号的相关性，但对于同一列信号在时间轴上平移后，前后两列信号的相关性则无法表述，为此提出了互相关函数的定义，其表达式如下：

$$R_{xy} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t)f_2(t+\tau)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t-\tau)f_2(t)dt, \quad (4-2)$$

$$R_{yx} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(t)f_1(t+\tau)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(t-\tau)f_1(t)dt, \quad (4-3)$$

当 $f_1(t), f_2(t)$ 相同时，表达式则可以写为：

$$R_{xx} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)f(t+\tau)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-\tau)f(t)dt, \quad (4-4)$$

华中科技大学硕士学位论文

上式为 $f(t)$ 的自相关函数。然而在实际的应用中上面表述的表达式就会失去其作用，这是因为实际上所得的 $f(t)$ 在时间上是有限的，无法在无穷的时间上积分，所以通常使用的相关函数则如下表达式：

$$R_{yx} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau)dt, \quad (4-5)$$

4.1.3 新型光时域计的发展

随着光线技术的快速发展，光纤在生活生产及科研军事上也得到广泛的应用，响应的光纤的维护也成为光纤应用上重要的一环，光时域反射仪 OTDR 便成为了光纤通信系统中不可缺少的重要检测仪器。光时域反射仪最初是作为探测光纤损耗分布研制而成，由于光纤故障点处的光纤损耗会急剧增加，这一鲜明的特点也使得光时域反射仪成功的探测到一般情况的光纤故障点。最初的光时域反射仪是在上世纪七十年代被 Barnoski 和 Jense 等人提出的^[32]，经过了近四十年的发展，光时域反射仪的应用也在许多领域得到广泛推广，如光纤弯曲识别、光纤故障定位和光纤安防系统等。传统上的光时域反射仪的光源一般为脉冲激光器，脉冲激光器会以一定的周期将窄线宽激光入射到光纤中，当脉冲光在光纤中传播时，由于光纤中的微量杂质及光纤本身结构上的不均匀性，脉冲光会有一部分光被散射返回到光入射端，入射端的光电探测器 PD 会将返回的散射光接受，接受系统则会将散射光的光强在时间轴上进行描绘，最后将接受时间转换为光纤的距离，得到光时域反射仪的光纤损耗测绘图。一般情况下光纤损耗是由瑞利散射引起，除此之外也会有拉曼散射和布里渊散射，瑞利散射属于分子弹性散射，即光子与分子发生作用时不会产生能量交换，散射而回的光的频率没有发生改变，与入射脉冲光的频率相同，所以经过瑞利散射后，各向的散射光是同性的。光时域反射仪在测量一根光纤的损耗时，光纤入射端接收到的背向散射光光强是随时间呈现指数衰减的，只有当光纤发生明显弯曲或断裂时，就会引起光的菲涅尔反射。

如上文提到的，光纤故障检测在光纤传输系统中是一个重要的研究领域，尽管一般的光纤传输系统对故障检测的空间分辨率要求不高，精度能达到 cm 量级就可以满足大多数情况下的商业要求，但有时在某些特殊的情况下，如在精密仪器、航空航天等规格要求高的领域，我们需要提出更高定位精度、更加稳定的光时域反射仪，而这是传统

文章中实验作者将 DFB-LD 的出射激光进行偏振调制并入射到有强度调制的环腔中,使腔内反馈形成混沌的激光光信号,输出的混沌信号一路作为参考光被 PD1 接受,一路作为信号光入射到待测光纤中,信号光经过待测光纤反射面的反射被 PD2 接受,两路信号被数字示波器记录并进行相关处理,研究表明,半导体激光器受光反馈或光注入时可以形成混沌振荡^[41],混沌激光输出具有类随机变动的波形,及其相关曲线是尖锐的 δ 函数形状。最后作者在 0~140 m 的范围内获得了 6 厘米的分辨率^[42],而随后的研究证明这种混沌光时域反射仪的空间分辨率与光纤的探测长度是无关的,即随着探测距离的增减,混沌光时域反射仪探测分辨率也不会发生改变。混沌信号检测可以突破 PN 码的限制并能改善其空间分辨率。虽然作者提出的混沌光时域反射仪空间分辨率不高,但这一技术提供了一种新型的光故障检测的方法,本章中所提出的高分辨率的光时域反射仪就是基于上述技术的改进。

4.2 系统结构

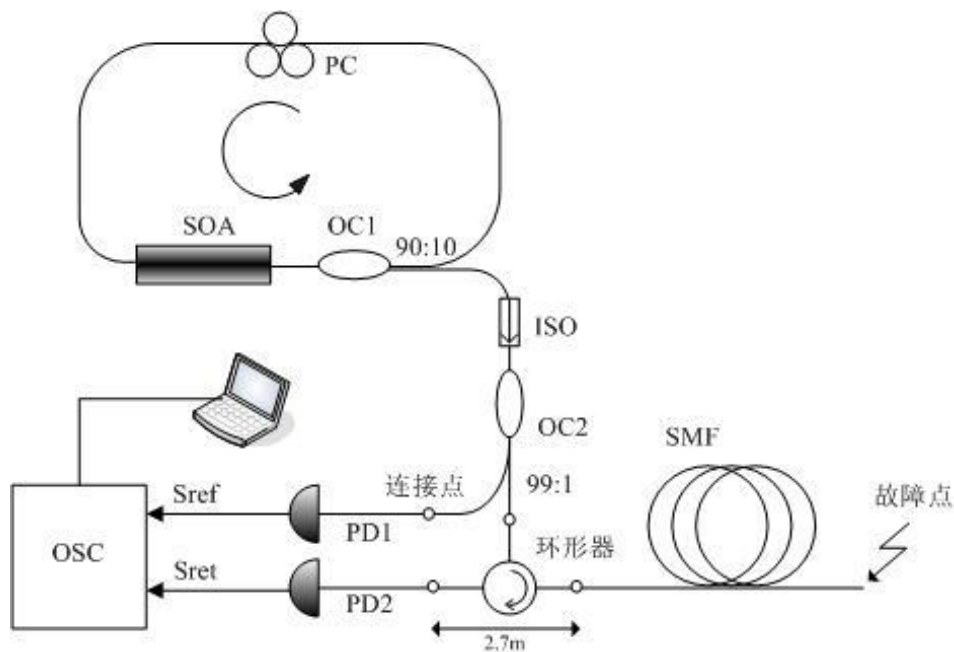


图 4-3 基于 SOA 环腔的光时域反射仪结构图

本章的实验是基于混沌光时域反射仪的改进,其实验设置如图 4-3 所示,一个半导体光放大器(SOA)环作为混沌光源,环中没有光滤波器和隔离器等光器件。SOA(型号:S7FC1013S)是由 Throlabs 公司提供,其中心波长为 1500nm、带宽为 74nm、饱和输

华中科技大学硕士学位论文

输出功率为 14 兆瓦、小信号增益为 13dB。整个腔的长度大于 4m。偏振控制器(PC)用来调整进入 SOA 的反馈光的偏振态,一个分光比为 90:10 光纤耦合器(OC1)提供了 90% 的反馈光和 10% 输出光。我们通过调整光的偏振和 SOA 的泵浦功率来获得混沌光信号。光纤耦合器(OC1)输出端接入一个隔离器,用来防止不必要的光学反馈。一个分光比为 99:1 光纤耦合器(OC2)提供了 1% 的传输光作为参考信号(S_{ref})和 99% 的传输光作为检测信号。其中 1% 的参考光输出端口接入到一个 1GHz 光电探测器(PD1)并被其接受。99% 的探测光输出端口接入到一个环形器(circulator)中,环形器能够确保从故障点返回的探测信号(S_{ret})可以被 1GHz 的光电探测器(PD2)检测到。一个带宽为 500MHz、采样率为 50Gs/s 的实时示波器(OSC)可以记录返回信号(S_{ref})。最后,电脑读取 OSC 中的数据并进行互相关处理。

当 SOA 的泵浦功率足够,而偏正控制器 PC 被适当调整,我们可以得到类噪声的混沌信号,如图 4-4 所示。与外注入式混沌光源^{[41][42][43]}相比,我们可以忽略反馈光强度太高造成光源损害的问题。实验中 SOA 的小信号增益为 13dB,在增益环中混沌信号可以被循环放大,因此我们可以得到一个高强度的混沌信号输出。此外,我们发现从实时示波器 OSC 中观察到的 SOA 环腔混沌信号的时间序列变化频率要高于外注入式混沌信号,对于互相关探测技术来说,这是一个提高探测系统空间分辨率的重要因素。

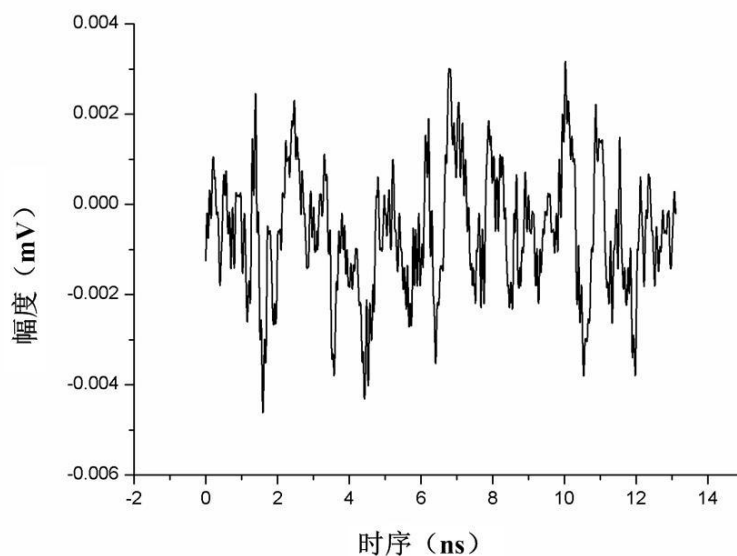


图 4-4 SOA 环腔混沌信号时序图

4.3 实验及结果分析

图 4-5(a)显示了混沌信号的自相关检测曲线,我们发现自相关峰具有周期性,且呈现正态分布,相邻峰值的距离约为 4.2m。这一特性不同与之前的报道混沌信号自相关曲线(一般混沌信号自相关有且只有一个相关峰)。可能的原因是环腔内的传输光经过光纤耦合器 OC1 时一部分光作为反馈光被半导体光放大器 SOA 周期性地放大,所以输出的混沌信号是周期相似的,实验证明相邻的两个峰的距离为 4.2m,这一数值接近 SOA 环腔的长度,这可以直接证明上面的假想。尽管自相关高阶峰不会影响探测系统的空间分辨率,但高阶峰的出现将降低信噪比(SNR),因此我们可以在数据处理时过滤掉不必要的高阶峰,滤出的过程是由 matlab 软件在处理数据时完成的,当出现过度的高阶自相关峰值时,先寻找自相关曲线的最大值,在图中即表现为中间的自相关 0 阶高峰,然后设定合适的阈值将超过阈值以上的高阶峰消除,文中取得阈值大概最大值的 1/7,消除高阶自相关峰后的自相关曲线如下图 4-5(b)所示。

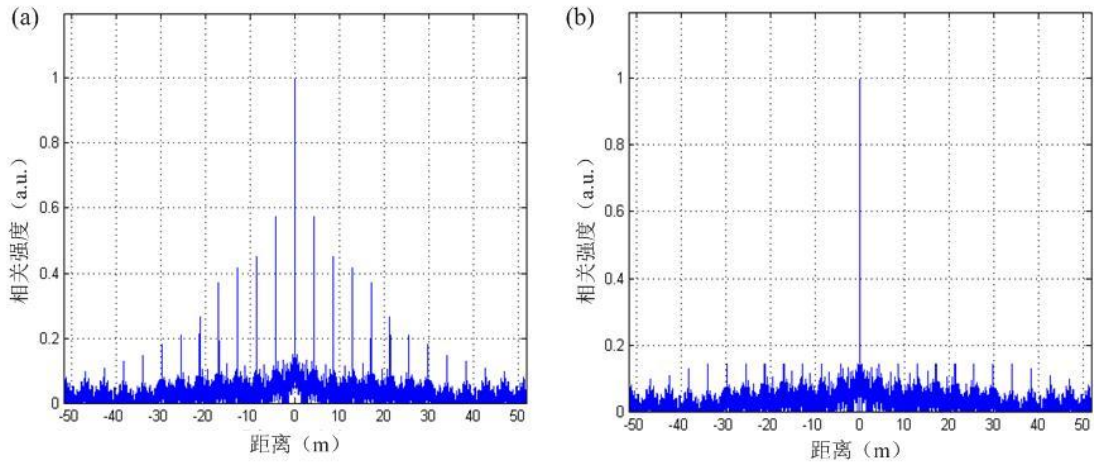


图 4-5 (a) 混沌信号的自相关曲线; (b) 滤除高阶峰的混沌信号自相关曲线

开始的实验待测光纤为 1m、2m 和 3m 的三根跳线,图 4-6(a)中所示的三个峰分别表示三根跳线的互相关检测曲线。考虑到环形器两端的跳线长度大约 2.7m,三峰的位置位于 3.740708m、4.772093m、5.850029m 非常接近实际的待测光纤长度。图 4-6(b)~(d)分别表示长度为 15.76870m、109.572962m 和 289.833683m 的三根尾纤的互相关曲线,SOA 环腔光时域反射仪的动态检测范围主要是由输出混沌信号的功率、光纤损耗与实时示波器 OSC 所能记录的最大时间长度。

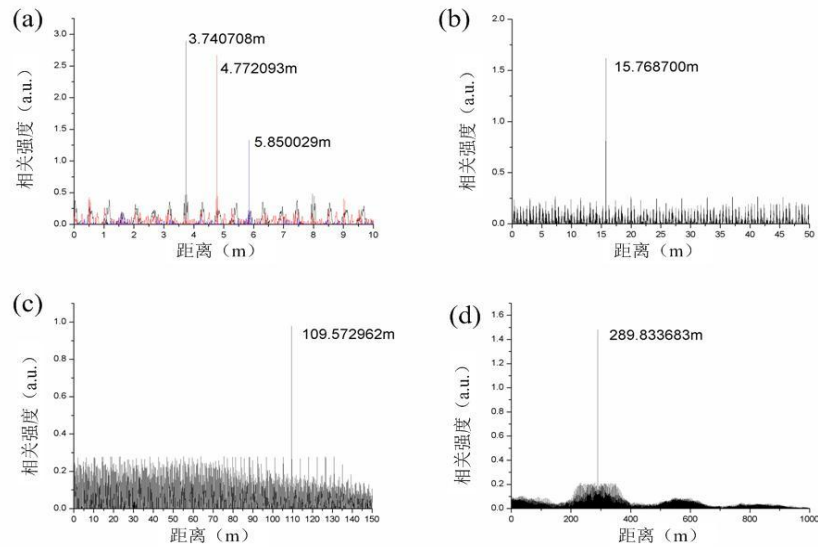


图 4-6 (a) 1m、2m 和 3m 跳线的相关检测曲线；(b) 长度约为 13m 的尾纤互相关曲线；
(c) 长度约为 100m 的尾纤互相关曲线；(d) 长度约为 290m 的尾纤互相关曲线

为了有效地测试本系统的空间分辨率,我们从待测尾纤的尾端剪切下一小段光纤,并将剪切前后探测到的尾纤长度差与实际剪切下的光纤长度进行对比。由于剪切下的光纤很小切光纤有一定的柔韧性,我们很难衡量通过使用传统的游标卡尺来准确测量光纤的长度。所以我们对比了剪切下来的短光纤与一个透明的尺子,通过显微镜放大光纤来测量光纤的头和尾。图 4-7(a)显示了长度约为 13m 的尾纤剪切前后探测到的光纤长度差,图 4-7(b)是显微镜观察到的从 13m 尾纤剪切下的光纤图像截图。互相关探测到的值差为 9.207mm,剪切下来的光纤长度是 9.160mm。实验结果表明,本系统可以达到大约 50 μ m 空间分辨率。

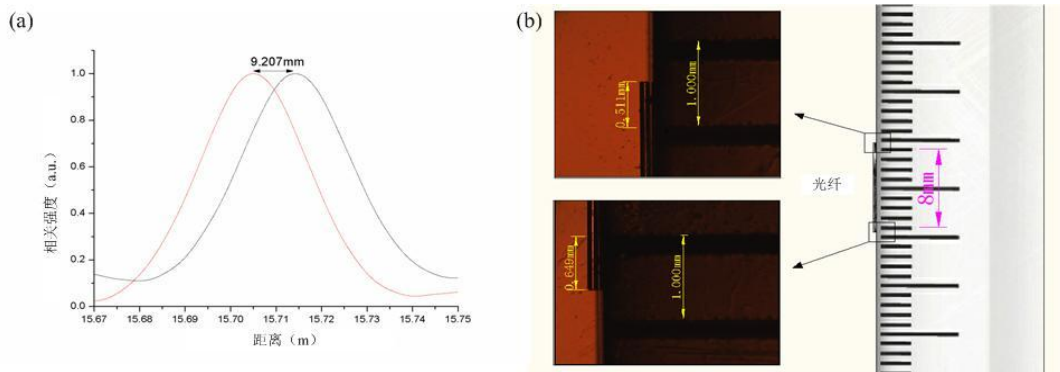


图 4-7 (a) 13m 尾纤剪切前后自相关曲线图；(b) 显微镜观察到的剪切下来的光纤长度测量图

图 4-8 表示探测系统在时间上的稳定性,我们每隔三分钟就测量一下 13m 尾纤的

断点位置，测量的结果分别是 15.744313m、15.744169m、15.744251m、15.744045m、15.744251m、15.744024m 和 15.744086m，测量的平均值为 15.744163m，所以我们确定该系统的测量波动在 $\pm 150\mu\text{m}$ 。

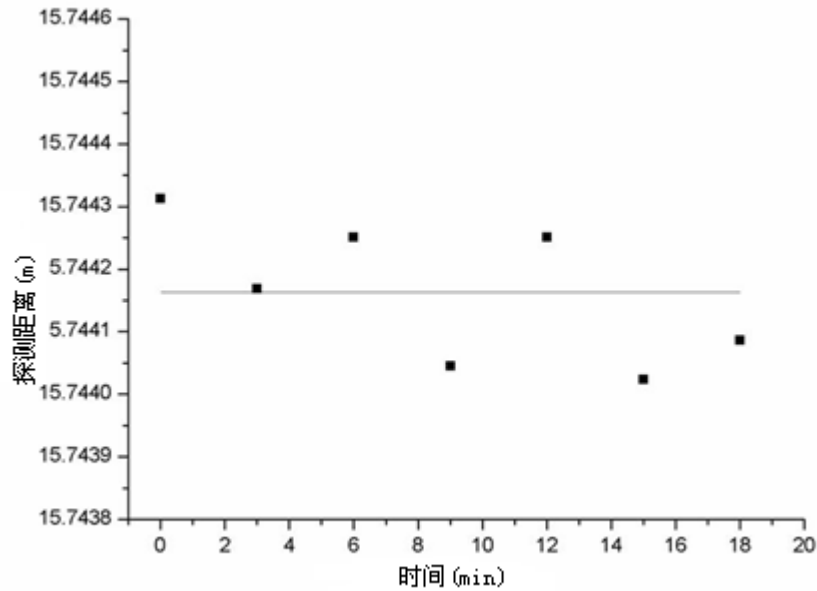


图 4-8 每隔 3 分钟记录的自相关峰位置（图中的实线表示数据的均值）

4.4 本章小结

本章提出了一种基于 SOA 环腔的新型混沌光源，然后利用这一混沌光源与混沌信号相关技术设计了一套光时域反射仪，并用来测量不同长度的光纤断点位置，实验结果显示该光纤故障定位系统的空间分辨率为 $50\mu\text{m}$ ，测量的稳定性为 $\pm 150\mu\text{m}$ 。

5 总结与展望

光纤传感器是随着光纤制作技术发展而发展起来的，并随着信息时代的需要及物联网等新技术的要求而快速成长，光纤传感技术广泛应用在航天航空、建筑材料、电力监测、石油安全以及智能城市等领域，并为社会的进步做出重要的贡献。光纤传感器可以对温度、应力、折射率、电磁场、加速度等物理量进行检测，目前常用的光纤传感技术有光纤光栅传感技术、光纤陀螺技术、光纤等离子体传感技术、光纤倏逝波传感技术、光纤干涉传感技术，光纤传感器也具有的一些独特的优点，比如光纤传感器体积小、质量轻、易塑性、对极限环境有较高的适应性、抗强电磁等。随着这些光纤传感技术的发展以及不断产生的新型光纤传感技术的诞生，光纤传感器的优点也会随之变得更加突出，而光纤传感器在未来的生产生活及社会科研中也必将有更加重要的作用。

如上文所述，本论文除了总结了光纤传感器相关领域的背景，也根据我们自己的工作介绍了三部分的研究成果，在第二章的折射率光纤传感技术研究工作中，我们证明了载氢光纤熔接气泡的损耗主要由光纤熔接气泡部分纤芯微弯曲造成的，并基于此原理之上提出了一种简单易行且经济的新折射率测量方法。在第三章中我们依据光纤光栅 F-P 梳状滤波器光谱中不同相邻窄带带通间隔距离的不同这一特性，提出了一种温度传感解调方法，这种方法将采用了传感中不常用的拍频技术，实现了在一定温度范围内的温度传感。在第四章中提出了一种基于半导体光放大器的环腔混沌光源，这种环腔光源取消了常用的滤波器、隔离器等常用的光纤激光器无源器件，降低了系统的复杂性及费用，并产生了性能良好的光混沌信号，最后我们依据 SOA 环腔混沌光源及混沌光相干技术提出了一种高稳定、高精度的混沌光时域反射仪技术。

文章中叙述的内容已有阶段性成果，但其实用性、灵敏度及稳定性仍有很大的上升空间：

(1) 在微弯曲光纤折射率传感研究中，气泡产生的弯曲效果虽然有一定的效果，但其最大的问题在于制作的重复率低，为了提升光纤气泡的重复率，这需要特殊光纤的

支持，能够开发响应的特殊光纤可以实现更高的灵敏度及微弯曲光纤制作重复率。

(2) 在双波长拍频温度传感实验中，其灵敏度和传感范围均有一定的限制，正如实验结果分析中提出的，我们可以从 FBG-FPF 制作出发，以改变 FBG-FPF 的参数来取得更高的灵敏度及传感范围。

(3) 在光纤故障定位系统实验中，实验取得了高精度及高稳定性的光纤故障定位结果，证明了混沌光信号相干技术可以实现微米级光纤定位，但实验要求的光纤端面有一定的反射率，而当光纤端面反射低时就很难检测到返回光信号，如果能够解决这一问题无疑将会使这种系统更加具有使用性。

随着科学技术的发展，光纤传感器也逐渐向着微型化、智能化、高灵敏等方向发展，光纤传感技术的应用已经在现代社会中产生了重要的作用，而随着光纤传感器功能的完善以及种类的健全，其必将极大的推动各行业各领域建设向前大步发展。

致谢

首先我要感谢我的指导老师夏历副教授，本论文的完成有着导师大量的心血和悉心的指导。无论是硕士的开题报告和实验学习，还是毕业论文的写作，甚至于日常的生活，导师都给予了无微不至的关心，特别是在我学习工作中遇到困难以及迷茫时，导师都以极大的耐心给我指导并对我寄予希望。在这些对我的帮助中无不体现了夏历老师其渊博的科学知识、严谨的治学态度、热情宽容的为人性格以及诲人不倦的教师品德。在这两年半的研究生学习生涯里，老师的一言一行于我今后的做人做事莫不产生了极大的影响，这段难忘的记忆亦将激励我以后能后不断前进，在我以后有限的学习及工作生活中最大的丰富我的人生，因此在这即将结束的学生生涯之前，我向我的导师表达最由衷的感谢以及最崇高的敬意。

在攻读硕士学位期间，学长张雅婷、周驰，以及郝粮宁、李乐成、帅彬彬等同学给予了我很多帮助和关心，在他们的协助下让我少走了很多弯路。感谢所有的实验室同学，在这个大家庭中学习让我体会到了少有的快乐，这段难忘的时光我将在以后的道路中铭记于心。

除此之外，我还要感谢我的父母、兄弟以及其他亲人，感谢他们在我十八年学涯里给予的默默支持和精神鼓励，使我顺利完成学业。

感谢这些年在学习生活中遇到的朋友同学，感谢你们所有的关心和帮助。

最后由衷的感谢各位评委老师能在百忙之中对论文的审阅，对你们在评阅过程中付出的辛劳在此表示诚挚的谢意！

参考文献

- [1] P. Saidi Reddy. K. Srimannarayana. Enhancing the temperature sensitivity of fiber Bragg grating sensor using bimetallic strip. SPIE, 2012, 8351 : 83511B-1~83511B-6
- [2] Li Xia. Binbin Shuai. Simultaneous measurement of temperature and infinitesimal displacement using the high cladding mode coupling loss in fiber Bragg grating. Sensors and Actuators A, 2012, 176 : 53~56
- [3] Chun-Liu Zhao. Xiufeng Yang. Simultaneous Temperature and Refractive Index Measurements Using a 3° Slanted Multimode Fiber Bragg Grating. Journal of lightwave technology, 2006, 24 (2) : 879~883
- [4] Tao Wei. Jie Huang. Optical fiber sensor based on a radio frequency Mach-Zehnder interferometer. Optics Letters, 2012, 37 (4) : 647~649
- [5] Ainhua Gaston. Ibon Lozano. Evanescent wave optical-fiber sensing (Temperature, Relative Humidity, and PH Sensors). IEEE sensors journal, 2003, 3 (6) : 806~811
- [6] Ziyi Zhang and Xiaoyi Bao. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system. Optics Express, 2008, 16 (14) : 10240~10247
- [7] J. A. Nagel and S. L. Woodward. Long-term monitoring of local temperature and stress changes in a buried fiber-optic cable using a BOTDA. FMC, 2010.1~32
- [8] W Liang. Y Huang. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors. Appl.Phys.Lett. 2005, 86 (15) : 151122~151122-3
- [9] Vikram Bhatia. Ashish M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors. Optics Letters, 1996, 21 (9) : 692~694
- [10] Tina M. Davis, W.David Wilson. Determination of the refractive index increments of small molecules for correction of surface plasmon resonance data. Analytical biochemistry, 2000, 284 (2) : 348~353
- [11] T. Allsop. F. Floreani. K. Jedrzejewski. Refractive index sensing with long-period grating fabricated in biconical tapered fibre. Electronics Letters, 2005, 41 (8) : 471~472
- [12] T Schubert. N Haase. H Kück. Refractive-index measurements using an integrated Mach-Zehnder interferometer. Sensors and Actuators A, 1997, 60 (1~3) : 108~112

华中科技大学硕士学位论文

- [13]ZL Ran. YJ Rao. WJ Liu. Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index. *Optics Express*. 2008, 16 (3) : 2252~2263
- [14]K. I. White. Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fibre refractive index profiles. *Optical and Quantum Electronics*, 1979, 11 (2) : 185~196
- [15]薛梦驰. 光纤弯曲损耗的研究与测试. *电信科学*. 2009, 7: 57~62
- [16]B. D. Gupta. H. Dodeja. A. K. Tomar. Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 28: 1629~1639
- [17]Takashi Takeo and Hajime Hattori. Optical fiber sensor for measuring refractive index. *Jpn. J. Appl Phys*, 1982, 21: 1509~1512
- [18]J. Canning. A. Canagasabey. and N. Groothoff. UV irradiation of polymer coatings on optical fibre. *Opt. Communications*, 2002, 214 (1~6) : 141~145
- [19]Liao Yanbiao. *Fiber Optics*. Beijing: Tsinghua Publishing House. 2000.41~43
- [20]Jiang Hua, zhang Jing. Analysis on bending loss of single-mode fiber. *Communications Technology*. 2010, 43 (04) : 67~69
- [21]Harris. A. Castle. P. Bend loss measurements on high numerical aperture single-mode fibers as a function of wavelength and bend radius. *Lightwave Technology*, 2008, 4 (1):34~40
- [22]Rogers A J. Distributed optical fiber sensors for the measurement of pressure, strain and temperature. *Phys. Report*, 1988, 169 (2) : 118~119
- [23]汤俊雄. 光拍频和干涉现象. *大学物理*, 1990, 01 : 10~12
- [24]Pengchun Peng. Jiahe Lin. Intensity and wavelength-division multiplexing FBG sensor system using a tunable multiport fiber ring laser. *PTL*, 2004, 16 : 230~232
- [25]L. Talaverano. S. Abad. S. Jarabo. and M. López-Amo. Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(4) : 553~ 558
- [26]C.-H. Yeh. T.-T. Huang. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation. *Optics Express*, 2006, 15(2) : 382~386

华中科技大学硕士学位论文

- [27]梁磊. 姜德生. 周雪芳. 光纤 Bragg 光栅传感器在桥梁工程中的应用. 光学与光电技术, 2003, 1 (02) : 36~39
- [28]代森. 黄勇林. 光纤布拉格光栅传感器设计研究. 技术运用, 2010,1: 64~68
- [29]PJ Lemaire, Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibers. Electronics Letters, 1993, 29 (13) : 1191~1193
- [30]J. L. Zhou. L. Xia. X. P. Cheng. Photonic generation of tunable microwave signals by beating a dual-wavelength single longitudinal mode fiber ring laser. Appl. Phys. 2008, B 91 : 99~103
- [31]单超. 方捻和王陆唐等. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法. 光学学报, 2010, 30(2) : 335~339
- [32]M. K. Barnoski. M. D. Rourke. S. M. Jensen, and R. T. Melville. Optical time domain reflectometer. Applied Optics, 1977, 16 (9) : 2375~2379
- [33]Legr é M. Thew R, Zbinden H. High resolution optical time domain reflectometer based on 1.55 μm up-conversion photon-counting module. Opt. Express, 2007, 15(13) : 8237~8242
- [34]Wielandy S. Fishteyn M. Zhu B. Optical performance monitoring using nonlinear detection. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(3) : 784~793
- [35]Gilgen. H.H. Novak. R.P. Salathe. R.P. Hodel. W. Beaud. P. Submillimeter optical reflectometry. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7 (8) : 1225~1233
- [36]Clivaz. X. Marquis-Weible. F. Salathe. R.P. Optical low coherence reflectometry with 1.9 μm spatial resolution. Electronics Letters, 1992, 28 (16) : 1553~1555
- [37]Beaud. P. Schutz. J. Hodel. W. Weber. H.P. Gilgen, H.H. Salathe. R.P. Optical reflectometry with micrometer resolution for the investigation of integrated optical devices. Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(4) : 755~759
- [38]Takada. K. Himeno. A. Yukimatsu. K. Resolution control of low-coherence optical time-domain reflectometer between 14 and 290 μm . Photonics Technology Letters, 1991, 3 (7) : 676~678

华中科技大学硕士学位论文

- [39]Iida. D., Izumita. H., Azuma. Y. In-service line monitoring system in pons using 1650-nm brillouin OTDR and fibers with individually assigned BFSs. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27 (20) : 4575~4582
- [40]Y. Takushima and Y. C. Chung. Optical reflectometry based on correlation detection and its application to the in-service monitoring of WDM passive optical network. Optics Express, 2007, 15 (9) : 5318~5326
- [41]Ming-Jiang Zhang. Tie-Gen Liu. An-Bang Wang. Jian-Yu Zheng. Li-Na Meng. Zhao-Xia Zhang, and Yun-Cai Wang. Photonic ultrawideband signal generator using an optically injected chaotic semiconductor laser. Optics Letters, 2011, 36 (6) : 1008~1010
- [42]Yuncaï Wang. Bingjie Wang. and Anbang Wang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode. Photonics Technology Letters, 2008, 20 (19) : 1636~1638
- [43]Anbang Wang. Mingjiang Zhang. Hang Xu and Yuncai Wang. Location of wire faults using chaotic signal. Electron Device Letters, 2011, 32 (3) : 372~374

附录 1 攻读硕士学位期间发表论文目录

- [1] **Zhenhai Xie.** Li Xia. Lecheng Li. Deming Liu. A novel refractive index sensor based on microbend loss. *OPTIK*, 2012, IJLEO-52585
- [2] **Zhenhai Xie.** Li Xia. Lecheng Li. Deming Liu. A novel sensor based on a dual-wavelength multilongitudinal modes fiber ring laser. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, 55 (1) : 15~16
- [3] **Zhenhai Xie.** Li Xia. Yuanwu Wang. Chengliang Yang. Chi Cheng. Deming Liu. Fiber fault detection with high accuracy using chaotic signal from a SOA ring reflectometry. *Photonics Technology Letters*, 2012, accepted
- [4] Lecheng Li. Li Xia. **Zhenhai Xie.** and Deming Liu. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications. *Optics Express*, 2012, 20 (10) : 11109~11120
- [5] Lecheng Li. Li Xia. **Zhenhai Xie.** Liangning Hao. Binbin Shuai. Deming Liu. In-line fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on thinned fiber. *Sensors and Actuators A*, 2012, 180: 19~24
- [6] L.C. Li. L. Xia. **Z.H. Xie** and D.M. Liu. Numerical analysis of the three co- directional guided modes in optical period dielectric waveguides using inverse Gaussian apodization. *Eur. Phys. J. D*, 2012, 66:94
- [7] Lecheng Li, Xia Li, **Zhenhai Xie**, Zhaolong Liao, Feng Tu, Deming Liu. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based Mach-Zehnder interferometer. *Optics Communications*, 2012, 285 (19) : 3945~3949