分类号:**O43** 密 级:公开 学校代码: 10697 学 号: 201410098



カバスジ Northwest University

# 博士学位论文 DOCTORAL DISSERTATION

# 新型光纤磁场传感技术研究

学科名称:光学

作 者:张军英 指导老师:乔学光教授

西北大学学位评定委员会

二〇一九年十月

# Study on novel fiber-optic magnetic sensors

A dissertation submitted to Northwest University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in 2019

By

Junying Zhang Supervisor: Xueguang Qiao Professor October 2019

## 西北大学学位论文知识产权声明书

本人完全了解西北大学关于收集、保存、使用学位论文的规定。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。本人 允许论文被查阅和借阅。本人授权西北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。同时授权中国科学技术信息研究所等机构 将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》或其它相关数据库。

保密论文待解密后适用本声明。

学位论文作者签名: 张军英 指导教师签名: 2019年12月9日 2019年12月9日

## 西北大学学位论文独创性声明

本人声明: 所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作 及取得的研究成果。据我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外, 本论文不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得西 北大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的 同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢 意。学位论文作者签名: 张宾莫

2019年12月9日

## 摘要

在油气田勘探测井和生产测井行业中,一般采用磁定位测井来获得准确的磁定位 曲线,以此作为测井项目中校准深度的基础资料,对于快速准确定位套管结构、测井 设备的位置和检测油套管中的损伤等都具有重要意义。光纤传感器具有尺寸小、灵敏 度高、耐腐蚀、易复用、多物理量测量、可工作在井中的恶劣环境和对测量对象无影 响等优势,在测井行业中受到极大关注。本论文主要工作是基于微米锥形光纤和包层 型光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG)的传感机理的研究,提出并制作了多 种具有磁场方向相关性的光纤磁场传感器,并对这些传感器进行了理论分析和实验研 究。论文的主要内容如下:

1. 综述了光纤磁场传感器分类和研究现状,研究了微米锥形光纤和包层型光纤 布拉格光栅的模式耦合特性, Mach-Zehnder 干涉型和包层型光纤布拉格光栅的磁场 传感器的传感机理,对比分析了几种常见的微米锥形光纤的制作方法。

2. 提出了一种基于圆柱光学微谐振腔的回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)型磁场传感器,并对传感器进行了理论分析和实验研究。实验结果表明,在 40-140 Oe 磁场强度范围内,该传感器的磁场灵敏度为-0.04 dB/Oe。

3. 研制了两种 Mach-Zehnder 干涉型光纤磁场传感器。(1)提出了一种基于微 米锥形细芯光纤结合磁流体的磁场传感器,对传感器进行了理论分析和实验研究。利 用锥形细芯光纤的纤芯基模和包层模形成干涉,由外界磁场强度改变引起干涉光谱规 律性变化的机理,实现了对磁场强度高灵敏测量。实验结果表明,在40-160 Oe 磁场 强度范围内,该传感器的磁场灵敏度为-0.10 dB/Oe。(2)在锥形少模光纤的锥区利用 飞秒激光进行折射率调制形成非圆对称结构,研制了一种具有磁场方向相关性的磁场 传感器,给出了一种激发两模光纤中 LP<sub>11</sub>模的方法。LP<sub>11</sub>模的有效折射率对外界环 境折射率变化较敏感,使该传感器的干涉谱对外界磁场响应明显。实验结果表明,在 40-120 Oe 磁场强度范围内,该传感器的磁场灵敏度可达 0.11 dB/Oe,并呈现了显著 的磁场方向相关性。传感器的温度响应测试结果表明温度变化对磁场测量引入的误差 较小,可以忽略。

4. 利用飞秒激光器和相位掩模板技术,在多包层光纤(Multi-Clad Fiber, MCLF)的纤芯和包层上同时刻写光纤布拉格光栅,充分激发纤芯基模和包层模,提高耦合效

率及稳定性,并与磁性材料有效结合,研制了两种高灵敏的光纤磁场传感器。(1)利用高阶包层模式对折射率变化的敏感特性,结合磁流体实现磁场强度大小和方向相关性测量。实验结果表明,该结构传感器在 60-110 Oe 磁场范围内,磁场灵敏度高达-0.14 dB/Oe;传感器温度灵敏度为 12 pm/°C。该结构是一种磁场和温度同时测量的传感器。 (2)利用低阶包层模对弯曲的敏感特性,结合 PW-080 线性磁敏感材料制作的磁场传感器,实现了对磁场强度高灵敏测量,但具体数值需要进一步分析,同时该传感器呈现了显著的磁场方向相关性。

本论文的光纤磁场传感器都是基于能量解调的方式,相比于波长解调的传感器提 高了传感的稳定性。同时,具有结构紧凑、灵敏度较高、易复用、有方向相关性等优 点,对石油测井行业磁场传感检测仪器的研制提供了基础。

关键词:光纤磁场传感器,光纤布拉格光栅,模式干涉,锥形光纤,磁流体

## ABSTRACT

In oil and gas exploration and production logging industry, magnetic positioning logging is used to obtain accurate the CCL curve as the basic data of calibration depth in logging project. It is great significance to quickly and accurately locate the casing structure, the logging equipment and the damage in the oil casing. Optical fiber sensors have advantages of small size, high sensitivity, corrosion resistance, easy to reuse, multi-parameter monitor, capable of working under the logging and no pollution to the measured objects. The theoretical basis of this paper is the mode interference theory of tapered fiber and FBG. Several novel kinds of fiber Directional dependent magnetic field sensors are proposed and fabricated, which are theoretically analyzed and experimentally studied. The research contents are mainly as follows:

1. The category and research status of fiber magnetic field sensor were reviewed in the background section. In the theoretical part, the mode-coupling characteristics of micron tapered fiber and cladding FBG were analyzed, and the sensing theory of the Mach-Zehnder interference and cladding FBG magnetic field sensor were discussed. Meanwhile, several fabrication methods of micron conical fiber are introduced.

2. A WGM magnetic field sensor based on a tapered single mode fiber and optical micro resonators is proposed and experimentally demonstrated. The harmonic peaks of the proposed sensor are measured and theoretically analyzed at different magnetic field strength. The results show that the magnetic field sensitivity reaches up to -0.04 dB/Oe in the range of 40-140 Oe.

3. Two kinds of MZI magnetic field sensors based on a tapered fiber and magnetic fluid are proposed and experimentally demonstrated. (1) A compact fiber-optic magnetic field sensor based on a tapered thin-core fiber and magnetic fluid is proposed. The modal interference effect is caused by the core mode and excited eigen modes in the TTCF cladding. The transmission spectra of the proposed sensor are measured and theoretically analyzed at different magnetic field strength. The results show that the magnetic field sensitivity reaches up to -0.10 dB/Oe in the range of 40-160 Oe. The cross sensitivity of magnetic field and temperature of the sensor was analyzed. (2) A compact fiber-optic magnetic field sensor based on a tapered two-mode fiber (TTMF) and femtosecond laser refractive index modulation (RIM) is proposed. The additional refractive-index-modulation

on TMF taper lateral is introduced by femtosecond laser for enhancing the interference intensity. The modal interference effect is mainly caused by  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes, and moreover the RIM provides the sensor a significant direction-dependence due to its asymmetric position relatively to fiber axis. The spectral response to magnetic field intensity and direction of the proposed sensors have been investigated. And, the results show that the wavelength-referenced magnetic field sensitivity reaches up to 71.98 pm/Oe in the range of 40-120 Oe and the intensity-referenced sensitivity reaches up to 0.11 dB/Oe. Meanwhile, the sensor presents great directional resolution with intensity-reference (0.11 dB/deg). The temperature test results of the sensor show that the error caused by the temperature change to the magnetic field measurement is small and can be ignored. The sensor is a non - cross sensitive magnetic field sensor.

4 The FBG was simultaneously written on the core and cladding of multi-clad Fiber (MCLF) based on the femtosecond laser and phase mask technology. Two kinds of magnetic field sensors were made based cladding FBG. (1) The high-order cladding mode of the cladding FBG on MCLF showed great sensitivity and direction on dependence for the magnetic field measurement. The results show that the magnetic field sensitivity reaches up to -0.14 dB/Oe in the range of 60-110 Oe. And the temperature sensitivity reaches up to 12 pm/°C. The sensor can simultaneously measure both magnetic fields and temperature. (2) The low-order cladding mode of the cladding FBG on MCLF showed great sensitivity and direction on dependence for the bending measurement. The magnetic field sensor is made based on the PW-080 linear magnetic material and the cladding FBG. The results show that the sensor have high sensitivity and direction on dependence to magnetic field.

The intensity-based interrogation of proposed magnetic field sensor improved the stability compared with the wave length demodulation. Meanwhile, these sensors have advantages of compact structure, high sensitivity, and orientation relativity, which provides the basis for the development of magnetic field sensor in oil logging industry.

Keywords: Fiber optic magnetic field sensor, FBG, Mode interference, Micron tapered fiber, Magnetic fluid

# 目录

摘要			
ABSTRACT			
第一章	绪论1		
1.1	研究背景及意义1		
1.2	光纤传感技术3		
	1.2.1 光纤传感器基本原理和特点		
	1.2.2 光纤传感器的分类		
1.3	光纤磁场传感技术		
	1.3.1 磁场传感器概述		
	1.3.2 光纤磁场传感器类型7		
	1.3.3 基于磁流体光纤磁场传感器研究现状		
1.4	研究内容10		
1.5	论文结构11		
第二章	微米锥形光纤和光纤布拉格光栅传感理论13		
2.1	锥形光纤传输理论13		
	2.1.1 锥形光纤的光线理论		
	2.1.2 锥形光纤的波动理论15		
	2.1.3 锥形光纤传输相关参数和功率分布		
2.2	锥形光纤磁场传感器传感原理21		
	2.2.1 回音壁模式型光纤磁场传感器传感原理		
	2.2.2 Mach-Zehnder 干涉型磁场传感器传感原理23		
2.3	光纤布拉格光栅传感原理		
	2.3.1 光纤布拉格光栅耦合模理论		
	2.3.2 倾斜光栅耦合模理论		
	2.3.3 光纤布拉格光栅传感理论		
	2.3.4 光纤布拉格光栅刻写技术		
2.4	本章小结		
第三章	基于回音壁模式的光纤磁场传感器35		
3.1	磁流体概述		
	3.1.1 磁流体的成分		

	3.1.2 磁流体光学特性
3.2	回音壁模式型磁场传感器的理论分析和制作38
	3.2.1 理论分析
	3.2.2 锥形光纤的制备工艺40
	3.2.3 传感器的制作
3.3	实验结果与讨论
3.4	本章小结
第四章	基于锥形细芯光纤磁场传感器46
4.1	基于 Mach-Zehnder 干涉的光纤磁场传感器46
	4.1.1 传感器的制作
	4.1.2 理论分析
4.2	实验结果与讨论
	4.2.1 磁场传感实验
	4.2.2温度传感实验
	4.2.3 磁场和温度交叉灵敏问题
4.3	本章小结
第五章	基于锥形少模光纤磁场传感器54
5.1	传感器的传感原理和制作54
	5.1.1 传感器的制作
	5.1.2 传感器的传感原理
5.2	实验结果和讨论
	5.2.1 磁场传感实验
	5.2.2温度传感实验61
5.3	本章小结
第六章	包层型光纤光栅磁场传感器63
6.1	基于高阶包层模的传感器制作及传感原理63
	6.1.1 传感器的制作 64
	6.1.2 传感器传感原理
	6.1.3 磁场测量实验
	6.1.4 温度测量实验
6.2	基于低阶包层模的传感器制作及传感原理72
	6.2.1 传感器的制作
	6.2.2 传感器传感原理
	6.2.3 磁场测量实验

6.3	本章小节	
第七章	总结和展望	
7.1	全文总结	
7.2	工作展望	
参考文献		
致谢1		
攻读博士学位期间取得的科研成果		
作者简介3		

# 第一章 绪论

传感技术是现代信息产业的三大支柱之一,在信息系统中扮演着"感官"的角色<sup>[1]</sup>, 作为信息获取的关键部件,是信息传输、处理的基础,其重要性显而易见。从上世纪的 "863"计划到现在的"十二五"和"十三五"规划,传感研究在科研攻关项目中都有 涉及。传感技术不仅需要材料学、光学、电磁学等多个学科的知识作为基础,同时也需 要信号处理、计算机、半导体等多种技术促进发展,它是一种相互交叉融合而成的技术。

光纤不仅可以作为光传输介质实现长距离信号的传输,而且光波在光纤中传输时, 表征光波的特征参量对外界因素比较敏感,使得光纤可以作为传感器的原件制成光纤传 感器,并成为传感技术的一个重要分支<sup>[2]</sup>。尤其是自华裔物理学家高锟在 1966 年开创性 地提出了光纤可实现长距离信号的传输,实验技术上在 1979 年将 1550 nm 波长附近的 传输损耗降至 0.2 dB/km,使得光纤传感得以迅速发展,逐渐成为世界各国的热点研究 对象<sup>[3]</sup>。光纤传感器具有其他类型传感器无可比拟的优点,在国民经济和国防军事领域, 如石油石化、生物医学、电力工业的安全监测、大型构件的健康诊断和航空航天、国土 安全防卫等,具有非常广阔的应用前景<sup>[4-8]</sup>。

### 1.1 研究背景及意义

目前国内外油气田勘探测井和生产测井行业中主要使用的定位传感器是电类磁定 位测井传感器。在生产测井时,通过测量井下套管接箍的个数确定测井设备所在地层的 深度。这类传感器由装在铜制外壳内的两个永久磁铁和线圈组成。工作原理是当定位传 感器沿井筒移动时,由于筒内油管和套管接箍、封隔器、配水器、导锥等内径和管壁厚 度的变化,导致传感器周围介质磁阻的变化,从而引起测量线圈中磁力线的变化,磁通 量密度发生改变,在线圈两端产生感应电动势。磁通量变化率越大,线圈中产生的感应 电动势就越大。用记录仪器记录该信号随深度的变化曲线(感应电流的大小),同时配 合测到的自然伽马曲线就可以确定井下深度、井中射孔位置和油套管损伤位置等。以 CCL21 (casing collar locator 21)磁定位测井仪为例,给出这类仪器的相关技术指标, 如表 1.1.1 所示。 磁定位测井仪为井下"有源"器件,极易受井中环境、强电磁干扰、信号传输限制 等影响,很难实现高精度、高可靠性的测量,且尺寸较大,极大地限制了磁定位测井仪 的应用范围。但石油工业中普遍采用磁定位测井来获得磁定位曲线,作为测井项目中校 准深度的基础资料,从而对套管结构和测井设备的位置提供准确定位,为实时测井中及 时调节射孔位置、准确确定井中工具长度、初步判断套管腐蚀情况等提供可靠的参考。 此外,油气田井中使用的油套管随着年限的增加,大部分都存在一定程度的损伤,而这 些损伤又影响到石油和天然气的开采,进一步又会影响到油气公司的经济效益。目前, 用于检测油套管损伤部位的仪器,只能在取出油管的条件下检测单个套管。检测时间较 长,成本较大。如何快速准确地检测油套管损伤部位,在油气田开采中是不可忽视的。 无论井中测井设备的定位还是油套管损伤探测,都可以以传感器测量数据为基础解决定 位和判断探伤的问题。

光纤传感器具有的优点与井中工作环境和井中使用的磁传感器高探测灵敏度的要求相吻合,受到了国内外的关注,并展开相关研究。

传输方式	28 芯传输
电缆要求	多芯电缆
最高工作温度	175° C
最大工作压力	140 MPa
直径	Ø 85.8 mm
总长	1011 mm
连接长度	573 mm
CCL 零长	305 mm
连接螺纹	标准 37 头

表 1.1.1 CCL21 磁定位测井仪技术指标

西北大学光纤传感实验室自成立以来,主要研究应用于油气勘探和油气测井中温度、 应变、加速度、振动和流量等高灵敏、高精度的光纤传感器。与目前电磁类传感器相比, 具有方向识别性好、检测灵敏度高;传感系统复用性好,可实现网络化大数据检测;传 感器井下"无源"、不受强电磁场干扰、耐高温高压,适合井中恶劣环境长期使用等优

山口空町川川。

此外,光纤磁场传感器作为光纤传感器的一种,近些年的发展非常迅速,在现代国防、地球物理、电力工业、生物医学和宇航工程等科学领域对磁场传感的使用也非常广泛<sup>[9-15]</sup>,各领域需要测量的磁场从微弱磁场到几个高斯再到几千个高斯不等。例如通过测量海洋磁场探测潜艇、搜索武器;通过测量高压输电线路周围的磁场来感知其中电流的变化;通过测量心脏跳动和颅内磁场变化诊断疾病,等等。

#### 1.2 光纤传感技术

#### 1.2.1 光纤传感器基本原理和特点

光纤(简称光导纤维),是一种基于光的全反射原理工作在光波波段的介质波导, 其材质一般为石英玻璃。标准单模光纤的基本结构是三层圆柱介质,内层为纤芯,掺杂



场、转动等)的变化而变化,通过解调光场输出的光波信号检测所需物理量。这就是光

纤传感基本原理,如图 1.2.1 所示。

与传统电类传感器相比,光纤传感器显著的优势和特点,主要包括:

(1)抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀,可工作于强电磁场、易燃易爆、强腐蚀性等环境,安全可靠。

(2) 灵敏度和分辨率高,可用于微小应变、微小温度变化以及微弱电磁场的探测。

(3)重量轻、体积小、外形可变、便于小型化,有利于航空、航天及狭窄空间的应用。

(4)成本低、测量对象广、可兼容,传感器对被测环境影响小,尤其在医药生物 领域的应用极为有利。

(5)可以实现多点和远距离检测,易于多参量复用,便于多个传感器组网,形成 光纤传感网络,等等。

#### 1.2.2 光纤传感器的分类

光纤传感器是基于光纤传感原理中被测物理量对光纤中的光波信号进行调制而实 现测量的智能检测器件。根据光纤在传感器中是否有能量转换的作用可分为传光型(非 功能型)和传感型(或功能型)两大类<sup>[16]</sup>。传光型光纤传感器中光纤仅作为光波的传输 介质,利用其它敏感元件或材料测得物理量,不具备光纤自身的传感优点。传感型光纤 传感器是利用光纤自身作为敏感元件来感知外界环境参量的变化,具有传感合一的特点。 这种传感器又分为两种,第一种是测量量直接作用于光纤对内部传输的光波进行调制; 第二种就是通过敏感材料间接对光纤内传输的光波进行调制。本论文所研制的光纤磁场 传感器均属于功能型光纤传感器的第二种。根据光波在光纤中传输时的调制机理,可将 光纤传感器分为强度调制型、相位调制型、波长调制型和偏振态调制型四种<sup>[17]</sup>。

强度调制型光纤传感器是利用外界因素对光纤中光波强度或振幅引起的变化来探 测物理量<sup>[18-20]</sup>。改变光纤中光的强度或振幅的方式主要有:改变光纤弯曲状态、改变耦 合条件,改变对光波的吸收情况,改变折射率分布等等。例如光纤微弯传感器,当外界 引起传感器微弯时,光纤中激发出包层模,使得部分纤芯模能量转化为包层模能量,通 过检测模式的能量变化来测量位移或振动等。并且激发的包层模越多、阶数越高,传感 器灵敏度越高。本论文所设计制作的传感器均属于强度调制型光纤传感器,这类传感器 相较波长解调具有较高稳定性。 相位调制型光纤传感器是利用光纤中干涉光波相位或光程差的变化来探测物理量 <sup>[21-23]</sup>,这类传感器的优点在于有较高的灵敏度和分辨率,有灵活多变的几何结构。根据 传统光学中干涉仪的基本原理,将干涉型光纤传感器分为 Mach-Zehnder (M-Z)光纤干 涉仪、Michelson 光纤干涉仪、Fabry-Perot (F-P)光纤干涉仪、Sagnac 光纤干涉仪、光纤 环形腔干涉仪和光纤白光干涉仪等。

常用的干涉仪是前四种,其中 M-Z 和 Michelson 光纤干涉仪属于双光束干涉。

(1) M-Z 干涉仪是将光波通过定向耦合器分成两路相干光,分别送入参考臂和探测臂(光纤长度或折射率变化),之后再次通过另一耦合器耦合产生干涉效应。(2) Michelson 光纤干涉仪用一光纤耦合器,通过两根端面镀有高反射膜的光纤实现光路逆转,反射的两光波再次通过同一耦合器时产生干涉。这两种传感器具有较高灵敏度。(3) F-P 光纤干涉仪是通过光纤微结构处理或加工,在光纤内部或光纤端面形成两个反射面 而构成的微腔型干涉仪,属于多光束干涉。当外界物理量变化时引起微腔长度(腔长)的变化,导致两反射光的干涉信号发生变化。但输出的函数较复杂,对光源线宽要求苛刻。(4) Sagnac 光纤干涉仪是通过检测同一根光纤中沿相反方向传输的两光波角速度 的变化测量外界物理量的变化,最典型的应用就是光纤陀螺仪。近年来随着光纤加工技术的进步,出现了很多干涉结构的光纤传感器。前三种干涉仪灵敏度较高,相对稳定,使用设计者较多。例如单模-多模-单模模间干涉结构,光纤拉锥、错位熔接和纤芯失配 熔接等的 M-Z 干涉结构,利用氢氟酸腐蚀或飞秒激光微加工技术实现了多种不同干涉 机制的干涉结构。

波长调制型光纤传感器是利用外界物理量引起的传输光波的波长的变化来探测待测量<sup>[24-26]</sup>,通常通过光谱仪进行信号解调。显著的优点有抗干扰能力强、结构简单、小 巧、重复性好、易复用等。常见的波长调制型光纤传感器是 FBG 传感器,基于外界物 理量对 FBG 中心波长的调制来获取传感信息,FBG 的中心波长由光栅周期和反向耦合 模的有效折射率两个参量共同决定,任何参量发生变化都会引起 FBG 中心波长的漂移。 温度、应力和应变最易引起中心波长的漂移,因此可以利用 FBG 制成光纤温度或应力 应变传感器。

偏振态调制型传感器是利用光波的偏振态的变化来探测物理量。最典型的例子就是适用于高压输电线的光纤电流传感器。它的基本原理是利用光纤材料的 Faraday 效应。

但由于光纤中的偏振态容易在外界因素的扰动下产生很大的变化,甚至破坏仪器的正常 工作,使得这种传感器在稳定工作和灵敏检测上存在一定的困难。

此外,根据需要检测的物理量,光纤传感器又可分为位移传感器<sup>[27,28]</sup>、加速度传感器<sup>[29,30]</sup>、温湿度传感器<sup>[31-33]</sup>、应变传感器<sup>[34,35]</sup>、折射率传感器<sup>[36,37]</sup>、光纤振动传感器<sup>[38,39]</sup>、光纤流量传感器<sup>[40,41]</sup>、磁场传感器<sup>[42-44]</sup>、气体传感器<sup>[45,46]</sup>等。

### 1.3 光纤磁场传感技术

#### 1.3.1 磁场传感器概述

磁场传感器,是获取磁信息的核心器件。根据应用的环境不同,所测磁场不同,范 围覆盖了从人体磁场的 10<sup>-14</sup> T 到 25 T. 弱磁场测量技术在诸多领域都及其重要。

多年来普遍使用的电类磁场传感器有感应线圈磁强计、磁通门磁力仪、质子磁力仪、 光泵磁力仪、磁阻传感器、巨磁阻抗传感器等<sup>[47-49]</sup>。图 1.3.1 给出了比较常用的弱磁场 测量仪器的测量范围。这些传感器普遍存在动态范围小、灵敏度低、抗电磁扰动能力差、 体积笨重、操作复杂、无方向识别性、复用性差、可靠性低等缺点,不能满足磁场实时 大范围检测的需要。



图 1.3.1 常用磁场传感器比较[47]

光纤磁场传感器通过检测光纤内传输光的强度、波长、相位、偏振态等参数感知环 境磁场的强度、方向等信息。这类传感器作为新型磁场测量器件的优点:第一,光纤结 合合适的磁敏材料对磁场响应的速度快、灵敏度高、动态范围宽等优点,能实现永久、 实时在线检测;第二,传感器易于复用和组网,可以实现大面积的同步检测;第三,利 用与传感器相匹配的解调技术可以实现高速信息采集。

国际上许多国家对光纤磁场传感检测技术非常重视,已报道诸多研究成果。美国海 军实验室、美国弗吉尼亚理工大学、美国加利福尼亚大学、美国罗彻斯特大学、英国阿 斯顿大学、英国斯特拉斯克莱德大学、新加坡南洋理工大学、日本东京大学等单位,利 用本国在光通信领域的优势和巨大资金的投入,一直处于光纤传感技术研究的领先地位。 与国外的研究相比,国内对光纤磁场传感技术的研究起步较晚。但经过近些年的努力, 已取得了可喜的进展。目前包括香港理工大学、国防科技大学、北京交通大学、华中科 技大学、南开大学、上海科学技术大学、浙江大学、暨南大学、西安交通大学、\哈尔滨 工程大学等诸多大学和科研院所在从事这方面的研究。光纤自身对环境磁场响应不灵敏, 基于法拉第效应原理的光纤磁场传感器由于结构简单、测量动态范围大已被广泛应用, 但其对弱磁场的测量存在着盲区<sup>[50]</sup>,因此需要结合磁敏材料去测量环境磁场的变化。

1.3.2 光纤磁场传感器类型

目前,光纤磁场传感器使用的磁敏材料有磁致伸缩材料和新型功能材料-磁流体两种。结合磁致伸缩材料的磁致伸缩效应和光纤及光纤光栅的应变特性报道的传感器主要有两类,光纤布喇格光栅型(fiber Bragg Grate, FBG)和光纤干涉型。光纤干涉仪主要有四类,但由于传感原理和对光源及解调的要求,已报道的主要有 Mach-Zehnder 和 Michelson 两种磁场传感器。具体如下:

(1) 光纤布喇格光栅型

将磁致伸缩材料采用粘贴、埋入、镀膜或表面涂覆等方式与 FBG 结合制作传感器。 当外界磁场的变化作用于传感器时,由于磁致伸缩材料感知的拉应力(压应力)的作用, 使材料本身纵向长度增大(或变小)引起 FBG 中心波长发生漂移。这类传感器是基于 FBG 的应变特性实现对磁场的测量<sup>[51]</sup>。

(2) 干涉型

Mach-Zehnder 和 Michelson 干涉型磁场传感器都属于双光束干涉,都是在干涉仪的 信号臂上粘贴磁致伸缩材料制成传感器。当外界磁场的作用导致信号臂的光纤发生微应 变时,改变了传输光波的相位,使干涉仪双臂的光相位差发生变化,输出的干涉光谱发

生变化,从而实现磁场的测量<sup>[52]</sup>。

磁流体是一种新型功能材料,具有优异的光学性能,较易与光纤结合制作光纤磁场 传感器,这类磁场传感器主要利用磁流体对磁场的折射率可调控性影响传输光波的有效 折射率的机理来实现磁场的测量。基于磁流体材料的磁场传感器按照传感机理可分为以 下三种类型:

(1) 光纤光栅型

通过 FBG 的波长或偏振态信息的变化来感知磁场<sup>[53-56]</sup>。主要通过在光纤光栅外包 裹磁流体制作,并为了进一步提高传感器的灵敏度,通过对光纤光栅腐蚀处理或微加工 提高其应变及折射率响应灵敏度。光纤布拉格光栅反射峰的带宽较窄,比较易于复用。 在一根光纤上可以同时级联多个光纤光栅,使之构成传感网络,实现对外界环境中磁场 这一物理量的多点准分布式测量。用 FBG (刻写在高掺杂增益光纤上)构成的分布式反 馈光纤激光器作为传感元件,可以获得线宽较窄、功率较高的激光。通过 FBG 的波长 或拍频信息感知外界环境中的磁场,能够获得较高的探测分辨率。光栅类型主要有布喇 格光栅、长周期光栅、倾斜光栅等。

(2) 干涉型光纤磁场传感器

通过干涉相位或干涉波长信息的变化测量磁场。主要通过在光纤干涉仪端面、侧面涂覆或包裹磁流体材料制作相位调制型磁场传感器,此类传感器对磁场作用极为灵敏,可实现磁场信号的高灵敏感知。已报道的基于磁流体的光纤磁场传感器干涉型的主要有Fabry-Perot干涉型、Mach-Zehnder干涉(MZI)型、Sagnac干涉型<sup>[57-71]</sup>。

(3) 强度型光纤磁场传感器

通过光传输强度信息变化测量磁场。该类传感器主要基于磁敏材料受磁场调制后对 传输光强吸收或偏振态调制。此类传感器稳定性仅受光源波动的影响,稳定性好。包括 有端面反射型、微结构光纤型等多种结构。

基于两种材料的特性和实验室研究基础,我们选用了磁流体作为本论文使用的磁敏 材料。

1.3.3 基于磁流体的光纤磁场传感器研究现状

根据上一小节对以磁流体为磁敏材料的光纤磁场传感器的分类进行研究现状分析, 具体内容如下。

第一类 FBG 型磁场传感器。普通 FBG 的有效折射率不受外界环境折射率的影响, 但通过腐蚀 FBG 的包层直径、端面打磨光纤和特殊光纤上刻写的特殊 FBG 等方法就会 改变这种情况。2011 年, Dai J. 等人提出了一种基于氢氟酸腐蚀后的 FBG 包裹磁流体 的光纤磁场传感器<sup>[53]</sup>,这种传感器主要利用腐蚀后的 FBG 对外界折射率敏感特性和磁 流体在磁场下的折射率可调谐性制备而成,但磁场灵敏度仅为 0.34 pm/Oe。相移光栅、 长周期光栅和倾斜光栅可以激发包层模式,包层模可以感知外界环境的折射率的变化。 2011 年, Candiani 等人报导了基于在微结构光纤上刻写相移光栅,填充功能纳米材料磁 流体的磁场传感器<sup>[54]</sup>; 2012 年, Gao L.等人提出一种基于 CO<sub>2</sub> 激光器刻写的长周期光纤 光栅的磁场传感器,灵敏度可达 17.64 pm/Oe<sup>[55]</sup>; 2013 年 Zheng J. 等人将磁流体包裹在 倾斜光纤光栅的外部制成磁场传感器,传感器灵敏度可达 0.11 dB/Oe<sup>[56]</sup>.这类传感器的 灵敏度相对较低,主要原因是激发的包层模能量较小,且不能对磁场强度的方向进行识 别。

第二类干涉型光纤磁场传感器,最常见是 FP 干涉、MZ 干涉和 Sagnac 干涉型三种 磁场传感器。

(1) 基于 FP 腔干涉的磁场传感器。2010 年,胡涛等人研究了基于 FP 腔干涉的磁流磁场传感器,灵敏度只有 0.015 pm/Oe<sup>[57]</sup>;2011 年,Zhao Y. 等人将磁流体注入到空芯光子晶体光纤中制成 FP 腔型磁场传感器,这类传感器对环境温度不敏感,且损耗较低,磁场灵敏度为 33 pm/Oe<sup>[58]</sup>;2014 年,Lv R.Q.等人提出的 FP 腔磁场传感器是在毛细管两端插入单模光纤,中间留有一定的空隙使注入磁流体后形成空腔,磁场灵敏度为4.31 pm/Oe<sup>[59]</sup>;同年,Homa D. 等人提出类似的结构,灵敏度高达 230 pm/Oe<sup>[60]</sup>.此类传感器由于磁流体的在高温下容易挥发等特性,制作相对较难。

(2) 基于 MZ 干涉的磁场传感器。这类磁场传感器较多,主要是利用不同的光纤结构在光纤包层激发包层模,进一步实现模式之间的耦合。又由于各个模式的有效折射率存在差异,产生模式干涉,结构如图 1.3.2 所示。为了提高普通 MZ 类型传感器的灵敏度,研究者将光纤错位熔接或熔融拉锥,在光纤中激发更多的包层模,增强光纤倏逝场与磁流体的相互作用,从而实现对磁场的传感。2012 年,Peng Z. 等人在两根单模光纤中间熔接一小段 PCF,利用熔接区域的塌陷部分激发的包层模与磁流体的相互作用感知外界磁场的变化,但这种传感器激发的包层模能量较小,作用有限,得到的磁场灵敏

度较小,约为 2.367 pm/Oe<sup>[61]</sup>;之后,Zhao Y. 等人为了进一步增强激发的包层模的能量,将 PCF 进行熔融拉锥,将传感器灵敏度提升了 7 倍<sup>[62]</sup>。为了进一步增大倏逝场与 外界的相互作用,2014 年 Layeghi A 等人通过熔融拉锥的方式将普通单模光纤的直径减 小到 5μm,光纤折射率阶跃分布的结构被破坏,光纤腰锥部分在光纤表面形成大量的倏 逝场,以此锥形光纤制成的光纤磁场传感器灵敏度高达 71.7 pm/Oe<sup>[63]</sup>;2015 年 Luo L. 等人使用同样的方法,进一步将锥形光纤的腰径减小到 3.8μm,并采用反射式结构将传 感器灵敏度提升了 1.5 倍<sup>[64]</sup>。已报道的 MZ 干涉的磁场传感器的具体结构还有很多,例 如 S 型光纤锥型<sup>[65-67]</sup>、锥形光纤-错位熔接型<sup>[68]</sup>、双光纤熔接点直径变大型<sup>[69,70]</sup>、纤芯 失配型<sup>[71,72]</sup>等。此类传感器灵敏度较高,结构简单,制作容易。



图 1.3.2 磁场传感器结构示意图[64, 68, 69, 73]

(3) 基于 Sagnac 干涉型磁场传感器。2012 年,南洋理工大学研制了用保偏光纤做 Sagnac 干涉仪传感臂的磁流体磁场传感器,灵敏度为 0.17 pm/Oe,分辨率为 0.006 Oe<sup>[74]</sup>; 之后在 2013 年,他们报导了基于磁流体双折射效应的 Sagnac 干涉磁场传感器,灵敏度 为 5.92 pm/Oe<sup>[75]</sup>.

第三类基于回音壁模式的磁场传感器。2015年, Mahmood A.等人报导了基于光子 晶体光纤填充磁流体的回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)的磁场传感器灵 敏度高达 11.00 pm/Oe, 但实际应用较困难<sup>[76]</sup>。

综上所述,光纤磁场传感器的研究结构多种多样,但是多数灵敏度和分辨率相对较低,且结构较复杂,没有方向识别性。而井下使用的磁定位传感器要求传感器灵敏度高、分辨率高、抗电磁干扰强、体积小、重量轻,可复用,能适用于复杂环境(高温、高压) 及降低网络化铺设难度,这也是光纤磁场传感器的发展趋势。所以我们需要研制高灵敏 的、有方向识别性和可复用的光纤磁场传感器。

#### 1.4 研究内容

本论文正是考虑适应光纤磁场传感器的发展趋势、优点和功能材料-磁流体优良的 特性,重点研制基于新型光纤微结构和光纤光栅结构的灵敏度高、频率响应好、耐腐蚀、 易于复用、便于多点测量和实时在线检测的光纤矢量磁传感器,解决目前光纤磁场检测 灵敏度低、结构复杂、不能适用于高温高压和方向识别等问题。本论文将在磁场检测研 究方面有着重要的科学意义和实际应用价值。主要内容包括:

(1) 概述微米锥形光纤和光纤光栅的模式耦合理论和传感理论,介绍了火焰拉锥的过程和特点,同时介绍了包层型 FBG 的刻写技术和特点。

(2)为了提高光纤磁场传感器的磁场强度测量灵敏度,研究基于锥形单模光纤和 光学微谐振腔的回音壁模式型光纤磁场传感器,对光学微谐振腔的回音壁模式进行理论 分析和实验研究,给出高品质因子Q的微圆柱型谐振腔合适的尺寸。制作传感器,并研 究其对磁场变化的响应特性。

(3)为了便于提高光纤磁场传感器的实用性、简化结构和解决磁场矢量性测量问题,提出基于锥形细芯光纤的磁场传感器,分析传感器的传感特性,并进行磁场和温度两物理量的变化测量,分析交叉灵敏问题;制作基于锥形少模光纤的磁场传感器,在锥形光纤最细部分的一侧用飞秒激光刻蚀出折射率调制区,形成非圆柱对称结构,以实现对磁场强度的方向相关性测量。同时研究温度的响应特性,分析温度对传感器磁场测量的影响。

(4) 在提高传感器磁场灵敏度的基础上,使传感器由单点测量变为多点测量,便 于组网,研究了基于包层型 FBG 的磁场传感器,选用两种不同的磁敏材料分别激发出 高阶包层模的 FBG 以及低阶包层模的 FBG 结合制作传感器,并对它们进行磁场强度大 小、方向相关性和温度测量。

### 1.5 论文结构

论文包括七章内容, 安排如下:

第一章:综述光纤及光纤传感的发展、分类及特点,光纤磁场传感器的发展过程和 应用前景,光纤磁场传感器在油气田勘探测井和生产测井行业中的研究意义,并分析以 磁流体为磁敏材料的光纤磁场传感器的国内外研究现状,提出本论文需要解决的关于光 纤磁场传感器的关键科学技术问题。最后,对本论文的主要研究内容做了安排。

第二章:简要介绍微米光纤锥的熔融拉制的方法,理论分析微米光纤锥的光波传输 理论和基本传感原理,理论分析包层栅的传输特性和基本传感原理。

第三章:提出一种基于光学微谐振腔的回音壁模式型光纤磁场传感器,理论分析光 波在谐振腔中的传播,分析影响 WGM 品质因子的因素。制作磁场传感器,并实验研究 传感器的磁场强度响应特性。

第四章:研究一种基于细芯微米光纤锥的光纤磁场传感器,理论分析光波在光纤锥 传输时与磁流体的相互作用,实验研究传感器的磁场强度和温度响应特性,采用传感系 数矩阵分析传感器的交叉灵敏度。

第五章:提出一种基于少模光纤锥的光纤磁场传感器,实现了一种激发两模光纤中 LP<sub>11</sub>模式的方法,分析了光波在光纤锥传输中与磁流体的相互作用,研究传感器对不同 磁场强度大小、方向和环境温度的响应特性。

第六章:设计并制作两种基于飞秒激光刻写的包层型 FBG 的光纤磁场传感器,论述了基于光纤布喇格光栅的包层型 FBG 的成栅机理,分析了光波在其中传输时与磁性材料的相互作用,研究其对磁场强度、方向和温度的响应特性。

第七章:总结本文所研制的三类高性能光纤磁场传感结构,结合油气井下对仪器进行磁定位时使用的光纤磁场传感器的要求及研究发展趋势,提出了工作展望,包括传感器结构的优化、封装,磁敏材料的选择等。

## 第二章 微米锥形光纤和光纤布拉格光栅传感理论

第一章主要介绍了光纤磁场传感器的发展过程和应用前景,光纤磁场传感器在油气 田勘探测井和生产测井行业中的研究意义;分析了以磁流体为磁敏材料的光纤磁场传感 器的国内外研究现状,提出本论文需要解决的关于光纤磁场传感器的关键科学技术问题。 本章着重于从理论方面阐述本论文提出的光纤磁场传感器结构的基本机理,包括基于锥 形单模光纤的回音壁模式理论,锥形细芯光纤、锥形少模光纤为传感单元的双光束干涉 理论和光纤布拉格光栅理论。

锥形光纤是对光纤进行熔融拉锥而形成的直径随光纤长度呈线性变化的特殊波导 结构的光纤。锥形光纤改变了光纤中传输光波的光场分布,把部分纤芯模式耦合进包层 或辐射出包层,形成包层模或辐射模,增强了光波与外界环境的相互作用,获得了高灵 敏的传感信号,可单独形成光纤模式干涉仪或以此为基础的回音壁模式型传感器。

光纤布拉格光栅是一种在光纤的纤芯或包层中通过某种方式对其折射率产生周期 性的调制而形成的一种光纤无源器件。外界环境改变,影响光纤布拉格光栅的反射或透 射光发生变化,以此作为传感元件。

## 2.1 锥形光纤传输理论

光波在普通单模光纤中传播时的研究方法有两种:光线光学和波动光学<sup>[7]</sup>。对于不 规则的锥形光纤而言,也可以用这两种方法进行理论分析。

#### 2.1.1 锥形光纤的光线理论

在单模光纤中,用几何光学的方法(光线理论)分析光的传输特性,忽略光的波动性。通过光纤中心轴的所有平面均称为子午面,子午面内的所有光纤都被称为子午线。 子午线在光纤纤芯和包层分界面反射时满足全反射条件,反射角、数值孔径保持不变; 光线传播长度只与入射角和相对折射率有关,全反射次数与纤芯直径成反比,反射次数 越多,光的损失越大。锥形光纤的参数则和上述不同,图 2.1.1 锥形光纤的子午光线通 过时的光路<sup>[77]</sup>,其中*a*和*b*分别为锥形光纤大口径端(入射端)和小口径端(出射端)

的半径, n<sub>1</sub>和n<sub>2</sub>分别为纤芯和包层的折射率, φ为光线的入射角, Ψ<sub>m</sub>为反射角, m为 反射次数, δ为锥角。由图 2.1.1 及折射定律可得

$$\psi_m = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1}\sin\varphi\right) - (2m-1)\frac{\delta}{2}$$
(2.1.1)

其中n<sub>0</sub>为光纤周围介质的折射率。上述公示表明,当光线从锥形光纤的大口端入射时,随着反射次数的增加,反射角逐渐减小,光波在光纤中传输时的全反射条件极易被破坏。 根据全反射条件,要使入射光线能从小口端出射,则应满足

$$\sin\left(\theta_0 + \frac{\delta}{2}\right) \le \frac{b}{a} \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
(2.1.2)

其中θ<sub>0</sub>=90°-ψ<sub>0</sub>,ψ<sub>0</sub>是光线初次进入光纤时满足全反射条件的临界角。如果不满足该条件,则全反射条件被破坏,光线就会从纤芯进入包层或光纤外。锥形光纤的数值孔径与 光纤两端的半径相关,小于单模光纤的数值孔径,其大小为<sup>[78]</sup>

$$NA = \arcsin\left(\frac{b}{a}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right)$$
(2.1.3)



图 2.1.1 锥形光纤中的子午光线的光路[79]

根据图 2.1.1 的几何关系,可知锥角的大小为

$$\delta = 2 \arctan\left(\frac{a-b}{l}\right) \tag{2.1.4}$$

假设光纤锥的长度为1,锥形光纤的半径是随着纵向位置z的变化而不断变化的,其关系为

$$r = a - \frac{a - b}{l}z \tag{2.1.5}$$

当光线从小口径端进入射到锥形光纤时,随着反射次数的增加,入射角不断增加, 全反射条件没有被破坏,不会造成能量的损失。

有以上分析可知,对应于本论文以锥形光纤为传感单元的传感器来说,当光线在锥 形光纤中传播不满足全反射条件时,会有部分光从纤芯进入包层,继续传播时包层的光 又进一步返回纤芯。

2.1.2 锥形光纤的波动理论

光是电磁波,具有电磁波的特性。光波在光纤中传播的一些基本性质可由麦克斯韦 方程组推导,这种方法称为波动理论。根据波动理论分析可知,光波在光纤中传播时, 波动方程的每一个特征解即为一个模式。这些模式的线性组合即是光纤中光场的分布。 影响光波传输的主要原因是纤芯和包层有效折射率的分布。锥形光纤是非正规波导,纤 芯折射率与纵向z有关。由于非正规波导存在纵向不均匀性,严格来讲不存在真正意义 上的模式。

假设锥形光纤是线性缓慢变化的光波导,则可以用局部模式的方法进行分析<sup>[77]</sup>。局 部模式就是将锥形光纤分割成很多的小段,每一小段均被近似认为是正规波导,在此范 围内可运用模式理论进行分析。光纤中模场的求解有两种方法:标量法和矢量法,无论 哪种方法最后都归结于求解贝塞尔方程。

对于单模锥形光纤来讲,基模耦合出的高阶模不大,可以忽略局部模式场二阶以上的变化,在弱导近似条件下,局部模式光波的贝赛尔方程为<sup>[79]</sup>

$$\frac{d^2\psi(z)}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\psi(z)}{dr} + \left(k_0^2n(z)^2 - \beta(z)^2 - \frac{m^2}{r^2}\right) = 0$$
(2.1.6)

其中 $k_0$ 为光在真空中传播时的波数, $\psi(z)$ 是局部模式的电场, $\beta(z)$ 是传播常数。锥形 光纤的半径是关于z的函数。随着光纤半径的变化,纤芯半径和包层半径等比例缩小, 比值不变。锥形光纤小段的电场分布为

$$E_i(x, y, z) = e_i(x, y)e^{j[\beta_i(z-z_i)]} \quad z_i < z < z_{i+1}$$
(2.1.7)

e<sub>i</sub>(x,y)为小段光纤的横截面上的光场能量分布,β<sub>i</sub>为局部模式的传播常数。当光纤结构 改变时,这两个物理量也相应发生改变。当截取的小段光纤的长度足够小时,锥形光纤 的光场分布就可以用下式近似表示

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} a_i(z) e_i(x, y) e^{i[\beta_i(z-z_i)]}$$
(2.1.8)

上述分解不仅包括导模的离散和,还包括辐射模的连续和。光在光纤中传播时的总功率 不变,但各个模的功率 $a_i^2(z)$ 在变,这可看成模式间功率的转化,这种转换可看成是模 式耦合。另外,锥形光纤的归一化频率 $V = 2\pi r / \lambda \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 是随着光纤半径的减小而减 小,纤芯可容纳的传输模式也就越少。

利用边界条件,可求得局部模式内 LP 模式的特征方程为:

$$\frac{uJ_{m+1}(u)}{J_m(u)} - \frac{wK_{m+1}(w)}{K_m(w)} = 0$$
(2.1.9)

其中

$$u = \left[k^2 n_1^2 - \beta(z)^2\right] r^2$$
 (2.1.10)

$$w = \left[\beta(z)^2 - k^2 n_2^2\right] r^2$$
 (2.1.11)

当*m*=0 时,(2.1.9)式可进一步简化为标准单模光纤基模的特征方程,以此来分析 锥形光纤相关传输参数和功率分布。

锥形光纤的归一化频率与u和w之间的关系可以用下式表示:

$$v^{2} = u^{2} + w^{2} = k^{2}r^{2}\sqrt{n_{1}^{2} - n_{2}^{2}}$$
(2.1.12)

由(2.1.10)、(2.1.11)、(2.1.12)三式可知, 描述锥形光纤传输特性的u、w和v均是光 纤半径的函数, 即随着锥形光纤长度的增加, 这些参数是不断变化的。

#### 2.1.3 锥形光纤传输相关参数和功率分布

1. 传播常数

传播常数 β(z) 是描述光波在锥形光纤中传输特性的重要物理量。它与锥形光纤的 传输相关参数有关,它的变化会影响这些参数的变化。因为锥形光纤每一小段的特征方 程(2.1.9)为超越方程,所以采用二分法利用 Matlab 进行数值计算和模拟。 根据光波导理论、截止条件和远离截止条件,传播常数  $\beta(z)$ 的取值范围为  $[kn_2+10^{-9}, kn_1-10^{-9}]$ ,10<sup>-9</sup>是无穷小量。设置的精度为10<sup>-10</sup>,精度越大,计算结果越 接近真实值,但计算量也相应会增大,所以需要选择合适的精度。根据(2.1.9)式给出 Matlab 编写代码时关于  $\beta(z)$ 的函数,具体表达式为

$$y = \frac{uJ_{m+1}(u)}{J_{m}(u)} - \frac{wK_{m+1}(w)}{K_{m}(w)}$$
  
= 
$$\frac{\left[k^{2}n_{1}^{2} - \beta(z)^{2}\right]r^{2}J_{1}\left(\left[k^{2}n_{1}^{2} - \beta(z)^{2}\right]r^{2}\right)}{J_{0}\left(\left[k^{2}n_{1}^{2} - \beta(z)^{2}\right]r^{2}\right)}$$
  
- 
$$\frac{\left[\beta(z)^{2} - k^{2}n_{2}^{2}\right]r^{2}K_{1}\left(\left[\beta(z)^{2} - k^{2}n_{2}^{2}\right]r^{2}\right)}{K_{0}\left(\left[\beta(z)^{2} - k^{2}n_{2}^{2}\right]r^{2}\right)}$$
(2.1.13)

假设光纤中传输的光波的波长为 1550 nm, 纤芯半径从 4.5 μm 变化到 0.45 μm, 锥的长度为 9 mm, 拉锥过程中光纤纤芯折射率 n<sub>1</sub>和包层折射率 n<sub>2</sub>不变,分别为 1.4651 和 1.4561。本节中 Matlab 模拟时使用的参数均相同。锥形光纤的传播常数沿纵向的分布情况如图 2.1.2 所示。由图可知,锥形光纤的传播常数随着锥形光纤半径的不断减小,锥区长度的不断增大而缓慢减小。



图 2.1.2 传播常数 β 随纵向 Z 的变化曲线

2. 归一化传播常数

根据标准单模光纤归一化传输常数可得锥形光纤每一小段的归一化传输常数表达

式为

$$b(z) = \frac{\beta(z)^2 - k^2 n_2^2}{k^2 n_1^2 - k^2 n_2^2} = \frac{w^2}{v^2} = 1 - \frac{u^2}{v^2}$$
(2.1.14)

锥形光纤归一化传播常数沿锥形光纤纵向的分布情况如图 2.1.3 所示。由图可知,随着锥形光纤半径的不断减小,光纤长度的不断增加,归一化传播常数不断减小。



图 2.1.3 归一化传播常数随纵向 Z 的变化曲线

3. 有效折射率





根据标准单模光纤的有效折射率的定义可得锥形光纤每一小段的有效折射率的表示式

$$n_{eff} = \frac{\beta(z)}{k} = \sqrt{b(z)(n_1^2 - n_2^2) + n_2^2}$$
(2.1.15)

锥形光纤有效折射率沿光纤纵向的分布如图 2.1.4 所示。从数值上看,锥形光纤的 有效折射率介于包层和纤芯折射率之间。随着锥形光纤半径的不断减小,有效折射率沿 纵向光波的传输方向,有效折射率不断减小。当纵向长度为 7.8 mm 时,有效折射率趋 于常数(略大于包层折射率),说明光纤的包层和纤芯的结构的完整性被破坏。

4. 模场直径

模场直径是反映光纤纤芯能量集中程度的物理量<sup>[81,82]</sup>。在 SMF 中,光场能量不是 全部集中在纤芯,有极少部分会分布在包层,总能量呈高斯分布,且沿光纤中心轴对称。 光纤轴心处的光强最大,随着直径的变大,光的能量逐渐变弱。当光强降为最大值的1/*e* 时,对应的点的数值 2 倍即为模场直径,模场直径略大于纤芯直径。单模光纤中只存在 一个模式就是纤芯基模 LP<sub>01</sub>,所以模场直径可以表示为<sup>[79]</sup>

$$2\omega_0 = 2\left[\frac{2\int_0^\infty r^3 E^2(r)dr}{\int_0^\infty r E^2(r)dr}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(2.1.16)

其中 E(r)是纤芯基模 LP01 的光场分布函数, @ 为模场半径。

对于锥形光纤而言,假设满足单模条件。锥形光纤每个小段内模场的径向光场分布 可以表示为 $e_i(x,y) = \exp\left(-r^2/2\omega(z)_0^2\right)$ ,每一小段的纤芯基模的模场直径为 $2\omega(z)_0$ 。根 据马休斯判据<sup>[83]</sup>,对公式(2.1.9)进行简化处理,可得每一小段的模场半径为

$$\omega_0(z)_0 = r \left( 0.65 + 1.619 \nu^{-\frac{3}{2}} + 2.879 \nu^{-6} \right)$$
(2.1.17)

由上式可得,模场半径是纤芯半径r的函数。通过 Matlab 软件对它们的关系进行仿真,得到模场半径随锥形光纤长度的变化曲线,如图 2.1.5 所示。

从图中可知,当锥形光纤长度为 7.4 mm 时,模场半径达到最小值为 1.549 μm,对应 的纤芯半径为 1.17 μm,包层半径为 32.5 μm,模场半径远小于包层半径。当锥形光纤长 度继续变长时,模场半径迅速增加。当锥区长度为 9 mm,模场半径为 9.745 μm,纤芯 半径为 0.45 μm,包层半径为 12.5 μm,模场半径远大于纤芯半径,而小于包层半径。所 以在这种情况下纤芯基模只激发了包层模,而没有辐射模的出现。但实际熔融拉锥的过程中,纤芯和包层的有效折射率发生一定的变化,可能会激发出少量的辐射模。这在后面的传感器的测量实验中继续分析。



图 2.1.5 模场半径随锥形光纤纵向长度的变化曲线

5. 纤芯中的功率

为了更好的分析光波在锥形光纤中传输时能量的分布情况,给出功率限制因子,它 表示的是光波在光纤纤芯中的传输功率(导模场中的传输功率)与传输总功率的比值, 对于标准单模光纤,LP<sub>01</sub>模的功率限制因子如下式所示<sup>[83]</sup>

$$\Gamma = \frac{P_c}{P_t} = \frac{W^2}{V^2} \left[ 1 - \left(\frac{K_0(W)}{K_1(W)}\right)^2 \right]$$
(2.1.18)

其中, Γ是单模光纤的功率限制因子, *P<sub>c</sub>*纤芯沿 z 方向的功率流, *P<sub>t</sub>*是沿 z 方向纤芯和 包层功率流之和。

对于每一小段锥形光纤都可以用上式来表示其功率分布, 表达式为

$$\Gamma(z) = \frac{w^2}{v^2} \left[ 1 - \left( \frac{K_0(w)}{K_1(w)} \right)^2 \right]$$
(2.1.19)

当锥形光纤半径不同时,纵向位置不同,功率限制因子也不同,它们之间的关系如 图 2.1.6 所示。对于标准单模而言,1550 nm 的光纤损耗为 0.2-0.25 dB/km, Matlab 模拟 结果与之吻合。沿着纵向位置由小变大时,功率限制因子越来越小,说明当半径较小时, 光纤纤芯中传输的光有较多的进入包层。光纤中包层的半径远大于纤芯半径,包层的归

一化频率远大于纤芯的归一化频率,可允许传播的模式较多,既包括低级的基模,同时 包括高阶模。又由于包层内传输的光场较容易辐射出光纤,所以锥形光纤的损耗较大。 当锥形光纤的锥角较大时,光纤长度不可过长。



图 2.1.6 功率限制因子沿纵向 Z 的变化曲线

### 2.2 锥形光纤磁场传感器传感原理

本论文中以锥形光纤作为传感单元的光纤磁场传感器都是结合磁流体制作而成的,本质上都可以看成是折射率传感器,具体可以分为两类。

第一类是锥形光纤的腰径较小,例如 1~2 μm 腰径的锥形光纤,光波在传输过程中 大部分进入包层外的外界环境中,形成倏逝波。锥形单模光纤和微圆柱谐振腔相结合制 成传感器,通过锥形单模光纤将光波耦合到微谐振腔中产生回音壁模式,光波与谐振中 的磁流体相互作用来感知磁场。此类传感器极易感知外界磁场强度的变化,折射率灵敏 度较高,但机械性能较差、制作步骤复杂,重复性不好,不利于实际操作。

第二类是锥形光纤的腰径相对较大,光波在传输过程中部分进入包层,有少量或没 有形成倏逝波。通过包层模有效折射率对磁流体折射率变化的感知能力测量磁场强度。 此类传感器的机械性能较好,便于实际应用和封装,但折射率灵敏度相对较低。

根据本论文的研究目标,首先分析第一类传感器的传感机理,对其回音壁模式进行 理论分析,研究影响灵敏度的因素。第二类传感器的传感机理是双光束干涉,由于两干 涉臂长度相同,可以用 MZI 理论进行分析;同时还可以用模式耦合理论进行分析。

#### 2.2.1 回音壁模式型光纤磁场传感器传感原理

光学微谐振腔是一种将光限制在弯曲光滑的微小空腔内传输的轴对称结构,尺寸是 波长量级<sup>[84]</sup>。光学微谐振腔的形状有 Fabry-Perot (F-P)型、光子晶体型和回音壁模式型<sup>[85]</sup>, 回音壁模式型光学微腔有微球、微环、微盘、微泡和微圆柱等<sup>[86-89]</sup>。光学微腔型传感器 的灵敏度主要有品质因子 Q 决定,高品质因子的光学微腔有利于获得更高的灵敏度。在 光学微腔种类中,回音壁模式型微腔是的 Q 值最高,因此回音壁模式型传感器有利于获 得高灵敏。本论文采用微圆柱作为光学微腔,具体制备过程在第三章做详细介绍。

回音壁模式型圆柱微腔是利用的光的全反射原理产生谐振。光在微腔内经多次环绕 形成回音壁模式,它与微腔的形状、半径、折射率等参数有关。对于填充有磁流体的薄 壁圆柱型的微腔,当外界磁场发生变化时,磁流体的折射率发生变化,进一步引起微腔 壁内光的有效折射的变化,进而微腔的谐振波长或能量发生变化。这就是此类磁场传感 器的传感基础。关于微腔的理论分析较成熟,不在分析,有关品质因子的计算公式在第 三章详细介绍。在此仅分析锥形光纤与微腔耦合情况,光波与微腔耦合光路如图 2.2.1 所示,具体分析如下。



图 2.2.1 光波与微腔耦合示意图[86]

当锥形光纤和微腔之间有适当距离时,光纤中传播的光波就会耦合到微腔中,耦合系数为 $\kappa$ ,也会进一步从微腔中耦合到光纤,耦合系数为 $\kappa$ ,从光纤耦合到微腔后的透过系数为T。根据能量守恒,有T = T,  $\kappa = \kappa$ ,且 $|T|^2 + |\kappa|^2 = 1$ 。微腔内的场和这些量的关系可以用模式动力学方程表示为<sup>[90]</sup>

$$\begin{cases} E_{s}(t) = i\kappa E_{i}(t) + T'E_{s}(t - \tau_{0})e^{(i\varphi - \alpha L_{2})} \\ E_{0}(t) = TE_{i}(t) + i\kappa'E_{s}(t) \end{cases}$$
(2.2.1)

其中, E<sub>i</sub>(t)为光纤内传输光波的场强, E<sub>o</sub>(t)为光纤出射场强, E<sub>s</sub>(t)为微腔内回音壁模

式的场强, t为时间。L、 $\tau_0$ 和 $\varphi$ 分别为光在微腔内绕行一周的长度、时间和相位变化。  $\alpha$ 为微腔的功率衰减系数,  $\alpha_2$ 为振幅衰减系数。

由以上分析可得光波从光纤经微腔后再次耦合回光纤的透射率为[91]

$$T_{f} = \frac{\left|E_{0}(t)\right|^{2}}{\left|E_{i}(t)\right|^{2}} = 1 - \frac{4Q_{0}Q_{coup}}{\left(Q_{0} + Q_{coup}\right)^{2} + \left(Q_{0}Q_{coup}\frac{\Delta\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}}$$
(2.2.2)

其中, $Q_0$ 为微腔本征损耗, $Q_{coup}$ 为光纤与微腔耦合时产生的损耗,它和锥形光纤和微腔距离、耦合位置、锥的腰径有关。上式表明,微腔与光纤耦合后,得到的光谱不仅和微腔本身有关,还和耦合条件有关。当 $Q_{coup} = Q_0$ 时,称为临界耦合。光纤中的光波全部耦合到微腔中,耦合效率为100%,此时系统的Q值可以表示为 $\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{coup}} = \frac{2}{Q_0}$ 。临界耦合可以提高微腔内光场的能量,但需要非常精确的调节,很难实现。在一般传感系统中,是在弱耦合条件下进行。

2.2.2 Mach-Zehnder 干涉型磁场传感器传感原理



图 2.2.2 Mach-Zehnder 光纤干涉仪原理

Mach-Zehnder 光纤干涉仪原理如图 2.2.2 所示。由光源发出的相干光经耦合器 1 进入两根长度相同的单模光纤,一根为参考臂,另一根为传感臂,用来感知外界物理量的变化;从两光纤输出的光束经耦合器 2 进行叠加产生干涉,干涉光信号由光谱仪接受,并通过检测干涉信息获得需要测量的外界物理量的信息。传统的 MZI 由于使用两根独立的长度完全相同的光纤,难度较大,而且测量过程中干涉臂容易受到外界环境的影响,抗干扰能力和稳定性能较差。为了提高稳定性和抗干扰能力,将传统的 MZI 改进为全光纤 Inline MZI,干涉臂集成在一根光纤上,不再需要外加耦合器,制作简单、结构紧凑、灵敏度高,在实际应用中具有较大优势,可用于折射率、温度、应力等物理量的传

感测量。

传统的 MZI 是双光束干涉仪,当外界环境(折射率、温度、应力等)发生变化, 使得光纤中传输的光的相位发生变化,从而实现相位调制。光相位主要由波数、折射率 和干涉臂的长度决定。

在双光束干涉中,假设沿 z 轴传播的两束频率相同的光波为

$$E_{1}(z, t) = E_{1}(z)e^{-i(\omega - \varphi_{1})}$$
(2.2.3)

$$E_{2}(z, t) = \tilde{E}_{2}(z) e^{-i(\omega - \varphi_{2})}$$
(2.2.4)

当两列光波在传播中相遇时发生干涉,干涉光强为

$$I = [E_{1}(z, t) + E_{2}(z, t)][E_{1}(z, t) + E_{2}(z, t)]^{*}$$
$$= \left|\tilde{E}_{1}(z)\right|^{2} + \left|\tilde{E}_{2}(z)\right|^{2} + 2\tilde{E}_{1}(z)\tilde{E}_{2}(z)\cos(\varphi_{2} - \varphi_{1})$$
$$= I_{1} + I_{2} + 2\sqrt{I_{1}I_{2}}\cos\Delta\varphi$$
(2.2.5)

式中, $I_1$ 和 $I_2$ 是两束光的光强, $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 是两束光波的相位差。由公式(2.2.4) 可知,在干涉仪中,当外界环境引起传感臂传输光光程发生变化时,会引起传感臂相位 的变化,进而引起传感臂和参考臂相位差的变化,随之干涉强度发生变化,或者干涉谱 发生漂移。

全光纤 Inline MZI 的工作原理也可以用模式耦合理论进行解释。例如本论文中锥形 光纤传感器,随着光纤直径逐渐变细,使得纤芯基模能量部分进入包层,激发出包层模; 当光纤直径逐渐变粗时,又将激发出的包层模耦合进纤芯。由于纤芯模和包层模在光纤 中传输的有效折射率不同引起相位不同而产生干涉。两类模式的相位差为

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \left( n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad,m} \right) L}{\lambda} = \frac{2\pi \Delta n_{eff}^m L}{\lambda}$$
(2.2.6)

式中 $n_{eff}^{core}$ ,  $n_{eff}^{clad,m}$ 分别是纤芯模和m阶包层模的有效折射率,  $\Delta n_{eff}^{m}$ 是包层模和纤芯模的有效折射率差, L是光纤传感部分的长度(即光纤干涉臂的长度),  $\lambda$ 是光波的波长。

基于磁流体的全光纤 MZI 磁场传感器,是通过磁流体折射率变化来调制包层的有效折射率,进一步影响光传播的相位差,所以这类磁场传感器传感原理也可以用折射率 传感器的传感原理进行解释。 (1) 干涉光谱波谷处分析

由公式(2.2.3)可知,当相位差为π的奇数倍时,光场干涉强度达到最小,此时干 涉光场的强度为

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$
(2.2.7)

在干涉光谱中干涉谷处纤芯基模和包层模之间的相位匹配条件是

$$\frac{2\pi\Delta n_{eff}^m L}{\lambda} = (2k+1)\pi \qquad (2.2.8)$$

由于包层模的有效折射率随外界环境折射率的变化而变化,纤芯模则不受影响。假设包 层模的有效折射率改变量为 $\delta n_{eff}^{clad,m}$ ,纤芯模和包层模的有效折射率差改变量为 $\delta (\Delta n_{eff}^{m})$ ,则外界环境折射率改变后公式(2.2.8)变为

$$2\left(\Delta n_{eff}^{m} + \delta\left(\Delta n_{eff}^{m}\right)\right)L = (2k+1)(\lambda + \Delta\lambda)$$
(2.2.9)

根据公式(2.2.8)和公式(2.2.9)可得

$$\frac{\Delta\lambda}{\delta\left(\Delta n_{eff}^{m}\right)} = \frac{\lambda}{\Delta n_{eff}^{m}}$$
(2.2.10)

又因为 $\delta(\Delta n_{eff}^{m}) = [n_{eff}^{core} - (n_{eff}^{clad,m} + \delta n_{eff}^{clad,m})] - (n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad,m}) = -\delta n_{eff}^{clad,m}$ ,所以上式又可表示

$$\frac{\Delta\lambda}{\delta n_{eff}^{clad,m}} = -\frac{\lambda}{\Delta n_{eff}^{m}}$$
(2.2.11)

因此波谷处波长与包层模折射率变化的关系用微分表示为

$$\frac{d\lambda}{dn_{eff}^{clad,m}} = \frac{\lambda}{n_{eff}^{clad,m} - n_{eff}^{core}}$$
(2.2.12)

根据公式(2.2.12)可知外界环境折射率变化时,干涉光谱和折射率灵敏度的变化。

(2) 干涉光谱波峰处分析

当相位差为π的偶数倍时,光场干涉强度达到最大,此时干涉光场的强度为

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$
(2.2.13)

在干涉光谱中干涉峰处纤芯基模和包层模之间的相位匹配条件是

$$\frac{\pi \Delta n_{eff}^m L}{\lambda} = \pi \tag{2.2.14}$$

(3) 干涉条纹对比度和自由光谱

干涉场中条纹的清晰度用干涉条纹的对比度(又称可见度)来K表示,即

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$
(2.2.15)

当*K*=1时,条纹对比度最大,此时的干涉是完全相干;当*K*=0,干涉无条纹,是非相干,即光谱图无干涉峰的出现。对于一般的干涉,则为部分干涉,0<*K*<1。

对于干涉光谱的自由光谱和模式的有效折率以及实际相干长度有关,具体关系如下 式所示

$$\Delta \lambda_m \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L_{eff}}$$
(2.2.16)

通过观测干涉光谱的波峰或波谷的波长的漂移量,反推外界环境折射率的变化,进 一步推得传感器的折射率灵敏度。在干涉长度不变的情况下,可以通过增大包层模的有 效折射率的改变量提高测量灵敏度。对于包层模来说,阶次越高,有效折射率随环境折 射率变化越大。所以,可以通过将能量耦合到高阶次的包层模的方式提高折射率灵敏度。

另外,从锥形光纤直径尺寸来讲,直径越小,辐射到光纤表面的能量越多,光纤表面的倏势场越强,光纤感知外界环境折射率变化越灵敏,传感器的灵敏度越高。

#### 2.3 光纤布拉格光栅传感原理

光纤光栅不仅可以应用于光通信中的光纤窄带滤波器、激光器、色散补偿器、放大器等无源器件<sup>[92-95]</sup>,还可以广泛应用于光纤传感领域。周期小于 1 μm 的光纤光栅称为 光纤布拉格光栅 (FBG)。利用 FBG 的轴向应变和温度特性研制的传感器,可以实现外 界压力、应变、位移、加速度、弯曲、温度、磁场等多种物理量的直接测量<sup>[96-101]</sup>。FBG 型传感器具有测量稳定性较好、准确性高、易于复用、重复性好和便于组网等优点。

目前,FBG 的刻写方法主要有双光束全息曝光法<sup>[102,103]</sup>、逐点刻写法<sup>[104,105]</sup>和相位掩模法<sup>[106,107]</sup>。采用相位掩模法刻写的 FBG 对光源的相干性要求相对较低,且有许多优
点,例如:制作工艺简单、重复率好、稳定性好、较易批量生产。本论文使用的包层栅 采用飞秒激光结合相位掩模技术进行刻写。

### 2.3.1 光纤布拉格光栅耦合模理论

FBG 的特点是传输方向相反的两个芯模(前行模和后行模)之间发生耦合。耦合模理论是目前最为认可的光纤光栅分析方法<sup>[108-110]</sup>。

在规则光波导中,电场矢量可以表示为 $\mathbf{E}(x,y,z,t) = \mathbf{e}(x,y)e^{-j(\omega - \beta z)}$ ,横向分量为  $\mathbf{E}_{t}(x,y,z) = \mathbf{e}_{t}(x,y)e^{-j\beta z}$ ;规则光波导的解称为本征模,可表示为

$$\mathbf{E}_{\nu}(x,y,z) = \mathbf{e}_{\nu}(x,y)e^{-j\beta_{\nu}z}$$
(2.3.1)

其中,  $\nu$ 为本征模的模序数,  $\beta_{\nu} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$  为 $\nu$ 阶本征模的传播常数。

当光波导受到扰动时,波导中的模式将会发生改变,可以用本征模的线性叠加表示 扰动后光波导的解<sup>[77,111]</sup>,即

$$\mathbf{E}_{t} = \sum_{\nu} a_{\nu} \mathbf{e}_{t\nu} = \sum_{\nu} \left( A_{\nu} e^{j\beta_{\nu}z} + B_{\nu} e^{-j\beta_{\nu}z} \right) \mathbf{e}_{t\nu}$$
(2.3.2)

其中, e<sup>iB,z</sup>为沿光纤z轴正向传播的模式(前行模), e<sup>-iB,z</sup>为沿光纤z轴反向传播的模式(后行模); A,和B,分别为对应分量的展开系数,都是z的函数。则对应的耦合模方程为

$$\frac{dA_{\mu}}{dz} = j \sum_{\nu} A_{\nu} \left( K_{\nu\mu}^{t} + K_{\nu\mu}^{z} \right) e^{j(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z} + j \sum_{\nu} B_{\nu} \left( K_{\nu\mu}^{t} - K_{\nu\mu}^{z} \right) e^{-j(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z}$$
(2.3.3)

$$\frac{dB_{\mu}}{dz} = -j\sum_{\nu} A_{\nu} \left( K_{\nu\mu}^{\prime} - K_{\nu\mu}^{z} \right) e^{j(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z} - j\sum_{\nu} B_{\nu} \left( K_{\nu\mu}^{\prime} + K_{\nu\mu}^{z} \right) e^{-j(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z}$$
(2.3.4)

其中, $A_{\nu}$ 和 $B_{\nu}$ 为模式 $\nu$ 的前行模和后行模分量的幅值, $A_{\mu}$ 和 $B_{\mu}$ 为模式 $\mu$ 的前行模和后

行模分量的幅值, K'<sub>vu</sub>、K<sup>z</sup><sub>vu</sub>为模式v和模式 µ之间横向分量和纵向分量的耦合系数。 对于光纤光栅, K<sup>z</sup><sub>vu</sub>远远小于 K'<sub>vu</sub>, 可以忽略不计。

对于标准 FBG 来说,在纤芯沿 z 轴传输的前行模在满足相位匹配条件的情况下,被 光栅反射,形成在纤芯沿-z 轴传输的后行模,前行模和后行模交叉耦合。假设沿 z 轴传 播的正、反向两个芯模的振幅分别为 A 和 B,则(2.3.3)和(2.3.4)式可以简化为

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = jAK_{11}^{t} + jBK_{12}^{t}e^{-j2\beta z} \\ \frac{dB}{dz} = -jBK_{11}^{t} - jAK_{21}^{t}e^{j2\beta z} \end{cases}$$
(2.3.5)

其中,前行模和后行模交叉耦合系数相同,即*K*<sup>*i*</sup><sub>12</sub>=*K*<sup>*i*\*</sup><sub>21</sub>,前行模和后行模自耦合系数相同,记为*K*<sup>*i*</sup><sub>11</sub>。紫外激光刻写的标准 FBG,其折射率分布为<sup>[112]</sup>

$$n_{1}(z) = n_{1}\left\{1 + \sigma(z)\left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right)\right]\right\}$$
(2.3.6)

其中, Λ为光栅的周期, σ(z)为折射率调制的缓变包络。对上式进行傅里叶变换进行 展开,则导模的折射率的改变量可表示为

$$\Delta n_1(z) = \overline{\Delta n}(z) \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \right]$$
(2.3.7)

 $\overline{\Delta n}(z) = n_1 \sigma(z), \ \overline{k} = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \varepsilon(x, y, z) \mathbf{e}_{iv} \cdot \mathbf{e}_{i\mu}^* dx dy, \ \overline{n} = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \varepsilon(x, y, z) \mathbf{e}_{iv} \cdot \mathbf{e}_{i\mu}^* dx dy, \ \overline{n} = K_{v\mu}(z) \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \right]$   $\begin{cases}
K_{v\mu}(z) = \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2}{2} \sigma(z) \iint \mathbf{e}_{iv}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{i\mu}^*(x, y) dx dy = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n}_{eff}
\end{cases}$ (2.3.8)

 $\overline{\delta n}_{eff}$ 是一个光栅周期内平均有效折射率的该变量。将耦合系数 $K'_{\nu\mu}$ 用指数函数形式表示, 代入耦合模方程(2.3.5),则会出现 $e^{\pm \left(2\beta\pm\frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2}$ 指数项。为了保证两个模式的强耦合,指 数项括号内外只能取负号。进一步简化后的耦合模方程为<sup>[110]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = jA\kappa_{11} + jB\kappa e^{-j2\delta z} \\ \frac{dB}{dz} = -jB\kappa_{11} - jA\kappa^* e^{j2\delta z} \end{cases}$$
(2.3.9)

其中, $\delta = \beta - \pi / \Lambda \overline{n_{eff}}, \kappa = \kappa_{12}/2 = \kappa_{21}^*/2 = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}}$ ,上述方程第二项在模式耦合中起主要 作用,所以进一步简化为

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = jjB\kappa e^{-j2\delta z} \\ \frac{dB}{dz} = jA\kappa^* e^{j2\delta z} \end{cases}$$
(2.3.10)

假设长度为L均匀 FBG, 当 $\kappa^2 > \delta^2$ 时, 求解上式可得前行模和后行模的振幅为<sup>[110]</sup>

$$A(z) = e^{-j\delta z} \left\{ \frac{s \cosh[s(L-z)] - j\delta \sinh[s(L-z)]}{s \cosh(sL) - j\delta \sinh(sL)} A(0) - e^{-j\delta L} \frac{j\kappa \sinh(sz)}{s \cosh(sL) - j\delta \sinh(sL)} B(L) \right\}$$

$$B(z) = e^{j\delta z} \left\{ \frac{j\kappa^* \sinh\left[s\left(L-z\right)\right]}{s\cosh(sL) - j\delta\sinh(sL)} A(0) + e^{-j\delta L} \frac{s\cosh(sz) - j\delta\sinh(sz)}{s\cosh(sL) - j\delta\sinh(sL)} B(L) \right\}$$
(2.3.11)

其中,  $s^2 = \kappa^2 - \delta^2$ 。FBG 中耦合模的两个纤芯模的相位匹配条件是

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 0 \tag{2.3.13}$$

利用有效折射率和传播常数的关系,将(2.4.13)式改为

$$\lambda_{B} = 2n_{eff}\Lambda \tag{2.3.14}$$

这与利用光的衍射原理导出的布拉格条件相同。

在相位匹配条件和A(0)=1, B(L)=0边界条件下,可得最大反射率和透射率

$$R_{\max} = \tanh^2(\kappa L) \tag{2.3.15}$$

$$T_{\rm max} = ar \cosh^2(\kappa L) \tag{2.3.16}$$

对于输入功率为1的中心波长为1550nm的FBG,谐振时反射光功率与L的关系用

Matlab 软件模拟计算结果如图 2.3.2 所示,可见当 κL≈3 时,光的能量基本全部被反射。



图 2.3.2 光纤布拉格光栅反射功率转换

## 2.3.2 倾斜光栅耦合模理论

倾斜光纤光栅(Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG)是一种今年来备受人们关注的具 有新结构和新特点的多功能光纤光栅。此类光栅的轴向与光纤轴向不在同一个方向,存 在一定的角度(倾斜角度),导致光栅周期和折射率分布呈现轴非对称性。它不仅能够 将纤芯基模耦合至包层模,当角度足够大时,还能够耦合至辐射模,如图 2.3.3 所示。 所以光波沿着 TFBG 纤芯传播产生谐振的相位匹配条件变为 $\lambda_{cl,i} = (n_{core} \pm n_{cl,i})\Lambda_g$ 。由于 TFBG 中存在芯模和包层模之间的耦合,谐振峰的波长与光纤包层的有效折射率和光栅 周期有关,所以光栅的谐振峰会随着外界环境折射率的变化而变化<sup>[113]</sup>。



### 图 2.3.3 TFBG 的模式耦合示意图

由(2.3.7)式可知,当 TFBG 的倾角为θ时,光纤纤芯的折射率变化量可表示为

$$\Delta n_1(x,z) = \overline{\Delta n}(z') \left\{ 1 + \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z' + \varphi(z')\right] \right\}$$
(2.3.17)

其中 $\Lambda = \frac{\Lambda_g}{\cos\theta}$ ,  $z' = x\sin\theta + z\cos\theta \approx z\cos\theta$ 。结合 (2.317) 式和标准 FBG 耦合模理论

可得 TFBG 的耦合系数

$$K_{\nu\mu}' = \sigma(z) + 2\kappa_{\nu\mu}(z)\cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z\cos\theta)\right]$$
(2.3.18)

其中,

$$\begin{cases} \sigma(z) = \frac{\omega n_{core}}{2} \overline{\Delta n}_{core} (z \cos \theta) \iint \mathbf{e}_{i\nu}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{i\mu}^{*}(x, y) dx dy \\ \mathcal{K}_{\nu\mu} = \frac{\nu}{2} \frac{\omega n_{core}}{2} \overline{\Delta n}_{core} (z \cos \theta) \iint \mathbf{e}_{i\nu}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{i\mu}^{*}(x, y) e^{\pm i \frac{2\pi}{\Lambda} x \tan \theta} dx dy \end{cases}$$
(2.3.19)

条纹可见度为

$$\frac{\nu_{\nu\mu}(\theta)}{\nu} = \frac{\iint \mathbf{e}_{\nu\nu}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{\mu}^{*}(x, y) e^{\pm i \frac{2\pi}{\Lambda} x \tan \theta} dx dy}{\iint \mathbf{e}_{\nu\nu}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{\mu}^{*}(x, y) dx dy}$$
(2.3.20)

由(2.3.19)和(2.3.20)两式可知,随着倾角的不同,TFBG的耦合效率不同。

### 2.3.3 光纤布拉格光栅传感理论

由 FBG 的谐振方程(2.3.13)式可知, FBG 的谐振波长(中心波长)取决于光栅周 期和纤芯有效折射率。温度、应力和应变会改变光栅的周期, 弹光效应和热光效应会改 变传输光波的有效折射率。这些因素都会引起 FBG 中心波长的漂移, 对(2.3.13)式进 行微分可知波长漂移量如下式所示

$$d\lambda_{B} = 2n_{eff} \cdot d\Lambda + 2\Lambda \cdot dn_{eff} \qquad (2.3.21)$$

其中, $\lambda_{B}$ 是光栅的中心波长, $n_{eff}$ 是芯模的有效折射率, $\Lambda$ 光栅的周期。

当波长漂移量只是由于应变作用引起时(忽略温度作用),上式可写为

$$d\lambda_{B} = 2n_{eff} \cdot d\Lambda + 2\Lambda \cdot dn_{eff} = 2\left(n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial s} + \Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial s}\right)ds + 2\Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial\lambda}d\lambda \qquad (2.3.22)$$

其中, *s*为应变作用引起的光栅长度的变化。又因为对于普通光纤有 $\left|\lambda_{0}\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial\lambda}\right| \ll 1, \lambda_{0}$ 为无应变时光栅的中心波长,再利用弹光效应,可得 FBG 轴向应变灵敏度为<sup>[110]</sup>

$$K_{B,s} = \frac{d\lambda}{ds} = \lambda_0 \frac{1 + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial s}}{1 - \lambda_0 \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda}} = \lambda_0 \left(1 + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial s}\right) = \lambda_0 \left(1 - p_e\right)$$
(2.3.23)

其中弾光系数为 $p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})].$ 

当波长漂移量只有温度变化引起时, (2.3.14)式可写为

$$d\lambda_{B} = 2n_{eff} \cdot d\Lambda + 2\Lambda \cdot dn_{eff} = 2\left(n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)dT + 2\Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial\lambda}d\lambda \qquad (2.3.24)$$

其中,*T*为温度。考虑到 $\left| \lambda_0 \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda} \right| \ll 1$ 和热光效应,可得 FBG 轴向温度灵敏度为<sup>[107]</sup>

$$K_{B,T} = \frac{d\lambda}{dT} = \lambda_0 \left( \alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) = \lambda_0 \left( \alpha + \xi \right)$$
(2.3.25)

其中, $\alpha$ 为热膨胀系数, $\xi$ 为热光系数。

在实际应用中,以 FBG 为传感部分的传感器可能对温度和应力能同时感知,必须 进行温度补偿或区分。对于普通单模光纤刻写的 FBG,外界折射率的改变很难影响到纤 芯的有效折射率。当对于能激发包层模和辐射模的特殊光栅,包层模的有效折射率对外 界折射率的变化较敏感,例如包层栅、倾斜光栅、长周期光栅等。对于以 FBG 为传感 单元、以磁流体为磁敏材料的光纤磁场传感器均是利用激发出的包层模或辐射模对外界 折射率的敏感特性为依据。

## 2.3.4 光纤布拉格光栅刻写技术

1978 年,加拿大通信研究中心的 Hill 等人利用驻波干涉法在掺锗光纤上制成了世界上第一根光纤光栅,之后随着光栅应用范围的增加和激光光源技术的迅速发展,使得光纤光栅的刻写方法多样化。目前,使用较广泛的刻写技术有三种:全息相干技术、相位掩模板技术和逐点刻写技术<sup>[110]</sup>。

(1) 全息相干技术

全息相干技术刻写 FBG 是由 Meltz 等人提出的,这种技术的工作装置如图 2.3.4 所示。其结构类似 MZ 干涉仪,入射激光用一个分光镜分成比例相等的两束,经两个全反

32

射镜反射后相交于光纤上产生干涉,在光纤纤芯引起折射率周期分布的调制区,从而形成光栅。光栅周期由入射光的波长 *λ* 和两光束夹角 2*θ* 决定,具体公式为

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \tag{2.3.26}$$

由上式及布拉格光栅方程可得此方法刻写的光纤光栅的中心波长为

$$\lambda_{B} = \frac{n\lambda}{\sin\theta} \tag{2.3.27}$$

其中, n为纤芯的有效折射率。

此方法的优点是操作简单,通过改变两光束的夹角方便的实现不同中心波长的光栅 的刻写,还很容易实现啁啾和倾斜光栅的刻写;并且曝光的激光能量较低,光栅刻写效 率大大提高,刻写 FBG 的波长选择较灵活。但这种技术对光源的空间相干性和时间相 干性要求较高,同时外界环境微小的变化也会影响光路系统,曝光时间相对较长,所以 不利于大批量的生产。



图 2.3.4 全息相干技术刻写光栅装置示意图

### (2) 相位掩模板技术



#### 图 2.3.5 相位掩模板技术刻写光栅装置示意图

相位掩模板技术是现在应用最广泛的一种刻写光栅的技术。光栅刻写装置示意图如 图 2.3.5 所示。该技术是将一块具有周期性凹槽的掩模板紧靠光纤固定,利用相位掩模 板的近场衍射形成的干涉条纹作用于光纤,在纤芯形成折射率周期分布的调制区,刻写 的光栅周期只与掩模板的周期有关。当光垂直入射时,掩模板的±1 级衍射效率较高, 利用该级衍射光相干刻写的光栅周期为掩模板相位周期的一半。斜入射时,利用 0 级与 -1 级衍射光相干刻写的光栅周期与掩模板周期相同。

一种相位掩模板技术只能刻写一种中心波长的光栅,刻写不同周期的光栅需要不同 的掩模板,但该技术比较稳定、高效,便于大批量工业生产,对光源相干性要求相对于 全息相干技术较低。本论文第五章磁场传感器使用的包层型光纤光栅就是利用相位掩模 板刻写的,重复性较高。

(3) 逐点刻写技术



图 2.3.6 逐点刻写技术刻写光栅装置示意图

逐点刻写技术是通过聚焦激光束在光纤纤芯上逐点曝光写制光栅的一种方法。该技术对光纤的光敏特性无要求,具有较高的灵活性,周期容易控制,对光源相干性要求无要求,使用的激光光源有飞秒激光和 CO<sub>2</sub>激光。不管是光纤固定光斑运动还是光斑固定光纤移动的运动控制机构,都必须保证三维位移台的高精度、等间隔的水平移动,同时对激光聚焦要求较高,需要搭配复杂的光学聚焦系统,且受光斑尺寸的限制;单侧刻写,容易造成光纤横基面受热不均匀,影响光栅的刻写质量。刻写的光栅周期不能太小,主要用于长周期光纤光栅。

# 2.4 本章小结

本章通过对微米锥形光纤的制备方法、传输理论、光纤 MZI 工作原理的讨论,分 析了基于锥形光纤的 WGM 型和全光纤 MZI 磁场传感器的传感原理。阐述了标准 FBG 的结构原理,用模式耦合理论分析了标准 FBG 和 TFBG 的工作原理和传感原理,并简 单介绍了光纤光栅的刻写技术。 可以种几年後認知的相句面。至1回目至候我的國庭後認確共有我面的如初至火國度, 将磁流体注入到光学微腔中,通过外加磁场来改变磁流体的折射率,使回音壁模式的谐振峰发生变化,由此构成一种新型的光纤磁场传感器。采用空芯光纤(Hollow fiber, HF) 做成的微圆柱为传感器的谐振腔,通过毛细管现象将磁流体注入到微圆柱谐振腔中;选 用腰径为1μm的锥形光纤和微腔制成传感器。

# 3.1 磁流体概述

## 3.1.1 磁流体的成分

磁流体(Magnetic Fluid, MF),又称为铁磁流体(Ferrofluid)或磁性液体(Magnetic Liquid),是由裹覆表面活性剂的磁性纳米颗粒均匀分散在基液中所形成的稳定的胶体溶液<sup>[114, 115]</sup>。MF 是一种既有固体磁性材料的磁性又有液体的流动性,同时还有许多固体和液体材料没有的性质的新型功能材料,其折射率对磁场和温度的变化比较敏感。微观结构如图 3.1.1 所示。



颗粒尺寸能够保证磁性颗粒能抵消自身重力或者外加磁场作用,同时还能够使其在基液

中做布朗运动<sup>[118]</sup>。为了防止磁性颗粒在自由状态下的团聚现象,保证其稳定均匀的分散在基液中,需要在其表面裹覆一层表面活性剂。表面活性剂长链一端的疏水或疏油基团与磁性颗粒表面通过范德华力形成结合,另一端的亲水或亲油基团与基液溶剂化,种类有羟基、胺、硫磺等<sup>[119]</sup>。基液是磁流体的主体,使磁流体具有液体的流动性,成分和性质决定其用途,种类主要有水、碳氢化合物、有机溶剂等<sup>[120,121]</sup>。

磁流体起始于上世纪六十年代的 Papell、Thomas 和 Hess 等人的研究<sup>[122, 123]</sup>,而本 文中用到的水基磁流体则始于 1981 年的 Massart 等人的研究<sup>[124]</sup>。它涉及到的比较成熟 的应用领域有国防、能源、航空航天、仪器仪表、化工生物医学等,主要起密封、润滑、 传感等作用<sup>[125-129]</sup>。磁流体有很多优良的特性,但直到二十一世纪初期人们才开始关注 其光学特性,并对其进行了大量的研究,并与光纤相结合,研制了多种光学器件,如磁 流体光纤磁场传感器<sup>[44,51,130]</sup>、滤波器<sup>[131,132]</sup>、光开关<sup>[133]</sup>等。

#### 3.1.2 磁流体光学特性

磁流体具有许多优良的光学特性,如折射率可调控性、双折射特性、热透镜效应等, 这是由于外加磁场作用于磁流体时,磁场的方向、大小与磁流体薄膜的厚度、方向、磁 流体的浓度等不同时导致磁性颗粒的有序排列的改变而引起的,所以磁流体的光学特性 是可以调谐的。但磁流体光学特性的可调谐本质是对磁流体的折射率的调制。并且主要 有以下几个方面:

(1) 折射率可调控性

与磁流体折射率相关的因素有磁性颗粒的类型、大小,基液的种类,浓度,外界环 境的磁场、温度等。当磁流体有磁场作用时,其折射率会随着磁场的变化而改变,并且 具有可调控性。Chin-Yin Hong 等人对磁性颗粒为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的水基磁流体薄膜折射率进行 研究发现,磁流体折射率随着外加磁场强度大小的增加而增加<sup>[134]</sup>,在 Ting Liu 等人的 研究中所得结果与之恰好相反<sup>[135]</sup>,具体关系如图 3.1.2 所示。当磁场强度小于临界磁场 或大于饱和磁场时,折射率几乎不变。这可以用磁流体的磁电效应理论进行解释<sup>[134]</sup>。 由于磁流体阈值和磁饱和强度的存在,当外加磁场变化时,其折射率在一定范围内变化, 且变化差值较小为 0.003~0.04 RIU,例如本论文中使用的磁流体的折射率为 1.41~1.45。 在磁流体折射率在外加磁场的影响下的变化规律与磁电效应中极化率变化类似,与透过 磁流体薄膜的光的方向和外加磁场的方向有关。当磁场方向与磁流体薄膜相互垂直时,

37

即磁场方向与光的方向是相互平行的,磁流体的折射率随着外加磁场强度大小的增加而 增加; 当磁场方向平行于磁流体薄膜时,光的方向与磁场方向是垂直的,结论与上述相 反。



图 3.1.2 磁流体折射率与磁场强度的关系[134, 135]

(2) 热透镜效应

当光束透过磁流体时,磁流体会吸收光的部分能量,内部呈现温度梯度分布,磁性 颗粒排布发生变化,使垂直于光束传播方向的折射率分布呈现非均匀,呈现出类似于透 镜的效果,这就是磁流体的热透镜效应<sup>[136,137]</sup>。

(3) 光透射特性

磁流体的光透射特性与浓度、薄膜厚度和外加磁场有关<sup>[138]</sup>。在无外加磁场、薄膜 厚度微米量级以上时,磁性颗粒是随机分布的,磁流体不透光;当有磁场时,磁性颗粒 有序排列成一条条磁链,呈弱凝絮状态。磁流体只有基液部分能透光,所以外加磁场越 强,弱凝絮越多,液相成分越少,磁流体的透光能力越差<sup>[139]</sup>。

(5) 磁光效应

在无外加磁场时,磁性颗粒是随机分布的,磁流体是一种均匀稳定各向异性的胶体

溶液;当有磁场时,磁流体的磁性颗粒团聚成链,形成有序排列,这就是磁光效应<sup>[139]</sup>。 一般包括线性二色性、磁致双折射效应、二色性等。

考虑到磁流体使用的基液不同,粘滞系数不同,施加和撤销磁场时传感器对磁场的 响应时间不同。本论文采用是粘滞系数较小,对磁场响应较快的水基铁磁流体,由北京 神然磁性流体技术有限公司提供。磁流体的物理参数如表 3.1.1 所示,另外磁流体的初 始折射率为 1.42。

型号	颜色	饱和磁化强度 (Gs)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )*10 <sup>3</sup>	粘度 (cp)(25°C)		
MFW	黑色	$200\pm20$	1.18	1-10		
起始磁化率 /(m/H)	表面张力 (N/cm)	热传导率 (W/(m・k))	比热 (KJ/m・K)	热膨胀系数 (m/K)		
0.6	26*10 <sup>-5</sup>	0.59	4184	5.2*10 <sup>-4</sup>		

表 3.1.1 铁磁流体物理参数

# 3.2 音壁模式型磁场传感器的理论分析和制作

3.2.1 理论分析



图 3.2.1 微圆柱谐振腔磁场传感器结构示意图

当光波在光学微腔内传播时,满足光学谐振条件的光波在光学微腔内形成振荡,传感器结构和模式传输情况如图 3.2.1 所示。第 m 个模式在微腔内传播一周的光程为

$$n_{eff}L = m\lambda_c \tag{3.2.1}$$

其中,  $n_{eff}$ 为有效折射率,  $L=2\pi R$ 为光波在微腔内往返一周的距离, R 是微腔的直径,  $\lambda_c$ 为谐振波长。自由光谱(相邻模式间隔)为

$$\Delta \lambda_c = \frac{\lambda_c^2}{n_{eff}L}$$
(3.2.2)

所以光学微腔的尺寸L越小,FSR 越大,就越有利于模式的调谐。

光学微腔的品质因子Q是描述微腔内能量衰减的参数,可以表示为<sup>[85]</sup>

$$Q = \omega_c \frac{U}{\frac{du}{dt}} = \frac{\omega_c}{\delta\omega_c}$$
(3.2.2)

其中, U为微腔内的总能量,  $\omega_c$ 为谐振腔的谐振频率,  $\delta\omega_c$ 为模式的线宽。所以, 品质因子Q越大, 微腔内的能量衰减的就越慢, 传感器的灵敏度就越高。反映到光谱中, Q值可以用波长和半高宽来表示 $Q = \frac{\lambda_c}{\Delta\lambda}$ 。

为了提高 WGM 型传感器的灵敏度,必须提高光场在传感部分的分布,即减小微圆 柱管壁的厚度和提高光与微腔的耦合效率。由于光波在微纳光纤中传播时,电场能量大 部分在光纤外面,有很强的倏势场,所以采用微纳光纤作为光场耦合的介质,使磁流体 与光场的交叠比例提高,进一步提高传感器的灵敏度。

微圆柱腔与锥形光纤耦合产生的透射谱是一个洛伦兹型的波谷,对待测物理量的响应可以通过光谱的变化反映出来,既可以是谐振波长的移动,也可以是某一波长下输出的光功率的变化。当利用光功率表示时,灵敏度可以写成输出功率的变化与折射率变化的比值。

## 3.2.2 锥形光纤的制备工艺



图 3.2.2 火焰拉锥平台

目前,锥形光纤的制备工艺有两种:第一为氢氟酸腐蚀法,第二是熔融拉锥法<sup>[140]</sup>。 熔融拉锥法就是在光纤被加热的同时两端施加相反方向的拉力,将光纤拉制成所需锥形 光纤。这种方法制备的锥形光纤,半径变化缓慢,光纤半径大小可控,重复性好,光纤 表面较光滑。熔融拉锥法使用的加热方式有氢氧焰喷灯、CO<sub>2</sub>激光器与熔接机。本论文 中采用的加热源为氢氧焰喷灯,拉锥平台如图 3.2.2 所示。虽然使用氢氧焰喷灯制备的 光纤锥相较于熔接机制备的锥区较长,但锥区的直径变化缓慢,满足实验的需求。

为了更好的掌握锥形光纤的制备情况,使用电动位移平台设置和控制参数,结合光 学显微镜进行监控。在锥形光纤制备的过程中,影响拉锥结果的因素主要是参数和火焰 的控制以及拉锥平台的调平。所以为了保证锥形光纤的均匀性、光滑性,必须对装置多 次调节。锥形光纤制备的步骤如下:

(1)调节拉锥平台保证光纤夹具在同一水平面,调节火焰位置使其合适。

(2)打开电动位移平台控制主机,连接电脑,设置左右运行距离、运行速度、运行次数等参数。

(3)将需要拉锥的部分的光纤涂覆层用剥线钳剥离,并用除尘纸擦拭干净,放置 在拉锥平台上,用光纤夹具固定。

(4)打开氢氧焰喷灯,点击电脑屏幕上"开始"按钮,进行锥形光纤的制备;拉制完成关掉氢氧焰喷灯,取下光纤,用光学显微镜观测锥区的腰径、长度等。

### 3.2.3 传感器的制作

制作传感器时,除了需要制作表面光滑、圆对称的锥型光纤外,还需要制作薄壁微圆柱谐振腔。谐振腔使用的是郑州英诺高科有限公司的标准聚酰亚胺涂层(TSP)系列的TSP100170型号的空芯光纤制成。相关参数,材料是人造熔融石英,工作温度最高为350°C,内径和外径分别为100±04 μm 和 164±06 μm,聚酰亚胺的厚度为12 μm。微圆柱谐振腔的制作过程分为三步,剥除涂覆层、氢氟酸腐蚀、熔融拉锥,具体如下:

(1) 首先将空心光纤的涂覆层用小刀刮除, 酒精擦拭干净后放到微槽中。

(2)用浓度为40%的氢氟酸进行腐蚀。在腐蚀时为了避免氢氟酸进入光纤,光纤长度大于微槽长度。腐蚀一定时间后,将光纤取出,去离子水多次少量冲洗干净,并进行干燥处理。腐蚀后的空芯光纤和锥形光纤搭制成传感器后没有谐振峰的出现。分析原因是空芯光纤表面较粗糙,且微腔的尺寸较大。

(3)为了降低光纤表面的粗糙度,减小微腔尺寸,对腐蚀后空芯光纤进行短时间 和短距离的火焰熔融拉锥。截取最中间的光纤作为谐振腔。



图 3.2.4 (a) 腐蚀 22 分钟传感器的光谱图 (b) 1540.58nm 谐振峰的品质因子 谐振腔和锥形光纤垂直放置搭制传感器。传感器有谐振峰的出现,且谐振峰的强度 和谐振腔的尺寸有关。腐蚀 18 分钟熔融拉锥后得到的谐振腔和腐蚀 22 分钟熔融拉锥后 得到的谐振腔制成的传感器得到的光谱如图 3.2.3 (a)和图 3.2.4(a)所示。从图中可以看到, 腐蚀时间较长的谐振腔制成的传感器的光谱杂峰较少,相对较好。对两个光谱图中能量 较大的谐振峰计算品质因子 Q,结果如图 3.2.3 (b)和图 3.2.4(b)所示。腐蚀 18 分钟谐振 腔的传感器的品质因子 Q 为 8.234\*10<sup>3</sup>,腐蚀 22 分钟谐振腔的传感器的品质因子 Q 为 2.698\*10<sup>4</sup>。腐蚀时间较长的传感器得到的品质因子较大,符合实验的要求。

腐蚀 22 分钟得到的谐振腔拉锥前后的空芯光纤的光学显微图如 3.2.5 所示。图 3.2.5 (a) 为氢氟酸腐蚀后空芯光纤的显微图,图 3.2.5 (b) 为腐蚀完进一步拉锥得到的空芯光

纤的显微图。腐蚀后的空芯光纤的壁厚为 $\frac{1}{2}$ ·(114-100)=7 μm,腐蚀速度为 0.86 μm/min; 进一步拉锥后空芯光纤的壁厚是拉锥前的一半为 $\frac{1}{2}$ ·(55.046-48.399)=3.32 μm,可以更 好的满足传感器高灵敏度的要求。



图 3.2.5 (a) 腐蚀 22 分钟后 HF 光学显微图 (b) 进一步拉锥后 HF 光学显微图

通过熔融拉锥的方法将单模光纤制作成锥形光纤,其中单模光纤的纤芯和包层的直径分别为9μm和125μm。由于锥形单模光纤的直径只有1μm,不容易取下进行传感器的制作,所以拉制完成后需要将其用紫外胶原位固定在"凹"型的载玻片上,之后将载玻片固定在磁场中,保证光纤在磁场的中轴线上,然后将载玻片固定。微圆柱谐振腔固定在高精度三维位移台上,通过调节位移台,使谐振腔与锥形单模光纤垂直,调出谐振峰。然后通过毛细现象将磁流体注入微谐振腔,两端用紫外胶密封,防止磁流体溢出。WGM型磁场传感器制作完成。这些操作一定要慢,避免锥形光纤和谐振腔的损坏。



## 3.3 实验结果与讨论

图 3.3.1 磁场测量实验装置图

图 3.3.1 是磁场测量的实验装置,采用 SM125 光纤光栅传感解调仪进行解调,波长 范围是 1510 nm-1590 nm,扫描频率是 1 Hz-10 Hz。磁场由直径为 15cm 的 N52 钕磁铁 提供,磁场的大小通过调节磁铁与传感器之间的距离来改变。传感器与磁铁的中轴线垂 直,保证磁流体所在的微圆柱谐振腔与磁场方向垂直。并使用北京卓盛佳磁电技术有限 公司得特斯拉计实时检测磁场的大小,精度为 0.1 Gs。

在室温下对磁场传感器感知磁场的性能进行测试。外界磁场从 0 到 160 Oe 每间隔 10 Oe 变化,并记录数据。图 3.2.2 是磁场传感器制成后的光谱图。和注入磁流体前的谐 振光谱比较发现,谐振峰的消光比急剧减小,谐振峰的位置和个数均发生较大变化。主 要原因是磁流体对光的能量吸收较大,改变了谐振条件。从图中可知该传感器的光谱图 最高峰位于-19dB 处,又因为使用的解调设备 SM125 能够显示的透射最高的能量峰值是 -11dB,所以该传感器的插入损耗是 8 dB。



图 3.3.2 磁场传感器透射光谱图

图 3.3.3 是传感器 1547.85 nm 谐振峰对磁场强度变化的响应。从图中可以发现,随着外界磁场强度的增强,光谱中谐振峰能量逐渐减弱,但波长只有极小的变化。产生这种现象的原因是外界磁场强度的改变引起磁流体折射率的变化,进而引起磁流体对光的能量的吸收系数的变化。折射率变化引起的谐振峰波长的改变量较小,而引起的对谐振腔内磁流体对能量吸收的变化较大,反映到光谱上就是谐振峰能量的变化。所以该传感器可以实现通过能量测量磁场。当磁场低于 40 Oe 时,能量变化较小,这是由于磁流体处于初始磁化阶段;磁场处于 40-140 Oe 时,光谱中谐振峰的能量线性的减小;磁场大



于 140 Oe 时,光谱接近一条直线,磁流体磁致饱和。

图 3.3.3 1547.85 nm 谐振峰对磁场强度响应光谱图

1547.85 nm 谐振峰的能量随磁场强度的变化规律如图 3.3.4 所示。图中红点为实验 观测值,实线为线性拟合直线。该图表明传感器在 40-140 Oe 范围内的磁场灵敏度为 0.04 dB/Oe,灵敏度较小,线性拟合度为 0.9822。100 Oe 时的实测点偏离拟合直线较远,可 能是测量过程中测量平台的微小振动引起的。同时表明传感器灵敏度变化符合郎之万函 数对磁流体的折射率随环境磁场强度变化的描述。



图 3.3.4 1547.85 nm 谐振峰对磁场强度响应灵敏度

表 3.3.1 给出了本传感器和已报道的 WGM 型的光纤磁场传感器的性能比较。文献 采用波长解调方式,本工作采用能量解调,但这类传感器的磁场灵敏度均低于已报道的 多数干涉型传感器。与波长解调相比,能量解调更容易计算,性价比更高。

西北大学博士学位论文

文献	灵敏度	测量范围	有无矢量性
[65]	4.3 pm/Oe	0-573 Oe	无
[142]	4.988 pm/Oe	0-447 Oe	无
本工作	0.04 dB/Oe	40-140 Oe	无

图 3.3.1 基于磁流体的 WGM 型光纤磁场传感器性能对比表

# 3.4 本章小结

本章提出了一种基于回音壁模式的光纤磁场传感器,对光谱特性和传感机理进行了 分析,同时介绍了锥形光纤和微圆柱型谐振腔的制作。实验结果表明,采用能量解调方 式对该传感器进行解调,与波长解调相比,能量解调更容易计算,性价比更高;该传感 器在 40-140 Oe 磁场强度范围内,灵敏度为 0.04 dB/Oe,灵敏度一般。温度对磁流体折 射率影响较大,但该传感器对微小移动较敏感,无法对其进行温度响应的测量。

# 第四章 基于锥形细芯光纤磁场传感器

为了实现井下仪器相对位置的精确测量,光纤磁场传感器需具有更高灵敏度。第三 章设计的 WGM 型磁场传感器虽然进行了较好的优化,但磁场灵敏度的实验值与理论相 差较大,实验结果给出的灵敏度仍然不能满足实际需求。相比之下,干涉型光纤传感器 具有更高的折射率灵敏度。因此本章提出了一种以折射率灵敏度较高的干涉型传感器为 基础,以微米锥形光纤为传感元件的磁场传感器。实验中为保证传感器优良的机械性能 和传感性能,根据第二章的理论分析可知,锥形光纤的腰锥直径约为十几微米较好。

# 4.1 基于 Mach-Zehnder 干涉的光纤磁场传感器

全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 是相位调制型光纤传感器,利用外界因素引起的光波相位变化来探测各种物理量,也可以利用干涉测量技术把相位变化转换成光波强度变化。这类传感器由于制作简单、成本低廉、结构小巧、灵敏度高等诸多优点受到极大关注,可应用于温度、压力、电流、磁场、折射率、液位的等多种物理量的传感测量。 全光纤 MZI 传感器的形式灵活多样,如熔融拉锥、错位熔接和激光器微加工(刻槽、 打孔)等。本章利用氢氧焰喷灯作为加热源对光纤进行火焰拉锥,制作的微米锥形光纤 结构对称、表面光滑,锥区的直径和长度较易控制。以此锥形光纤作为传感单元设计全 光纤 MZI,光波在纤芯传播时耦合进入包层,激发出高阶包层模。易受环境影响的高阶 包层模和纤芯模在传输过程中进一步产生模间干涉,实现对外界磁场的测量。

## 4.1.1 传感器的制作



图 4.1.1 传感器结构示意图

图 4.1.1 所示是传感器的结构示意图。一段长度为 40 mm 的细芯光纤熔接于两段长 度为 2 mm 的多模光纤中间,三段光纤均需剥掉涂覆层,用酒精擦拭干净。细芯光纤的 纤芯直径是 4.2 μm,包层直径是 125 μm;多模光纤的纤芯直径是 105 μm,包层直径是 125 μm;所用的传导单模光纤纤芯和包层的直径分别为 9 μm 和 125 μm.将熔接好的结 构放置在光纤火焰拉锥平台上,调整放置位置使细芯光纤的中心和火焰位置对准。设置 程序中电动位移台左右移动距离为 8 mm,运行速度为 1,运行次数为 1;打开氢氧焰喷 灯,预热,点击程序中的开始按钮进行拉锥;运行停止,关闭火焰;微调三维平移台, 使光纤拉直;调整毛细管的位置使锥区最细部分位于毛细管的中间;往毛细管中注入磁 流体,并使其充满整个毛细管,毛细管两端点紫外胶,并用紫外灯照射使胶固化。为了 保证传感结构中锥形光纤处于拉直状态,在光纤放置在拉锥平台前套入毛细管,采用原 位拉锥和封装。拉锥完成后的锥形细芯光纤的腰径为 13.58 μm,锥区长度为 18 mm. 锥



图 4.1.2 锥形细芯光纤渐变区和锥腰显微图

在该传感器结构中,两小段多模光纤的作用是作为耦合器实现纤芯基模到包层模的 耦合和复耦合;而锥形细芯光纤是传感器的核心部分,它的作用是作为干涉臂。传感器 的传感机理是:单模光纤和多模光纤纤芯失配熔接,光由单模光纤经多模光纤向锥形细 芯光纤传输时,部分纤芯模耦合至光纤包层或光纤外,激发出包层模或辐射模(光纤表 面倏势场);包层模再经锥形光纤和多模光纤复耦合到单模光纤,并进一步与纤芯基模 发生干涉。

## 4.1.2 理论分析

当光由单模光纤传输到第一段多模光纤时会激发一系列的线偏振模式{LPnm},激发的线偏振模式的个数和阶数由多模光纤的长度和熔接条件决定<sup>[143]</sup>。由于单模光纤、多模光纤和细芯光纤都是圆对称结构,且假设熔接时完全对芯,则在锥形细芯光纤中只有对称模式{LP0m}被激发<sup>[144]</sup>。假设{LP0m}第*m*阶模式的电场为*ψ<sub>m</sub>*(*r*),传输到锥形光纤左

端时的电场可表示为 $E(r,0) = \sum_{m=1}^{M} c_m \psi_m(r)$ 。锥形光纤中间平坦区域(腰径处)由于火焰 拉锥的缘故,纤芯和包层的折射率差较小,所以这时的细芯光纤可看成是多模波导结构, 且归一化常数较大。另一方面,由于锥形细芯光纤中间平坦区域表面倏势场的存在和磁 流体对光的吸收作用,当光传输到此时能量就会存在不可忽视的衰减<sup>[145]</sup>。当光在细芯 光纤中传输距离为L时的电场可以表示为

$$E(r,L) = \sum_{m=1}^{M} c_m \psi_m(r) e^{-\gamma_m L} e^{j\beta_m L}$$

$$(4.1.1)$$

其中, γ<sub>m</sub>和 β<sub>m</sub>分别是损耗吸收系数和第 m阶本征模的传播常数。因此输出的光的能量 可以表示为

$$E(r,L) = \frac{\left|\int_{0}^{\infty} E(r,0)E(r,L)dr\right|^{2}}{\int_{0}^{\infty} \left|E(r,L)\right|^{2} r dr \int_{0}^{\infty} \left|E(r,0)\right|^{2} r dr}$$
(4.1.2)

随着外界磁场的变化,磁流体的折射率和衰减系数会发生变化,进一步引起光的损耗系数 $\gamma_m$ 和第*m*阶本征模的传播常数 $\beta_m$ 的改变。反映到光谱上就是光谱的能量或波长的改变,且一一对应。所以可以用光谱的变化来表示外界磁场的变化。

# 4.2 实验结果与讨论



图 4.2.1 磁场测量实验装置图

4.2.1 磁场传感实验

图 4.2.1 是磁场测量的实验装置,采用 SM125 光纤光栅传感解调仪进行解调,波长 范围是 1510 nm-1590 nm, 扫描频率是 1 Hz-10 Hz。均匀磁场由两块直径为 15 cm 的 N52 钕磁铁提供, 磁场的大小通过调节磁铁之间的距离来改变。传感器与两块磁铁的中轴线 垂直,保证传输光的方向与磁场方向垂直。使用实时检测磁场的大小的特斯拉计与第三 章相同。





Cladding mode 2

0.02

Cladding mode 3

Spatial frequency(1/nm)

0.04

传感结构在密封于磁流体前后透射光谱如图 4.2.2 所示。由图可知,当锥形光纤结 构处于空气中时,存在的传输模式较多,干涉谱中存在了较多干涉峰;当把该结构密封 于磁流体中时,由于锥形细芯光纤外的折射率的变化、磁流体对光的吸收和毛细管对光 的束缚作用,使参与干涉的模式减少,且光谱能量有少许减弱。从图中可知该传感器的

0.2

0.1

0.0 0.00 光谱图最高峰能量是-48dB,又因为使用的解调设备 SM125 能够显示的透射最高的能量 峰值是-11dB,所以该传感器的插入损耗是 37 dB。

对制作完成的磁场传感器不外加磁场时的透射光谱进行快速傅里叶变化,结果如图 4.2.3 所示。由图可得,干涉结构中存在四个模式的干涉,能量较强的模式有两个,分别 是纤芯基模和一个包层模,这也是产生干涉的两个主要模式。







图 4.2.5 1543nm 波峰磁场灵敏度曲线

在室温下对磁场传感器的传感性能进行测试。磁场强度从 0 到 170 Oe 每间隔 10 Oe 变化,并记录数据。传感器干涉光谱对磁场强度变化的响应情况如图 4.2.4 所示。由图 可知,随着外界磁场强度的增强,光谱中波峰的能量逐渐减弱,但波长几乎不变。这意

味着该传感器可以实现通过能量测量磁场。产生这种现象的原因是,磁流体在外加磁场的作用下,其内部的磁性颗粒出现团聚现象,形成磁链,导致磁流体对光的吸收和折射率的变化,但折射率变化较小,几乎不能引起光谱波长的变化。当磁场强度低于 40 Oe时,光谱变化较小,这是由于磁流体处于初始磁化阶段;磁场强度处于 40-160 Oe 时,干涉光谱中波峰能量线性的减小,以 1543 nm 波峰能量为例,可知能量改变了 15 dB; 磁场强度大于 160 Oe 时,光谱接近一条直线,无法测量传感器对磁场的感知能力。这主要是该传感器的结构限制。

图 4.2.5 是 1543 nm 波峰的能量随磁场的变化规律。图中红色的点是实验测量值, 线性拟合趋势如蓝色直线所示。由图可知该传感器的磁场灵敏度为 0.10 dB/Oe, 线性拟 合度为 0.9967。同时表明传感器灵敏度变化符合郎之万函数对磁流体的折射率随环境磁 场变化的描述。与同期的波长解调的光纤磁场传感器相比,灵敏度有所提升,大约提高 了 2 倍。



4.2.2 温度传感实验



磁流体的折射率不仅是磁场的函数,同时也是温度的函数。所以在对传感器传感性 能进行测试时,必须考虑温度对传感器的影响。将传感器放置在温控箱中,改变温控箱 的温度,从 20 ℃ 到 80 ℃ 每间隔 10 ℃ 记录一次光谱。不同温度下传感器的干涉光谱对 温度的响应如图 4.2.6 所示。由图可知,随着环境温度的升高,光谱中波峰的能量逐渐 减小,波长向长波方向漂移。图 4.2.7 是 1543 nm 处传感器的温度灵敏度曲线,图中黑 色的点是波长对应的实测点,红色的是强度对应的实测点,实线是线性拟合直线。由图可知,传感器的温度灵敏度为 0.029 dB/°C 和 54.73 pm/°C,线性拟合度分别为 0.9892 和 0.9982。这主要是由于玻璃毛细管的热膨胀效应和磁流体折射率的变化引起的。



图 4.2.7 1543 nm 波峰的温度灵敏度曲线

### 4.2.3 磁场和温度交叉灵敏问题

磁流体的折射率变化不仅和磁场有关,还和温度有关,具体关系可用郎之万函数表示

$$n_{MF}(H,T) = \left[n_{s} - n_{0}\right] \left[ \coth\left(\alpha \frac{H - H_{c,n}}{T}\right) - \frac{T}{\alpha \left(H - H_{c,n}\right)} \right] + n_{0}, \ H > H_{c,n} \qquad (4.2.1)$$

所以,根据磁流体折射率变化的磁场传感器的磁场和温度的交叉灵敏问题必须考虑。

根据上述磁场和温度灵敏度,可以利用灵敏度矩阵解决交叉灵敏问题,矩阵如下所示

$$\begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix}$$
(4.2.2)

其中, $\Delta I$ 和 $\Delta \lambda$ 分别为干涉峰的强度和波长的该变量, $\Delta H$ 和 $\Delta T$ 分别为对应的磁场和温度的该变量。*K*是灵敏度矩阵系数, $k_{11}$ 、 $k_{12}$ 、 $k_{21}$ 和 $k_{22}$ 是磁场和温度灵敏度。由(4.2.2)式可得

$$\begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(K)} \begin{bmatrix} k_{22} & -k_{21} \\ -k_{12} & k_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$
(4.2.3)

其中, det(K) =  $k_1 k_{22} - k_1 k_{21}$ . 将磁场和温度对应的灵敏度代入(4.2.3)式, 可得

$$\begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{-0.0569} \begin{bmatrix} 0.05473 & 0 \\ -0.029 & -1.03922 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$
(4.2.4)

由(4.2.4)式可得,灵敏度矩阵条件数为19.003,这为该传感器的定性评估提供了 一个方法。矩阵条件数越大,证明传感器抗干扰能力越弱。因此,为了实现传感器磁场 和温度较小的交叉灵敏,条件数越小越好。

## 4.3 本章小结

本章介绍了一种锥形细芯光纤的熔融拉制的方法,并基于锥形细芯光纤研制了一种 MZI型磁场传感器。对传感器的光谱特性、传感机理和空间频谱进行了理论分析。实验 结果表明,在40-160 Oe 磁场强度范围内,传感器的磁场灵敏度为0.10 dB/Oe,高于同 种类型的能量解调的传感器<sup>[149]</sup>。在为20-80 ℃温度范围内,温度灵敏度为54.73 pm/℃, 存在交叉灵敏的问题。用系数矩阵对交叉灵敏问题进行了分析。相对于上一章 WGM 型 光纤磁场传感器,此传感器结构简单,磁场灵敏度更高。

# 第五章 基于锥形少模光纤磁场传感器

第四章提出的基于锥形细芯光纤的磁场传感器,利用熔融拉锥改变光纤结构的方式, 激发出能量较强的包层模,可增强传感器对磁场的响应灵敏度。对井下仪器进行准确定 位时,磁场传感器不仅需要测量磁场强度的大小,同时需要测量磁场强度的方向。因此, 本章提出了一种基于锥形少模光纤的磁场传感器,同时在锥形少模光纤的腰锥部分用飞 秒激光做微加工处理,形成折射率调制区,在传感区域形成非圆对称结构,使传感器对 不同方向的磁场强度变化具有不同的响应,在测量磁场强度大小的同时实现了对磁场强 度方向的识别。

# 5.1 传感器的传感原理和制作



5.1.1 传感器的制作

图 5.1.1 传感器结构示意图

图 5.1.1 所示是传感器的结构示意图。一段剥掉涂覆层、用酒精擦拭干净的长度为 30 mm 的两模光纤对芯熔接于两标准单模中间,使用的熔接机是商用的光纤熔接机(藤 仓 FSM-60S)。两模光纤为三包层结构,光纤横截面的显微图和纤芯及包层折射率分布 如图 5.1.2 所示。各包层的直径分别为 26μm、40 μm 和 125 μm;标准单模光纤纤芯和包 层的直径分别为 9 μm 和 125 μm.将熔接好的结构放置在光纤火焰拉锥平台上,调整放 置位置使两模光纤的中心和火焰位置对准。设置程序中运行参数,打开氢氧焰喷灯,预 热,点击程序中的开始按钮进行拉锥;运行停止,关闭火焰。将锥形光纤取下,放置在 飞秒微加工平台,在两模光纤的锥腰部分的包层一侧进行微加工,刻蚀出折射率调制区, 显微图如图 5.1.3 所示。微加工平台如图 5.1.4 所示。飞秒激光的脉冲为 50 fs,中心波长 为 800 nm,使用功率为 40 mW.将锥形两模光纤套入毛细管,并拉直固定在三维平移台上,注入磁流体,并使其充满整个毛细管,毛细管两端点紫外胶,并用紫外灯照射使胶固化。拉锥完成后的锥形细芯光纤的腰径为 14 μm,锥区长度为 16 mm.所用毛细管长度为 80 mm,内径为 0.5 mm,磁流体覆盖整个锥区。



图 5.1.2 两模光纤横截面显微图和折射率分布图



图 5.1.3 飞秒激光刻蚀的折射率调制区显微图



图 5.1.4 飞秒激光微加工平台

## 5.1.2 传感器的传感原理

本章使用的少模光纤为两模光纤,两模光纤中可以传输的两个模式为LP<sub>01</sub>模和LP<sub>11</sub>模。光波由标准单模光纤传输进入两模光纤时,只能激发LP<sub>01</sub>模,而LP<sub>11</sub>模可以通过引入应力点、倾斜Bragg光栅或Bragg光栅进行激发<sup>[150-152]</sup>。

在本传感结构中给出了一种激发 LP<sub>11</sub> 模的方式,就是对两模光纤进行火焰拉锥并用 飞秒激光器在锥腰部分刻线形成折射率调制区域。所以传感器的传感机理是光由单模光 纤传输进入锥形两模光纤,激发出 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模,这两种模式在导出单模中产生干 涉。根据模式干涉理论,两种模式干涉时产生的相位差为 $\Phi = 2\pi\Delta n_{eff}L/\lambda$ ,干涉光谱的 强度为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda}\right)$$
(5.1.1)

其中, $I_1 和 I_2 分别为 LP_{01}$ 模和 LP<sub>11</sub>模的光强,I为实验测量光强;L是干涉长度,有效折射率差为 $\Delta n_{eff} = n_1(\lambda) - n_2(\lambda, n_{ext})$ , $n_1 \ n_2 \ln n_{ext}$ 分别是 LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模和磁流体的有效折射率。由于锥形两模光纤的包层直径比较小,LP<sub>11</sub>模式的有效折射率极易受磁流体的影响。假设当磁流体的折射率由于外界磁场的变化发生微小改变时,两种模式相位差不变,则磁流体折射率的变化和光谱变化之间的关系可以表示为

$$S = \frac{d\lambda}{dn_{ext}} = \frac{\frac{-\lambda}{\Delta n_{eff}} \frac{\partial n_2}{\partial n_{ext}}}{1 - \frac{\lambda}{\Delta n_{eff}} \left(\frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_2}{\partial \lambda}\right)} = \lambda \cdot \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{1}{\Delta n_{eff}} \frac{d\Delta n_{eff}}{dn_{ext}}\right)$$
(5.1.2)

根据外加磁场和磁流体折射率的关系以及(5.1.2)式,进一步验证了磁流体折射率的改变引起的 LP<sub>01</sub>模式的有效折射率变化较小,而 LP<sub>11</sub>模式的有效折射率的变化较大, 且 $d\Delta n_{eff}/dn_{ext} < 0^{[156]}$ 。同时 $\left(\frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_2}{\partial \lambda}\right) > \frac{\Delta n_{eff}}{\lambda}$ ,所以分散因子 $\Gamma < 0$ ,  $S > 0^{[152]}$ 。因此,

随着磁流体折射率的增加,光谱向长波方向漂移。

锥形两模光纤结构在使用飞秒激光进行折射率调制前,透射光谱近似一条直线,如图 5.1.5 黑色线所示;调制之后,光谱出现干涉谷,消光比为 12 dB,如图 5.1.5 红色线所 示;将结构密封于磁流体制成磁场传感器后,光谱形状没有变化,如图 5.1.5 蓝色线所 示,但发生了红移现象,这是因为磁流体的折射率高于空气的折射率,小于光纤纤芯和 包层的折射率。从图可知制作好的磁场传感器的插入损耗为 32 dB。

为了更好的分析飞秒激光调制前后光纤中被激发的模式,对调制前后的透射光谱进行快速傅里叶变换,得到空间频率光谱,如图 5.1.6 所示。由图可知,折射率调制前,

只有一个模式即 LP<sub>01</sub>模式的存在;调制之后,两模光纤中的第二个模式 LP<sub>11</sub>模式被激发,由于拉锥的原因,高阶包层模 LP<sub>21</sub>模同时被激发,但能量较小,对传感器的透射光谱的贡献可以忽略不计。



图 5.1.5 飞秒激光折射率调制前后和密封于磁流体后结构透射光谱



图 5.1.6 飞秒激光折射率调制前后光纤结构的空间频率传输光谱

# 5.2 实验结果和讨论

因为磁流体的折射率对外界环境的磁场和温度都较敏感,所以对传感器进行了磁场 和温度的传感实验测量,并对其进行分析。

## 5.2.1 磁场传感实验



图 5.2.1 磁场测量实验装置图

图 5.2.1 是磁场测量的实验装置。实验中使用的光源(SLD)是型号是 S5FC1005P, 光谱范围为 1500-1600 nm;使用的解调设备是分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(OSA)。 使用的磁流体与第三章使用磁流体是同一公司提供。均匀的磁场由电磁铁提供,通过调 节直流稳压电源的电压(或电流)大小改变磁场的大小,通过旋转电磁铁来调节传感器 与磁场的相对方向。电磁铁固定在标有刻度可以 360° 旋转的平台上。同时,用分辨率 为 0.1 Gs 的特斯拉计实时测量施加磁场的大小。



图 5.2.2 0°时不同磁场大小下传感器的透射光谱

图 5.2.2 是室温下外界磁场从 0 到 140 Oe 每间隔 10 Oe 变化时, 传感器干涉光谱的 响应, 测量时传感器和磁场的相对角度标定为 0°。从图中可以发现,随着外界磁场的增

强,干涉光谱中波谷能量逐渐减弱,而且波长向长波长方向漂移。这意味着该传感器可以实现通过能量和波长同时测量磁场。当磁场大小低于 20 Oe 时,光谱几乎不变;当磁场大小为 20-60 Oe 时,干涉光谱中波谷能量和波长变化较缓慢,这是由于磁流体处于初始磁化阶段;磁场大于 140 Oe 时,测量波谷消失。



图 5.2.4 0°时不同磁场大小下传感器的透射光谱重复测量灵敏度曲线

图 5.2.3 是传感器透射光谱波谷能量随磁场大小变化的响应规律。红色的点是波谷的波长变化的测量值,蓝色的点是波谷的强度变化的测量值,而红色的实线及蓝色的虚线都是线性拟合直线。由图可知,传感器对于波长在 40-120 Oe 范围内有较好的线性的响应,传感器的磁场灵敏度为 71.98 pm/Oe,线性拟合度为 0.9928。传感器对于强度在 80-130 Oe 范围内有较好的线性响应,磁场灵敏度为 0.11d B/Oe,线性拟合度为 0.9967。

传感器对磁场响应进行了重复性测量,传感器透射光谱的变化和对磁场响应灵敏度 基本相同。图 5.2.4 给出了任意一次波长随磁场变化而变化时传感器的磁场灵敏度。从 图中可知,磁场在 40-120 Oe 范围内,由小变大时的灵敏度为 71.98 pm/Oe,由大变小时 的灵敏度为 71.99 pm/Oe,重复性较好。波谷的波长稍有差别,这主要是由于测量误差 引起的。



图 5.2.6 90 Oe 时不同磁场方向光谱波谷能量差与磁场方向关系

由于该传感器存在折射率调制区,使传感结构存在非圆对称性,所以可以测量磁场 方向。为了证明传感器的磁场方向相关性,实验中固定磁场大小,旋转电磁铁,调整磁 场方向,观察光谱的变化。在实验中,测量角度范围为0°-360°(定义为一周),每间隔 20°记录一次数据。图 5.2.5 给出了 240°-320°(四分之一周)范围内的透射光谱图。干涉 谷的波长几乎没有变化,而强度变化较大。证明了传感器的磁场方向相关性。

在 90 Oe 磁场大小,对传感器对磁场方向的响应进行了测量,干涉谷的相对强度和 磁场方向关系如图 5.2.6 所示。从图中可知,在 0°-360° 测量范围内,传感器在极坐标下 呈现不对称的 "8"字型分布,这和飞秒激光刻写的调制区域的位置和形状相关。响应 度最大的角度为 320°,此时的相对强度为 7 dB;响应度最小的角度为 40°,此时的相对强度为 7 dB;响应度最小的角度为 40°,此时的相对

文献	传感机制	灵敏度	测量范围	有无矢量性
[155]	模式干涉 (透射)	22.20 pm/Oe	50-150 Oe	有
[156]	模式干涉 (透射)	44.57 pm/Oe	50-200 Oe	无
[157]	模式干涉 (透射)	98.20 pm/Oe	0-140 Oe	无
[59]	模式干涉 (反射)	174.4 pm/Oe	100-225 Oe	无
		or -0.02 dB/Oe		
第四章工作	模式干涉 (反射)	- 0.10 dB/Oe	40-160 Oe	无
本工作	模式干涉 (透射)	71.98 pm/Oe	40-120 Oe	有
		or -0.11 dB/Oe	or 80-130 Oe	

图 5.2.1 基于磁流体的光纤磁场传感器性能对比表

根据实验测量结果可知, 传感器实现动态测量中磁场方向的测量, 但图 5.2.6 中出 现许多相对强度大小相同的点。因此, 在实际应用中, 需要找到传感器干涉光谱强度变 化最大的方向和变化最小的方向, 再结合图 5.2.3 就可以找到磁场强度和干涉光谱一一 对应的关系, 从而更好的测量磁场。

表 5.2.1 给出了本传感器和已报道的代表性的传感器的性能比较。波长解调的传感器的磁场灵敏度相差不大,能量解调的传感器的磁场灵敏度是文献[56]的 3 倍。与波长解调相比,能量解调更容易计算,性价比更高。同时,本传感器对磁场还具有方向相关性。

### 5.2.2 温度传感实验

为了得到传感器对温度的响应,将传感器放置在第四章中使用的温控箱中,温度设置与上章相同。从 20 ℃ 到 80 ℃ 每间隔 10 ℃ 记录一次光谱。图 5.2.7 是传感器的温度灵敏度曲线,图中红色的点是波长对应的实测点,蓝色的是强度对应的实测点,实线是
线性拟合直线。由图可知, 传感器的温度灵敏度为 10.03 pm/℃ 和 0.01dB/℃, 线性拟合度分别为 0.99996 和 0.99527。由此可知, 温度导致的传感器磁场测量误差为 10<sup>-2</sup> 数量级。 而磁诱导导致的磁流体的折射率变化为 5\*10<sup>-2</sup>, 实际可能会更小<sup>[158]</sup>。由于传感器对温度 较低的响应,所以在测量磁场时, 温度对传感器的响应可以忽略不计。



图 5.2.7 传感器温度灵敏度

#### 5.3 本章小结

本章提出了一种基于火焰拉锥和飞秒激光刻蚀激发两模光纤中 LP<sub>11</sub>模式的方法,并 在此基础上研制了一种具有磁场强度方向相关性的光纤磁场传感器。通过模式耦合理论 对传感器传感原理进行了分析。由于 LP<sub>11</sub>模的有效折射率对外界环境折射率变化较灵敏 以及传感结构的非圆对称性,使传感器干涉谱对外界磁场强度的响应较明显。通过磁场 测量实验可知,传感器具有磁场方向相关性。使用波长方式对传感器进行解调,在 40-1200e 磁场强度范围内,传感器的灵敏度为 71.98 pm/Oe;能量解调时,在 80-130Oe 磁场强度范围,传感器灵敏度为 0.11 dB/Oe。最后对传感器的温度响应进行测量,发现 温度变化对磁场测量引入的误差较小,可以忽略。

## 第六章 包层型光纤光栅磁场传感器

第三章提出的光纤磁场传感器的灵敏度不能满足井下实际需求。第四章和第五章研制的光纤磁场传感器的传感机理是模式干涉,属于干涉型传感器,灵敏度较高,同时具有方向相关性,但稳定性相对较低,复用性性差,不便于组网。为了解决此问题,提出利用新型包层型光纤光栅作为磁场传感器的传感单元,制作磁场传感器,将包层型光纤光栅写制在光纤的包层(位于光纤纤芯一侧),形成非圆对称结构,可用于磁场方向的测量。

标准 FBG 的纤芯基模被限制在光纤纤芯进行稳定的传输,限制了 FBG 传感器对外 界环境物理量(应变、弯曲、折射率和磁场等)变化的响应,而解决这一问题的其中一 种方式就是激发包层模,例如利用倾斜光栅和错位熔接等方式激发包层模<sup>[159-161]</sup>。包层 模由于其特殊的模场分布,对光纤弯曲和外界环境的折射率变化都具有良好的响应,同 时被限定在纤芯的纤芯模式又可以实现温度的自校准和系统能量微扰的自校准。

基于飞秒激光器结合相位掩模板技术刻写的 FBG,如果长时间激光曝光,由于"自 聚焦"效应<sup>[162]</sup>,不仅会在光纤的纤芯内形成光栅,同时也会在光纤的包层形成 FBG, 并且激发出类似于倾斜光栅的"ghost"模的 LP<sub>11</sub> 共振模<sup>[163]</sup>。当飞秒激光聚焦的位置偏 离纤芯足够大时,借助相位掩模板刻写的 FBG 会激发出更高阶的包层模。经过实验发 现,由于使用的是多包层光纤 (Multi-Clad Fiber, MCLF),所以激发出的 LP<sub>11</sub> 共振模被 限制在内包层传输,对光纤弯曲应变响应较好,而高阶包层模对折射率变化较敏感。利 用磁流体作为磁敏材料的磁场传感器主要利用的是高阶包层模感知外界磁场的变化,而 利用线性固体材料作为磁敏材料的磁场传感器主要利用的是 LP<sub>11</sub> 共振模对光纤弯曲应 变响应来感知外界磁场的变化。由于包层 FBG 的不对称性结构,该类光纤磁场传感器 具有方向相关性。

### 6.1 基于高阶包层模的传感器制作及传感原理

对于一般的 FBG 的刻写工作, 高阶包层模的激发是需要最大程度避免的, 但对于

64

我们的工作却是需要的。采用飞秒激光结合相位掩模板技术离轴刻写的包层型 FBG 所激发 的高阶包层模式外界环境折射率的变化较灵敏,结合实验中使用的磁敏材料-磁流体对外界磁场的折射率可调谐性能,就可以制作高灵敏的光纤光栅型磁场传感器。

#### 6.1.1 传感器的制作





MCLF 的包层型 FBG 的透射和反射光谱如图 6.1.1 所示。由本实验室的原有实验结 果可知,在 MCLF 上刻写的包层 FBG 激发的 LP11 共振模即上图中的包层模,对弯曲应 变响应较好,但对外界折射变化几乎没有响应,这是因为 MCLF 内包层的折射率小于第 二包层的折射率,光被束缚在内包层和纤芯中传播。由于 MCLF 纤芯和包层的有效折射 率不同,产生的两个共振峰对应的模式不同,光谱间隔为 1.7 nm。所以用这种光纤光栅 和磁流体制作磁场传感器就需要借助氢氟酸腐蚀掉光纤的部分包层,提高包层模对外界 环境变化的感知能力。氢氟酸腐蚀操作增加了传感器制作步骤,减弱了光纤的机械性能, 并且传感器灵敏度不高,只有 0.035 dB/Oe。为了更好的提高灵敏度,简化实验操作, 实验中将采用偏芯刻写技术,激发更高阶的包层模,增加其对外界磁场强度的感知能力。

FBG 的刻写平台如图 6.1.2 所示。脉冲宽度为 100 fs 的飞秒激光器(Coherent Libra, TEM00, 重复频率为 1 Hz, 光斑直径为 9 mm)发射的中心波长为 800 nm 的线偏振光 通过反射式滤光片调节光强后, 经过两个全反镜聚焦到 25.5 mm 的柱面透镜, 再经过相 位掩模板 (Ibsen, pitch=2142 nm)聚焦到光纤上。在光纤光栅刻写时, 光纤的一端连接 在型号为 S5FC1005P 的宽带光源 (Superluminescent Diodes, SLD, 1500-1600 nm)上,

另一端连接在型号为 AQ6375B 的光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA, 波长



图 6.1.2 光纤光栅刻写平台



图 6.1.3 MCLF 横截面显微图和折射率分布图

为了增加光纤的光敏特性,在光纤光栅刻写前需要进行载氢处理,载氢条件为:压 强 9.5 MPa,温度 60°C,时间 14 天。将载氢处理后的 MCLF 剥去涂覆层、酒精擦拭干 净,切割 1 cm 长用商用熔接机 (Fujikura FSM-60S)熔接在标准单模光纤中间,并将处 理好的光纤固定在三维位移台上。刻写光栅时使用的激光脉冲功率是 400 mW,曝光时 间是 30 s,聚焦的光斑偏离纤芯一定距离。MCLF 的横截面显微图如图 6.1.3 (a)所示, 由图可知该光纤有四个包层,直径分别为 9 μm、 14 μm、22 μm 和 120 μm,纤芯直径 为 4 μm; 图中的明暗是由于纤芯和包层折射率分布造成的,具体分布如图 6.1.3 (b) 所 示。单模光纤与前两章使用的光纤相同,具体参数参考第三章和第四章。

刻写的光栅显微图如图 6.1.4 所示。光栅的长度为 5 mm,光栅不仅覆盖在 MCLF 的纤芯和内包层区域,同时还覆盖了第二包层(甚至第三包层)。



图 6.1.4 包层型光纤光栅显微图

6.1.2 传感器传感原理



图 6.1.5 包层型光纤光栅内部模式耦合示意图



图 6.1.6 包层型光纤光栅密封于磁流体前后光栅反射光谱图

包层型光纤光栅内部模式耦合情况如图 6.1.5 所示。由于普通单模光纤和多包层光 纤熔接时的纤芯失配,及 MCLF 的内包层光栅的刻写,使得光纤光栅不仅激发出了纤芯 基模,还同时激发了低阶包层共振模 LP<sub>11</sub>。当把光斑位置上移覆盖第二包层(甚至第三 包层)刻写光栅,调节曝光时间,低阶共振包层模消失,新的共振峰被激发,这些新的 模式就是高阶非圆波导对称模 LP<sub>1m</sub>。这些模式被激发的原因是由于偏芯型 FBG 刻写方 式破坏了光纤轴向方向的对称性。光波由单模光纤导入到 MCLF 中时由于纤芯失配,部 分能量进入包层,遇到光栅进行反射,反射回的高阶包层模和纤芯基模在熔接点耦合回 单模光纤。反射后的具体反射光谱如图 6.1.6 黑色曲线所示。当把光纤光栅密封于磁流 体中时,光谱(红色线)的能量下降,这是因为包层模的有效折射率与外界环境折射率 相关,空气的折射率小于磁流体的折射率。从图 6.1.1 的反射曲线可知,这种类型的传 感器插入损耗较小,一般为 1-3 dB。

光波沿着包层型 MCLF 光纤光栅传播产生谐振的条件可以定义为

$$\lambda_{cl,i} = \left(n_{core} + n_{cl,i}\right)\Lambda$$

$$\lambda_{core} = 2n_{core}\Lambda$$
(6.1.1)

其中, $\lambda_{core}$ 和 $\lambda_{cl,i}$ 分别为纤芯模和第*i*阶包层模对应的波长, $n_{core}$ 和 $n_{cl,i}$ 分别是纤芯 基模和第*i*阶包层模的有效折射率,  $\Lambda$  是光栅周期。由于外界磁场变化时,磁流体的折 射率会发生变化,导致光栅中各个高阶模传输的有效折射率发生变化,进一步影响反射 光谱的波长和能量;同时,由于光栅相对于纤芯的非圆对称性,使得该传感器对磁场具 有方向相关性。



图 6.1.7 磁场测量实验装置图

#### 6.1.3 磁场测量实验

磁场测量实验使用的装置如图 6.1.7 所示,使用的仪器在本论文的前面已经叙述, 在此不再赘述。



谱的响应,测量时传感器和磁场强度方向的相对角度定为0°。从图中可以发现,随着外界磁场强度的增强,高阶包层模的能量逐渐减弱,而且波长几乎没有变化。而纤芯基模在整个磁场强度变化过程中无论是强度还是中心波长都没有变化。这进一步验证了我们的推断,纤芯基模的有效折射率不受外界磁场的影响,而高阶包层模的有效折射率受外界环境折射率变化的影响较大。这意味着该传感器可以实现通过能量解调的方式测量磁场;同时,可以利用纤芯模式来确保能量的稳定性。当磁场强度低于 50 Oe 时,光谱中高阶包层模的能量变化较缓慢,这是由于磁流体处于初始磁化阶段;在 60-110 Oe 范围

(a)

变化, 磁流体处于磁饱和状态。

图 6.1.8 (b)是 1532-1535 nm 波段的光谱放大图。从图中可知,当磁场强度逐渐变大时,光谱波峰(高阶包层模)的变化具有规律的间隔性。这主要是因为产生这些高阶包 层模的机制是不同的,一种是辐射模,另一种是光栅前向模和后向模的耦合模。辐射模 对外界折射率的变化较灵敏;耦合模对外界折射率变化感知较弱。



图 6.1.90°时传感器的磁场灵敏度

同时,对磁场实验进行了重复性测量,光谱图随磁场变化趋势基本没有变化,1533.6 nm 的高阶包层模的强度随磁场强度变化的趋势如图 6.1.9 所示。图中红点为磁场由弱变 强时 1533.6 nm 包层模强度实验的观测值,蓝点为磁场由强变弱时包层模强度的实验观 测值,黄色的虚线是在 60-110 Oe 磁场强度范围内红点的线性拟合直线。该图表明,在 60-110 Oe 磁场强度范围内,传感器对磁场强度有较好的线性响应,磁场灵敏度为 0.143 dB/Oe,线性拟合度为 0.9978。

由于包层型光纤光栅的非圆对称性结构,使该传感器对磁场呈现出方向相关性。为 了证明该推断,在 70 Oe 磁场强度时,对传感器的磁场方向相关性进行了测量。实验中 固定磁场大小,旋转电磁铁,调节磁场方向,观察光谱的变化。测量角度范围为 0°-360° (定义为一周),每间隔 20°记录一次数据。图 6.1.10 给出了 0°-100°(四分之一周)范 围内的反射光谱图。高阶包层模的波长和强度都发生了较大变化。

高阶包层模的相对强度和磁场方向关系如图 6.1.11 所示。从图中可知,在 0°-360° 测量范围内,传感器在极坐标下呈现不完全对称的 "8"字型分布,这和飞秒激光刻写

的调制区域的位置和形状相关。响应度最大的角度为 180°,此时光谱的相对能量为 3.15 dB;响应度最小的角度为 0°,此时光谱的相对能量为 0 dB。因此可以根据传感器的方向响应来实现磁场的矢量测量。



图 6.1.11 70Oe 时不同磁场方向光谱波峰能量差与磁场方向关系

虽然该传感器与锥形少模光纤型传感器的结构和传感原理不同,但都表现出对磁场的方向相关性,实验测量方法和结论相似,所以实际测量磁场时,需要把图 6.1.9 和图 6.1.11 相结合,找到一一对应关系。具体方法如第四章 4.2.1 小节所示。

### 6.1.4 温度测量实验





该传感器在进行磁场测量实验时验证了纤芯基模的稳定性,所以可以用该模式进行

以可以用纤芯基模测量温度,并将数值代入第二章的郎之万函数,求得温度对磁流体折 射率变化的贡献,进一步矫正传感器对磁场的测量结果。由图 6.1.13 可得传感器(纤芯 基模波长对温度的响应)温度灵敏度为 12 pm/°C。



图 6.1.13 传感器纤芯模式波长对温度响应灵敏度

传感器	传感机制	灵敏度	测量范围	方向 相关性	温度 交叉灵敏
[55]	LPFBG	- 0.4 pm/Oe	60-240 Oe	无	有
[56]	FBG	0.035 dB/Oe	70-140 Oe	有	温度校准
本工作	高阶包层模 FBG(反射)	- 0.14 dB/Oe	60-110 Oe	有	温度校准

图 6.1.1 基于磁流体的光纤光栅型磁场传感器性能对比表

表 6.1.1 给出了本传感器和已报道的代表性的光纤光栅传感器的性能比较。波长解 调的传感器磁场灵敏度与干涉型相比较小了 1-2 个数量级,能量解调的传感器的磁场灵 敏度是文献[56]的 4 倍。与波长解调相比,能量解调更容易计算,性价比更高。同时, 本传感器对磁场还具有方向相关性及温度自校准特性。

#### 6.2 基于低阶包层模的传感器制作及传感原理

由于磁流体使用的表面活性剂属于有机物,所以当温度高于 140 °C 时就会变性, 磁流体特性会发生较大变化,不再适用于光纤磁场传感器的磁敏介质。所以为了将传感 器应用到较复杂环境的油气井中或井下,就需要寻找新的磁敏材料。PW-080 是具有一 定磁性的固体线性材料,它的磁性不受外界干扰。将 PW-080 和包层型光纤光栅结合制 作磁场传感器,利用低阶包层模 LP<sub>11</sub>对弯曲的灵敏特性测量磁场。

#### 6.2.1 传感器的制作

刻写光栅的过程和 6.1.1 小节相同,不再赘述。具体改变的参数有激光输入功率为 500 mW,曝光时间为 5 s。使用型号为 FSP-80s 熔接机将刻写的包层型光纤光栅与标准 单模光纤和长度为 4.55 cm、内径为 100 μm、外径为 164 μm 的石英毛细管正芯熔接; 石英毛细管内装有长度为 2.25 cm、端面直径为 80 μm 的 PW-080 线性磁性材料;最后, 再将石英毛细管的另一端在熔接机中直接通过放电密封,防止线性磁性材料掉出;至此, 包层型光纤光栅磁场传感器制作完成。

#### 6.2.2 传感器传感原理

光波由标准单模光纤传输到包层型光纤光栅时,在熔接点单模纤芯传输模式部分耦合至 MCLF 的包层,剩余部分继续沿纤芯传播,当遇到光栅时,满足相位匹配条件的模

式被反射,在单模光纤和 MCLF 的熔接点进行耦合,在传输光谱上呈现出两个明显的共振峰,即纤芯模式和 LP<sub>11</sub> 包层模式。由于内包层低折射率的特殊结构,由单模光纤耦合 到 MCLF 的内包层中的传输光不满足波导结构的全反射条件,极易受光纤弯曲的影响,包层模能量对弯曲应变具有较高的灵敏度;纤芯模式由于其良好的波导束缚和极低的曝光能量不会受到弯曲的影响,可以对传感器进行能量校准;又因为包层栅位于一侧的包层,所以传感器对于弯曲也具有方向相关性,进而可以测量磁场大小和方向。以单模光 纤为例说明光纤弯曲时,对光纤传输模式有效折射率的影响。



图 6.2.1 包层型光纤光栅传感原理示意图

假设单模光纤端面是二维平面,那么光纤弯曲就是光纤端面中的任一点在该二维平 面内的产生的位置变化(即位移)。而这种位置变化导致光纤内的应力发生变化,从而 对光纤折射率分布造成扰动,引起模场能量的侧向分布。模场能量的分布由光纤弯曲方 向决定<sup>[164, 165]</sup>。



图 6.2.2 光纤弯曲示意图

基于保角映射法<sup>[166, 167]</sup>,利用坐标变换的方式,将弯曲光纤等效为折射率调制分布 的直光纤,如图 6.2.2 所示。图中蓝色的是发生弯曲的光纤,灰色的是等效的直光纤。 假设*R ≫ a*,则弯曲光纤的横截面的调制折射率可以用下式表示<sup>[168]</sup>:

$$n_m = (n + \Delta n) \cdot \left(1 + \frac{x}{R}\right) \tag{6.2.1}$$

其中, *n*和Δ*n*分别是光纤弯曲前折射率和弯曲后折射率的改变量。由弹光效应可知, 弯曲导致的光纤折射率的变化是<sup>[169]</sup>

$$\Delta n = -\left(\frac{n^3}{2}\right) \left(p_{12} - v p_{12} - v p_{11}\right) \frac{x}{R}$$
(6.2.2)

其中, *p<sub>ij</sub>*(*i*, *j* = 1, 2)是弹光张量的分量, *v*是泊松比, 对于石英光纤来说*v* = 0.16。根据(6.2.1)和(6.2.2)式, 可得等效曲率半径为:

$$R_{eff} = \frac{R}{1 - \left(\frac{n^2}{2}\right) \cdot \left(p_{12} - vp_{12} - vp_{11}\right)\frac{x}{R}}$$
(6.2.3)

将(6.2.3)式代入到(6.2.1)式可得等效直光纤的波导折射率分布为:

$$n_m = n \cdot \left( 1 + \frac{x}{R_{eff}} \right) \tag{6.2.4}$$

由以上推导可知,当光纤光栅弯曲时,不仅光纤本身的有效折射率发生了变化,光 栅的周期也发生了变化,使包层模的能量分布发生变化。

#### 6.2.3 磁场测量实验

图 6.2.3 是室温下外界磁场强度从 0 到 240 Oe 每间隔 10 Oe 变化时,传感器对磁场 响应的干涉光谱图,测量时传感器和磁场强度方向的相对角度定为 0°。从图中可以发现, 随着外界磁场强度的增强,LP<sub>11</sub>包层模的能量逐渐减弱,而且波长几乎没有变化。而纤 芯基模在整个磁场强度变化过程中无论是强度还是中心波长几乎都没有变化。这进一步 验证了我们的推断,纤芯基模的有效折射率不受外界磁场的影响,而包层模受外界磁场 变化的影响较大。这意味着该传感器可以实现通过能量解调的方式测量磁场;同时,可 以利用纤芯模式来确保能量的稳定性。图 6.2.4 给出的是随磁场强度逐渐增大时,包层 模的干涉峰能量的变化。由图可知,磁场强度和干涉峰能量呈非线性关系,具体原因有 待分析。

对此传感器施加磁场时,由于磁场对磁性材料力的作用,传感器产生了弯曲,弯曲 曲率大小反应了磁场的大小,弯曲的方向反应了磁场的方向。传感器弯曲应变的变化引

75

起了输出光谱信号的包层模式能量的变化。所以可以用此传感器测量磁场。



图 6.2.3 不同磁场强度时传感器透射光谱

基于包层光纤光栅和线性磁性材料的探针式光纤矢量磁场传感器,弯曲灵敏度较高, 磁场灵敏度函数为*y*=-19.75-0.7754*e*<sup>119.97</sup>。能实现传感光路系统的能量自校准和实时 温度监测。利用飞秒激光刻成的相对光纤轴的位置不对称性包层光栅,表现了明显的方 向相关性,实现了光纤磁场传感器对磁场大小和方向的同时测量。



图 6.2.4 传感器包层模的强度对磁场大小的响应

## 6.3 本章小节

本章基于飞秒激光相位掩模板技术刻写包层型光纤光栅,研制了两种具有方向相关

性的光纤磁场传感器。一种是用磁流体作为磁敏材料,基于光纤光栅感知折射率变化的 非圆对称结构的磁场传感器,该传感器通过高阶包层模式能量的变化来测量磁场强度的 大小和方向,灵敏度高达 0.14 dB/Oe;高阶包层模的相对强度和磁场方向关系在极坐标 下呈现不完全对称的"8"字型分布;传感器(纤芯基模波长对温度的响应)温度灵敏 度为 12.00 pm/°C。另一种采用 PW-080 固体线性磁材料,基于光纤光栅弯曲测量的非圆 对称结构的磁场传感器,该传感器是通过低阶包层模式能量的变化来测量磁场强度的大 小,通过传感器弯曲方向来判断磁场强度的方向。这两种传感器的纤芯基模在磁场测量 时非常稳定,可以测量环境温度,即传感器可以同时测量磁场和温度两个物理量。

### 第七章 总结和展望

#### 7.1 全文总结

油气田勘探测井和生产测井行业中,普遍采用磁定位测井来获得磁定位曲线,作为 测井项目中校准深度和油套管损伤探测的基础资料。光纤传感器具有体积小、耐腐蚀、 灵敏度高和适于井中复杂环境等优点,同时易于集成。本论文的研究内容针对于石油工 业应用中磁场检测的问题,以实现"磁场矢量测量"为目标,研制了三种基于磁流体折 射率可调谐性的光纤磁场传感器和一种基于 PW-080 固体线性磁材料的光纤磁场传感器, 并对传感器传感性能进行了实验研究和讨论,具体内容如下:

(1) 基于模式耦合理论分析了锥形光纤传感机理和 MCLF 纤芯与包层有效折射率的调制机理,给出传感器实现磁场矢量测量的理论。

(2)基于锥形单模光纤和光学微谐振腔制作了 WGM 型传感器,并对 WGM 的进行了理论分析,对传感器进行了实验测试研究,得到了高品质因子 Q 的传感器结构。利用谐振峰能量对磁场的敏感特性实现对磁场的测量。在 40-140 Oe 磁场范围内具有磁场线性响应灵敏度为-0.04 dB/Oe,灵敏度较低。

(3)提出了一种基于 MZI 干涉原理的微米细芯光纤锥型磁场传感器。利用传感结构对磁流体折射率的敏感特性,由外界磁场改变引起干涉光谱能量的变化,实现磁场的测量,并分析了该传感器的磁场和温度交叉灵敏问题。该结构利用能量解调,在 40-160 Oe 磁场范围内具有极高的磁场响应灵敏度,最高可达 0.10 dB/Oe。

(4)研究并制作了一种基于在锥形少模光纤锥区利用飞秒激光折射率调制的非圆 对称结构的磁场传感器,给出一种两模光纤中激发 LP<sub>11</sub>模的方式。通过模式耦合理论对 传感器传感原理进行了分析。LP<sub>11</sub>模的有效折射率对外界环境折射率变化较敏感,使传 感器的干涉谱对外界磁场响应明显。通过磁场测量实验,在 40-120Oe 磁场强度范围内, 能量解调时,传感器灵敏度为 71.98 pm/Oe;在 80-130Oe 磁场强度范围内,波长解调时, 传感器灵敏度为 0.11 dB/Oe。研究了传感器对磁场的方向响应特性,干涉谷的相对强度 和磁场方向关系在极坐标下呈现 "8"字型分布。传感器的温度响应测试结果表示温度

78

变化对磁场测量引入的误差较小,可以忽略。

(5)利用飞秒激光结合相位掩模板技术,在 MCLF 上刻写包层型光纤光栅结构。 利用此结构,提出了两种磁场矢量传感器。利用 MCLF 高阶包层模式对磁流体折射率的 敏感特性测量磁场的大小和方向,实现了较好的磁场矢量测量。实验结果证明,该结构 的磁场灵敏度可达 0.14 dB/Oe;高阶包层模的相对强度和磁场强度方向的关系在极坐标 下呈现不完全对称的"8"字型分布;传感器温度灵敏度为 12 pm/°C。利用 MCLF 低阶 包层模式对光纤弯曲的敏感特性测量磁场,实验结果表明,该结构磁场灵敏度也较高, 但其具体数值需要进一步分析,弯曲方向和磁场方向一致。

传感器	传感机制	灵敏度	测量范围	方向 相关性	温度 交叉灵敏
WGM 型	WGM	- 0.04 dB/Oe	40-140 Oe	无	无法测量
锥形细芯型	模式干涉 (透射)	- 0.10 dB/Oe	40-160 Oe	无	有
锥形少模型	模式干涉	71.98 pm/Oe	40-120 Oe	有	无
	(透射)	0.11 dB/Oe	80-130 Oe		
FBG 型	高阶包层模	- 0.14 dB/Oe	60-110 Oe	有	温度校准
	FBG (反射)				
FBG 型	低阶包层模	非线性函数	0-240 Oe	有	温度校准
	FBG (反射)				

表 7.1 光纤磁场传感器性能对比

本论文中提出的光纤磁场传感器采用能量解调,相对波长解调,性能更稳定。传感器的磁场灵敏度、可测量的磁场范围以及方向相关性等比较如表 7.1 所示。基于锥形少模光纤和包层型 FBG 的磁场传感器不仅灵敏度高,同时具有方向相关性,这是目前已报道的大部分同类光纤磁场传感器没有的特性。两种包层型 FBG 传感器具有温度自校准特性,且稳定性较好,易复用便于组网。本论文的工作对光纤磁场传感器的研究具有一定的意义。

#### 7.2 工作展望

本论文的研究内容在光纤 MZI 型磁场传感器、包层型 FBG 磁场传感器和光纤多参量传感器等研究方面具有一定的参考价值,但是从机理、磁敏材料的选择到应用至石油测井领域检测中,需要进一步的提高和研究。下一步的研究计划如下:

(1)文中研究的光纤磁场传感器,在进一步应用时,应充分考虑使用环境的恶劣 程度,进一步研究提高传感器的灵敏度、测量范围和精度等参数,选择适宜的磁敏材料 和传感结构,选择更好的封装方式和封装材料,并进行实地测试。

(2) 锥形两模光纤锥型和 MCLF 高阶包层型 FBG 两种磁场传感器对磁场强度响 应较高,若能将磁性流体制成磁性薄膜,会进一步提高传感器的实用性。

(3)对文中激发低阶包层模式的包层型 FBG 传感器继续研究,给出传感器的测量 灵敏度,测量其具体的磁场方向相关性。改变磁场测试系统,对研究的具有磁场方向相 关性的传感器进行三维研究,进一步改进传感结构,完成向光纤矢量磁场传感器的过渡。

(4)寻找适于光纤传感的新型高性能的磁性材料,与光纤结构结合,研究适于井 中或井下恶劣环境的磁场传感器。

(5)利用模拟软件 COMSOL 和 RSOFT 深入研究光纤传感器结构中的模式耦合原 理和传感原理,建立相关理论模型,优化传感结构,提高传感器的灵敏度,降低磁场测 量的数值使更好的应用到实际环境测量中。

同时,FBG 结构的磁场传感器作为波长调制型器件,具有很高的波分复用能力,所 以结合合适的信号解调系统,可以进一步研究传感器的分布式或准分布式结构,实现光 纤的网络化测量。

## 参考文献

- [1] 李科杰. 新编传感器手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 黎敏,廖延彪.光纤传感器及其应用技术[M].武昌:武汉大学出版社,2012.
- Kao K. C., Hockham G. A., Dielectric-Fiber Surface Waveguides for Optical Frequencies[C]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966,V113(7):1151-1158.
- [4] Zhang Y., Li S., Yin Z., et al. Fiber-Bragg-Grating-Based Seismic Geophone for Oil/Gas Prospecting[J]. Optical Engineering, 2006, V45(8):084404-1-084404-4.
- [5] Rao J., Webb J., Jackson A., et al. In-Fiber Bragg-Grating Temperature Sensor System for Medical Applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997,V15(5):779-785.
- [6] 刘宏月,梁大开,曾捷等. 基于 LPFG 折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J].光学 学报, 2011, 31(8): 1294-1297.
- [7] 廖延彪. 光纤传感器的今日和发展[J]. 传感器世界, 2004, 10(2):6-12
- [8] Morris P., Hurrell A., Shaw A., et al. A Fabry-Perot Fiber-Optic Ultrasonic Hydrophone for the Simultaneous Measurement of Temperature and Acoustic Pressure[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009,V125(6):3611-3622.
- [9] Grattan K. T. V., Sun T., Fiber Optic Sensor Technology: an Overview[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000,V82(1-3):40-61.
- [10] Puangmali P., Althoefer K., Seneviratne L. D., Novel Design of a 3-axis Optical Fiber Force Sensor For Applications in Magnetic Resonance Environments[C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2009:3682-3684.
- [11] 薛志英. 光纤微弱磁场传感器技术[D]. 成都: 电子科技大学硕士学位论文, 2001.
- [12] Lenz J., Edelstein S.. Magnetic Sensors and Their Applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006,V6(3):631-649.
- [13] Law C. T., Bhattarai K., Yu D. C., Fiber-Optics-Based Fault Detection in Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008,V23(3):1271-1279.
- [14] 苏军, 王治宇, 袁子清,等. 光纤光栅(FBG)传感器在尾矿库在线监测中的应用[J]. 中国安全 生产科学技术, 2014, 7:65-70.
- [15] 张旭辉, 王陆唐, 方捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 2:76-81.
- [16] 靳伟, 廖延彪, 张志鹏, 导波光学传感器: 原理与技术[M], 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 莫敏杰. 光纤拉曼放大器及其应用 [J]. 中国有线电视, 2004, 6:109-110.

- [18] Dybko A., Wróblewski W., Roźniecka E., et al. Assessment of Water Quality Based on Multiparameter Fiber Optic Probe[J]. Sensors & Actuators B, 1998,V51(1–3):208-213.
- [19] Tabassum R., Mishra S. K., Gupta B. D., Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Hydrogen Sulphide Gas Sensor Utilizing Cu–ZnO Thin Films[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013,V15(28):11868-11874.
- [20] Yang X., Chen Z., Elvin C. S. M., et al. Textile Fiber Optic Microbend Sensor Used for Heartbeat and Respiration Monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2015,V15(2):757-761.
- [21] Liu Z., Bo F., Wang L., et al. Integrated Fiber Michelson Interferometer Based on Poled Hollow Twin-Core Fiber[J]. Optics Letters, 2011,V36(13):2435-2437.
- [22] Zhang Y., Yuan L., Lan X., et al. High-Temperature Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometric Pressure Sensor Fabricated by Femtosecond Laser: Erratum[J]. Optics Letters, 2013,V38(22):4609-4612.
- [23] Lee C. L., Shih W. C., Hsu J. M., et al. Asymmetrical Dual Tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for Fiber-Optic Directional Tilt Sensor[J]. Optics Express, 2014,V22(20):24646-24650.
- [24] Shevchenko Y. Y., Albert J., Plasmon Resonances in Gold-Coated Tilted Fiber Bragg Gratings[J]. Optics Letters, 2007,V32(3):211-213.
- [25] Quan Z., Zhang W., Lei C., et al. Bending Vector Sensor Based on a Sector-Shaped Long-Period Grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015,27(7):713-716.
- [26] Feng D., Qiao X., Albert J.. Off-Axis Ultraviolet-Written Fiber Bragg Gratings for Directional Bending Measurements[J]. Optics Letters, 2016,V41(6):1201-1205.
- [27] Bravo M., Pinto A. M. R., Lopez-Amo M., et al. High Precision Micro-Displacement Fiber Sensor Through a Suspended-Core Sagnac Interferometer[J]. Optics Letters, 2012,V37(2):202-204.
- [28] Chen Z., Hefferman G., Wei G.. Multiplexed Displacement Fiber Sensor Using Thin Core Fiber Exciter[J]. Review of Scientific Instruments, 2015,V86(6): 105308-105312.
- [29] Stefani A., Andresen S., Yuan W., et al. High Sensitivity Polymer Optical Fiber-Bragg-Grating-Based Accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012,V24(9):763-765.
- [30] Li P., Chan T., Yau M. H., et al. Very Sensitive Fiber Bragg Grating Accelerometer Using Transverse Forces With an Easy Over-Range Protection and Low Cross Axial Sensitivity[J]. Applied Optics, 2013,V52(25):6401-6410.
- [31] Wang J., Dong B., Lally E., et al. Multiplexed High Temperature Sensing With Sapphire Fiber

Air gap-Based Extrinsic Fabry-Perot Interferometers[J]. Optics Letters, 2010,V35(5):619-621.

- [32] Xu L., Fanguy J. C., Soni K., et al. Optical Fiber Humidity Sensor Based on Evanescent-Wave Scattering [J]. Optics Letters, 2004, V29(11):1191-1193.
- [33] Su D., Qiao X., Rong Q., et al. A Fiber Fabry–Perot Interferometer Based on a PVA Coating for Humidity Measurement[J]. Optics Communications, 2013,V311(2):107-110.
- [34] Kersey D., Berkoff A., High-Resolution Fibre-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection[J]. Electronic Letters, 2002, V28(3): 236-238.
- [35] Changpeng L., Yi L., Kunjian C., et al. Temperature-Insensitive Optical Fiber Strain Sensor with Ultra-low Detection Limit Based on Capillary-Taper Temperature Compensation Structure[J]. Optics Express, 2018,V26(1):477-487.
- [36] Silva S., Santos J. L., Malcata F. X., et al. Optical Refractometer Based on Large-Core Air-Clad Photonic Crystal Fibers[J]. Optics Letters, 2011,V36(6):852-854.
- [37] Li J., Qiao X., Rong Q., et al. A Compact Fiber Inclinometer Using a Thin-Core Fiber with Incorporated an Air-Gap Microcavity Fiber Interferometer[J]. Sensors, 2016,V16(1):92-96.
- [38] Sreekumar K., Asokan S.. Compact Fiber Bragg Grating Dynamic Strain Sensor Cum Broadband Thermometer for Thermally Unstable Ambience[J]. Journal of Optics, 2010,V12(12):74-77.
- [39] Weng Y. Y., Qiao X. G., Guo T., et al. A Robust and Compact Fiber Bragg Grating Vibration Sensor For Seismic Measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2012,V12(12):800-804.
- [40] Yu X. Y., Gong J. M., Li Y. H., et al. Optical Fiber Magneto-Optic Sensor in The Turbine Mass Flowmeter[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2000,V4074:166-170.
- [41] 禹大宽, 贾振安, 乔学光等. 光纤 Bragg 光栅流量传感器的研究及进展[J]. 光通信研究, 2008, V6:37-39.
- [42] 张学亮, 倪明, 孟洲等, 磁致伸缩材料被覆保偏光纤磁场传感研究[J], 压电与声光, 2006, V28(4):384-386.
- [43] Pu S., Chen X., Liao W., et al. Laser Self-Induced Thermo-Optical Effects in a Magnetic Fluid[J]. Journal of Applied Physics, 2004, V96(10):5930-5932.
- [44] Zhang J., Qiao X., Wang R., et al. Highly Sensitivity Fiber-Optic Vector Magnetometer Based on Two-Mode Fiber and Magnetic Fluid[J]. IEEE Sensors Journal, 2019,V19(7):2576-2580.
- [45] Ma W., Xing J., Wang R., et al. Optical Fiber Fabry-Perot Interferometric CO<sub>2</sub> Gas Sensor Using Guanidine Derivative Polymer Functionalized Layer[J]. IEEE Sensors Journal, 2018,V18(5):1924-1929.
- [46] Shao Z., Qiao X., Rong Q.. Compact Gas Refractometer Based on a Tapered Four-Core Fiber[J].

Applied Optics, 2018, V57(35):10198-10206.

- [47] SokolKutylovskij O. L.. Magnetic-Field Sensors Based on Amorphous Alloys for High-Sensitivity Low-Frequency Measurements[J], Sensors and Actuators A, Physical, 1997,V62(1-3):496-500.
- [48] Lenz J. E., A review of magnetic sensors[J], Proceedings of the IEEE, 1990, V78(6):973-989.
- [49] Barjenbruch U.. New Kind of Highly Sensitive Magnetic Sensors with Wide Bandwidth[J], Sensors and Actuators A: Physical, 1998,V65(2-3):136-140.
- [50] Lenz J., Edelstein S.. Magnetic Sensors and Their Applications[J], IEEE Sensors Journal, 2006,V6(3):631-649.
- [51] Ding G., Wang H., Liu J., et al. Development of Thin-Slice Fiber Bragg Grating-Giant Magnetostrictive Material Sensors Used for Measuring Magnetic Field of Magnetic Bearings[J]. Optical Engineering, 2015,V54(10):107102-107108.
- [52] 金龙, 张伟刚, 涂勤昌等, 干涉技术在光纤传感器设计中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(7): 51-56.
- [53] Dai J., Yang M., Li X., et al. Magnetic Field Sensor Based on Magnetic Fluid Clad Etched Fiber Bragg Grating[J]. Optical Fiber Technology, 2011,V17(3):210-213.
- [54] Alessandro C., Walter M., Carola S., et al. Phase-Shifted Bragg Microstructured Optical Fiber Gratings Utilizing Infiltrated Ferrofluids[J]. Optics Letters, 2011,V36(13):2548-2550.
- [55] Gao L., Zhu T., Deng M., et al. Long-Period Fiber Grating Within D-Shaped Fiber Using Magnetic Fluid for Magnetic-Field Detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2015,V4(6):2095-2104.
- [56] Zheng J., Dong X., Zu P., et al. Magnetic Field Sensor Using Tilted Fiber Grating Interacting with Magnetic Fluid[J]. Optics Express, 2013,V21(15):17863-17868.
- [57] Hu T., Zhao Y., Li X., et al. Novel Optical Fiber Current Sensor Based on Magnetic Fluid[J]. Symposium on Photonics & Optoelectronics, 2010,V8(4):392-394.
- [58] Zhao Y., Lv R. Q., Ying Y., et al. Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Fabry–Perot Sensor for Magnetic Field Measurement Based on Magnetic Fluid[J]. Optics & Laser Technology, 2012,V44(4):899-902.
- [59] Lv R., Zhao Y., Wang D., et al. Magnetic Fluid-Filled Optical Fiber Fabry Pérot Sensor for Magnetic Field Measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, V26(3):217-219.
- [60] Homa D., Pickrell G.. Magnetic Sensing with Ferrofluid and Fiber Optic Connectors[J]. Sensors, 2015,V14(3):3891-3896.
- [61] Peng Z., Chi C., Wen S., et al. Temperature-Insensitive Magnetic Field Sensor Based on

Nanoparticle Magnetic Fluid and Photonic Crystal Fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, V4(2):491-498.

- [62] Zhao Y., Wu D., Lv R. Magnetic Field Sensor Based on Photonic Crystal Fiber Taper Coated With Ferrofluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014,V27(1):26-29.
- [63] Layeghi A., Latifi H., Frazao O.. Magnetic Field Sensor Based on Nonadiabatic Tapered Optical Fiber With Magnetic Fluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014,V26(19):1904-1907.
- [64] Luo L., Pu S., Tang J., et al. Reflective all-Fiber Magnetic Field Sensor Based on Microfiber and Magnetic Fluid[J]. Optics Express, 2015,V23(14):18133-18142.
- [65] Lei X., Peng B., Chen D., et al. An All-Fiber Magnetic Field Sensor Based on Dual-S-Shaped Optic Fiber Integrated With Magnetic Fluid[J]. IEEE Sensors Journal, 2016,V16(4):958-964.
- [66] Miao Y. P., Wu J., Lin W., et al. Magnetic Field Tunability of Optical Microfiber Taper Integrated with Ferrofluid[J]. 2013,V21(24):29914-29920.
- [67] Deng M., Liu D., Li D., Magnetic Field Sensor Based on Asymmetric Optical Fiber Taper and Magnetic Fluid[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2014,V211:55-59.
- [68] Wu J., Miao Y., Lin W., et al. Dual-Direction Magnetic Field Sensor Based on Core-Offset Microfiber and Ferrofluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, V26(15):1581-1584.
- [69] Pu S., Dong S.. Magnetic Field Sensing Based on Magnetic-Fluid-Clad Fiber-Optic Structure With Up-Tapered Joints[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, V6(4):1-6.
- [70] Zheng Y., Dong, X., Yang, R., et al. Magnetic Field Sensor With Optical Fiber Bitaper-Based Interferometer Coated by Magnetic Fluid[J]. IEEE Sensors Journal, 2014,V14(9):3148-3151.
- [71] Wu J., Miao Y., Song B., et al. Low Temperature Sensitive Intensity-Interrogated Magnetic Field Sensor Based on Modal Interference in Thin-Core Fiber and Magnetic Fluid[J]. Applied Physics Letters, 2014,V104(25):20777-1-20777-4.
- [72] Huang G., Zhou B., Chen Z., et al. Magnetic-Field Sensor Utilizing the Ferrofluid and Thin-Core Fiber Modal Interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2015,V15(1):333-336.
- [73] Chen Y., Han Q., Liu T., et al. Optical Fiber Magnetic Field Sensor Based on Single-Mode–Multimode–Single-Mode Structure and Magnetic Fluid[J]. Optics Letters, 2013,V38(20):3999-4003.
- [74] Peng Z., Chiu C. C., Siang L. W., et al. Magneto-Optical Fiber Sensor Based on Magnetic Fluid[J]. Optics Letters, 2012,V37(3):398-400.
- [75] Peng Z., Chi C., Guo W. K., et al. Enhancement of the Sensitivity of Magneto-Optical Fiber Sensor by Magnifying the Birefringence of Magnetic Fluid Film with Loyt-Sagnac Interferometer[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2014, V191(2):19-23.

- [76] Aseel M., Vishnu K., Sudad S., et al. Magnetic-Field Sensor Based on Whispering-Gallery Modes in a Photonic Crystal Fiber Infiltrated with Magnetic Fluid[J]. Optics Letters, 2015,V40(21):4983-4986.
- [77] 吴重庆. 光波导理论第2版[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [78] 曹根瑞. 锥形光纤两端直径比与数值孔径的关系[J]. 光学技术, 1991, 1(003):8-11.
- [79] 廖延彪. 光纤光学:原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [80] Lam D. K., Garside B. K.. Characterization of Single-mode Optical Fiber Filters[J]. Applied Optics, 1981,V20(3):440-445.
- [81] 薛春荣,祝生祥,李锐等.锥形光纤传输特性的检测与分析[J].光电子-激光,2003, 14(7):772-774.
- [82] Artiglia M., Coppa G., Vita P. D., et al. Mode Field Diameter Measurements in Single-Mode Optical Fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, V7(8):1139-1152.
- [83] Marcuse D., Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices[J]. The Bell System technical journal, 1977, V56(5):703-718.
- [84] 伍长征, 激光物理学[M]. 复旦大学出版社, 1987.
- [85] Vahala K. J. Optical Microcavities[J]. Nature, 2003, V424: 839-846.
- [86] Lu Y., Yao J. Q., Wang P., et al. An Investigation of a Tapered Fiber-Microsphere Coupling System with Gain and Evanescent-Field Sensing Device[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2001,V112(10):475-478.
- [87] Armani D., Min B., Martin A., et al. Electrical Thermo-Optic Tuning of Ultrahigh-Q Microtoroid Resonators[J]. Applied Physics Letters, 2004,V85(22):5439-5441.
- [88] Pornsuwancharoen N., Yupapin P. P.. Entangled Photon States Recovery and Cloning Via the Micro Ring Resonators and an Add/Drop Multiplexer[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2010,V121(10):897-902.
- [89] Zamora V., Díez A., Andrés M. V., et al. Cylindrical Optical Microcavities: Basic Properties and Sensor Applications[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2011,V9(2):149-158.
- [90] Gorodetsky M. L., Ilchenko V. S.. Optical Microsphere Resonators: Optimal Coupling to High-Q Whispering-Gallery Modes[J]. Physics, 1998,V16:147-154.
- [91] Vahala K.. Optical Microcavities[M]. Singapore: World Scientific, 2004.
- [92] Lam D. K., Garside B. K.. Characterization of Single-Mode Optical Fiber Filters.[J]. Applied Optics, 1981,V20(3):440-445.
- [93] Wan X., Taylor H. F.. Linearly Chirped Erbium-Doped Fiber Laser[J]. IEEE Photonics

Technology Letters, 2003, V15(2):188-190.

- [94] Giles C. R.. Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002,V15(8):1391-1404.
- [95] Martin J., Cliche J. F., Lauzon J., et al. Numerical Analysis of the Optimal Length and Profile of a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating for Dispersion Compensation[J]. Optics Letters, 1995,V20(6):647-649.
- [96] Sohn K. R., Shim J. H., Liquid-Level Monitoring Sensor Systems Using Fiber Bragg Grating Embedded in Cantilever[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2009,V152(2):248-251.
- [97] Lee K. K., Mariampillai A., Haque M., et al. Temperature-Compensated Fiber-Optic 3D Shape Sensor Based on Femtosecond Laser Direct-Written Bragg Grating Waveguides[J]. Optics Express, 2013,V21(20):24076-24086.
- [98] Rong Q. Z., Qiao X. G., Guo T., et al. Orientation-Dependent Fiber-Optic Accelerometer Based on Grating Inscription Over Fiber Cladding.[J]. Optics Letters, 2014,V39(23):6616-6619.
- [99] Chiang C. C., Chen Z. J.. A Novel Optical Fiber Magnetic Sensor Based on Electroforming Long-Period Fiber Grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, V32(19):3331-3336.
- [100] Guo T., Shang L., Ran Y., et al. Fiber-Optic Vector Vibroscope[J]. Optics Letters, 2012,V37(13):2703-2705.
- [101] Zhou K., Simpson G., Chen X., et al. High Extinction Ratio in-Fiber Polarizers Based on 45° Degree Tilted Fiber Bragg Gratings[J]. Optics Letters, 2005,V30(11):1285-1287.
- [102] Chen X., Zhou K., Zhang L., et al. In-Fiber Twist Sensor Based on a Fiber Bragg Grating With 81° Tilted Structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006,V18(24):2596-2598.
- [103] Burgmeier J., Waltermann C., Flachenecker G., et al. Point-by-Point Inscription of Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings with Electro-Optic Amplitude Modulated Femtosecond Laser Pulses[J]. Optics Letters, 2014,V39(3):540-544.
- [104] Ioannou A., Theodosiou A., Caucheteur C., et al. Direct Writing of Plane-by-Plane Tilted Fiber Bragg Gratings Using a Femtosecond Laser[J]. Optics Letters, 2017,V42(24):5198-5202.
- [105] Hill K. O., Malo B., Bilodeau F., et al. Bragg Gratings Fabricated in Monomode Photosensitive Optical Fiber by UV Exposure Through a Phase Mask[J]. Applied Physics Letters, 1993,V62(10):1035-1037.
- [106] Mihailov S. J., Smelser C. W. Fiber Bragg Gratings (FBG) Made with a Phase Mask and 800 nm Femtosecond Radiation[C] Optical Fiber Communications Conference. 2003.
- [107] Yariv A.. Coupled-Mode Theory for Guided-Wave Optics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1973, V9(9):919-933.

- [108] Erdogan T., Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997,V15(8):1277-1294.
- [109] 张字嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科技出版社, 2009.
- [110] Kogelnik H.. Theory of Optical-Waveguides in Guided Wave Optoelectronics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [111] Erdogan T.. Cladding-Mode Resonances in Short- and Long-Period Fiber Grating Filters: Errata[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000,V14(8):1760-1773.
- [112] Laffont G., Ferdinand P.. Tilted Short-Period Fibre-Bragg-Grating-Induced Coupling to Cladding Modes for Accurate Refractometry[J]. Measurement Science & Technology, 2001,V12(12):765-770.
- [113] Charles S. W.. The Preparation of Magnetic Fluids[M]. Ferrofluids, 2002.
- [114] Odenbach S. Colloidal Magnetic Fluid: Basic, Development and Application of Ferrofluids[M]. Springer, 2009.
- [115] 吕日清. 磁流体的光学特性及其光纤 FP 传感关键技术研究[D]. 沈阳: 东北大学博士学位 论文, 2013.
- [116] Nakatani I., Furubayashi T., Takahashi T., et al. Preparation and Magnetic Properties of Colloidal Ferromagnetic Metals[J]. IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, 1987,V65(2):261-264.
- [117] Gubin S. P., Koksharov Y. A., Khomutov G. B., et al. Magnetic Nanoparticles: Preparation, Structure and Properties[J]. Cheminform, 2010,V37(1):56-61.
- [118] Rosensweig R. E., Ferrohydrodynamics[M]. Courier Corporation, 2013.
- [119] Müller R., Hiergeist R., Steinmetz H., et al. Barium Hexaferrite Ferrofluids Preparation and Physical Properties[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1999, V201(1):34-37.
- [120] Bica D., Vékás L., Raşa M.. Preparation and Magnetic Properties of Concentrated Magnetic Fluids on Alcohol and Water Carrier Liquids[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2002,V252:10-12.
- [121] Chen H. J., Wang Y. M., Qu J. M., et al. Preparation and Characterization of Silicon Oil Based Ferrofluid[J]. Applied Surface Science, 2011,V257(24):10802-10807.
- [122] Thomas J. R., Preparation and Magnetic Properties of Colloidal Cobalt Particles[J]. Journal of Applied Physics, 1966,V37(7):2914-2915.
- [123] Hess P. H., Harold P. P., Polymers for Stabilization of Colloidal Cobalt Particles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010,V10(12):1915-1927.
- [124] Massart R.. Preparation of Aqueous Magnetic Liquids in Alkaline and Acidic Media[J]. IEEE

Transactions on Magnetics, 2003, V17(2):1247-1248.

- [125] 刘俊红,顾建明.磁流体的热力学特性和应用[J]. 功能材料与器件学报,2002, 8(3):314-318.
- [126] Raj K., Moskowitz R.. Commercial Applications of Ferrofluids[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1990,V85(1):233-245.
- [127] 王瑞金. 磁流体技术的应用与发展[J]. 新技术新工艺, 2001, (10):15-18.
- [128] Bailey R. L., Lesser Known Applications of Ferrofluids[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1983, V39(1):178-182.
- [129] 姜智鹏, 赵伟, 屈凯峰. 磁场测量技术的发展及其应用[J]. 电测与仪表, 2008, 45(4):1-5.
- [130] Zhang J. Y., Qiao X. G., Yang H. Z., et al. All-Fiber Magnetic Field Sensor Based on Tapered Thin-Core Fiber and Magnetic Fluid[J]. Applied Optics, 2017,V56(2):200-204.
- [131] Liao W., Chen X., Chen Y., et al. Tunable Optical Fiber Filters with Magnetic Fluids[J]. Applied Physics Letters, 2005,V87(15):151122-1-151122-3.
- [132] Liu T., Chen X., Di Z., et al. Tunable Magneto-Optical Wavelength Filter of Long-Period Fiber Grating with Magnetic Fluids[J]. Applied Physics Letters, 2007,V91(12):121113-121116.
- [133] Horng H. E., Chen C. S., Fang K. L., et al. Tunable Optical Switch Using Magnetic Fluids[J]. Applied Physics Letters, 2004,V85(23):5592-5594.
- [134] Hong C., Yang S. Y., Horng H. E., et al. Control Parameters for the Tunable Refractive Index of Magnetic Fluid Films[J]. Journal of Applied Physics, 2003, V94(6):15-19.
- [135] Mailfert A., Nahounou B.. Dielectric Behaviour of a Ferrofluid Subjected to a Uniform Magnetic Field[J]. IEEE Magnetics Transactions, 1980,V16(2):254-257.
- [136] Giglio M., Vendramini A.. Thermal Lens Effect in a Binary Liquid Mixture: A New Effect[J]. Applied Physics Letters, 1974,V25(10):555-557.
- [137] Pu S., Chen X., Chen L., et al. Suppressing the Thermal Lens Effect by Magnetic-Field-Induced Mass Transfer and Phase Separation in a Magnetic Fluid[J]. Applied Physics Letters, 2005,V87(2):021905-021905-3.
- [138] Yang S. Y., Chiu Y. P., Jeang B. Y., et al. Origin of Field-Dependent Optical Transmission of Magnetic Fluid Films[J]. Applied Physics Letters, 2001,V79(15):2372-2374.
- [139]赵勇, 董俊良, 陈菁菁等. 磁流体的光学特性及其在光电信息传感领域中的应用[J]. 光电 工程, 2009, 36(7):126-131.
- [140] Trivedi P., Patel R., Parekh K., et al. Magneto-Optical Effects in Temperature-Sensitive Ferrofluids.[J]. Applied Optics, 2004,V43(18):3619-3622.
- [141] 王少辉,英占,姜国庆等. 锥形光纤的制备和理论分析[J]. 纳米科技, 2009, 6(1):11-13.

- [142] Aseel M., Vishnu K., Ahmed S. S., et al. Magnetic Field Sensing Using Whispering-Gallery Modes in a Cylindrical Microresonator Infiltrated with Ferronematic Liquid Crystal[J]. Optics Express, 2017,V25(11):12195-12202.
- [143] Ma C., Dong B., Lally E. M., et al. Optimization of Single-/Multi-/Single-Mode Intrinsic Fabry–Perot Fiber Sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012,V30(14):2281-2288.
- [144] Qian W., Farrell G., Wei Y.. Investigation on Single-Mode–Multimode– Single-Mode Fiber Structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, V26(5):512-519.
- [145] Pu S., Chen X., Chen Y., et al. Fiber-Optic Evanescent Field Modulator Using a Magnetic Fluid as the Cladding[J]. Journal of Applied Physics, 2006,V99(9):437-439.
- [146] Liu H., Yang H. Z., Qiao X. G., et al. Strain Measurement at High Temperature Environment Based on Fabry-Perot Interferometer Cascaded Fiber Regeneration Grating[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2016,V248:199-205.
- [147] Wu J., Miao Y. P., Song B., et al. Low Temperature Sensitive Intensity-Interrogated Magnetic Field Sensor Based on Modal Interference in Thin-Core Fiber and Magnetic Fluid[J]. Applied Physics Letters, 2014,V104(25):252402-1-252402-4.
- [148] Zhao Z., Tang M., Gao F., et al. Temperature Compensated Magnetic Field Sensing Using Dual S-Bend Structured Optical Fiber Modal Interferometer Cascaded with Fiber Bragg Grating[J]. Optics Express, 2014,V22(22):27515-27518.
- [149] Zhang Z., Shao C., Sun Y., et al. Tubular Nanocomposite Catalysts Based on Size-Controlled and Highly Dispersed Silver Nanoparticles Assembled on Electrospun Silica Nanotubes for Catalytic Reduction of 4-Nitrophenol[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012,V22(4):1387-1395.
- [150] Li J., Wang R., Wang J., et al. Novel Magnetic Field Sensor Based on Magnetic Fluids Infiltrated Dual-Core Photonic Crystal Fibers[J]. Optical Fiber Technology, 2014,V20(2):100-105.
- [151] Ji W. B., Liu H. H., Tjin S. C., et al. Ultrahigh Sensitivity Refractive Index Sensor Based on Optical Microfiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012,V24(20):1872-1874.
- [152] Yin G., Wang C., Zhao Y., et al. Multi-Channel Mode Converter Based on a Modal Interferometer in a Two-Mode Fiber[J]. Optics Letters, 2017, V42(19):3757-3759.
- [153] Pedrazzani J. R., Andrejco M. J., Strasser T. A., Reflective-Mode Conversion with UV-Induced Phase Gratings in Two-Mode Fiber[C]. Conference on Optical Fiber Communication Ofc. 1997.
- [154] Ali M. M., Jung Y., Lim K. S., et al. Characterization of Mode Coupling in Few-Mode FBG With Selective Mode Excitation[J]. IEEE Photonics Technology Letters,

2015,V27(16):1713-1716.

- [155] Horng H. E, Hong T. et al. Designing the Refractive Indices by Using Magnetic Fluids[J]. Applied Physics Letters, 2003,V82(15):2434-2436.
- [156] Yang J., Jiang L., Wang S., et al. High Sensitivity of Taper-Based Mach-Zehnder Interferometer Embedded in a Thinned Optical Fiber For Refractive Index Sensing[J]. Applied Optics, 2011,V50(28):5503-5507.
- [157] Sun B., Fang F., Zhang Z., et al. High-Sensitivity and Low-Temperature Magnetic Field Sensor Based on Tapered Two-Mode Fiber Interference[J]. Optics Letters, 2018,V43(6):1311-1314.
- [158] Konstantaki M., Candiani A., Pissadakis S.. Optical Fibre Long Period Grating Spectral Actuators Utilizing Ferrofluids as Outclading Overlayers[J]. Journal of the European Optical Society, 2011,V6(1):88-91.
- [159] Guan B. O., Albert J., Shang L., et al. Fiber-Optic Vector Vibroscope[J]. Optics Letters, 2012,V37(13):2703-2705.
- [160] Rong Q. Z., Qiao X. G., Yang H. Z., et al. Fiber Bragg Grating Inscription in a Thin-Core Fiber for Displacement Measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015,V27(10):1108-1111.
- [161] Wu Q., Semenova Y., Yan B., et al. Fiber Refractometer Based on a Fiber Bragg Grating and Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber Structure[J]. Optics Letters, 2011,V36(12):2197-2199.
- [162] Dan G., Mihailov S. J.. Self-Focusing Behavior in the Fabrication of Fiber Bragg Gratings with an Ultrafast Laser and a Phase Mask[C], Quantum Electronics & Laser Science Conference. 2005.
- [163] Grobnic D., Smelser C. W., Mihailov S. J., et al. Fiber Bragg gratings with suppressed cladding modes made in SMF-28 with a femtosecond IR laser and a phase mask[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004,V16(8):1864-1866.
- [164] Faustini L., Martini G.. Bend Loss in Single-Mode Fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997,V15(4):671-679.
- [165] Marcuse D.. Curvature Loss Formula for Optical Fibers[J]. J.Opt.Soc.Am, 1976,V66(3):216-220.
- [166] Schermer R. T., Cole J. H.. Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007,V43(10):899-909.
- [167] Heiblum M., Harris J.. Analysis of Curved Optical Waveguides by Conformal Transformation[J]. IEEE J Quantum Electron, 1975,V11(5):313-313.

- [168] Smith A. M. Birefringence Induced by Bends and Twists in Single-Mode Optical Fiber[J]. Applied Optics, 1980,V19(15):2606-2611.
- [169] Block U. L., Digonnet M. J. F., Fejer M. M., et al. Bending-Induced Birefringence of Optical Fiber Cladding Modes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006,V24(6):2336-2339.

### 致谢

首先, 衷心地感谢我的导师-乔学光教授。在攻读博士学位期间,从课程学习、 论文选题、具体实验的开展到毕业论文的写作,都得到了乔老师的悉心指导,使我从 对光纤传感一无所知跨进了传感的大门。乔老师严谨的工作态度、执着的科研精神和 渊博的学识,使得实验室的实验平台建设逐步完善,科研团队不断的壮大,科研成果 硕果累累,得到了国内外专家的一致好评;与国外一些学校建立了长期合作关系,为 团队人员提供了优越的科研环境和较好的交流平台。乔老师不仅是我的学术导师,更 是我的人生导师,他的宽容、耐心和鼓励不仅帮我解决了很多实际问题,同时激励着 我在今后的科研道路上不断前进。

感谢西北大学物理学院忽满利老师、杨杭洲老师、王若晖老师,在具体实验设计、 进程和学术论文写作、修改等方面的帮助和指导。同时,王若晖老师严谨的科学理论 推导和实验态度也让我从中获益良多。

感谢西北大学物理学院孙安老师、冯忠耀老师、荣强周老师、周锐老师,西安石 油大学理学院傅海威老师、高宏老师、邵敏老师、王向宇老师、禹大宽老师、白燕老 师、樊伟老师、冯德全老师给予的帮助。他们扎实的工作作风和对科研的热情为我今 后的工作树立了榜样。

感谢我们课题组成员对我的支持和帮助。虽然我比实验室成员的年龄大上许多, 但在实验上,大家能够一起进行方案的交流和讨论,相互学习,共同进步;生活上, 不定期的举行团队文化建设活动,相互帮助,相互关怀,使我在学习和科研中感受到 了大家庭带来的快乐和温暖。

最后,深深感谢我的家人。我的爱人是一名长期驻扎在祖国西北的军人,虽然不 能长期陪伴在我的身边,但精神鼓舞和支持一直不断,使得我能够顺利完成学业。感 谢父母对我儿子的照顾,感谢小家伙对我的理解和包容,使我有更多的时间投入到科 研和学习当中。

最后,再次感谢所有攻读博士学位期间给予我帮助的人们!

1

## 攻读博士学位期间取得的科研成果

### 1. 发表学术论文

[1] Junying Zhang, Xunguang Qiao, Hangzhou Yang, Ruohui Wang, Qiangzhou Rong, Kok-Sing Lim, and Harith Ahmad. All-fiber magnetic field sensor based on tapered thin-core fiber and magnetic fluid. Applied Optics, 2017, 56(2): 200-204.

[2] Junying Zhang, Xueguang Qiao, Ruohui Wang, Fengyi Chen, and Weijia Bao. Highly-sensitivity Fiber-Optic Vector Magnetometer Based on Two-mode Fiber and Magnetic Fluid. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2576-2580.

[3] Junying Zhang, Xueguang Qiao, Fengyi Chen. Fiber-optic vector magnetometer based-on high-order cladding modes of fiber Bragg grating written on a multi-clad fiber. In progress.

#### 2. 申请受理专利

- [1] 乔学光,张军英,王若晖。一种磁流体包覆的全光纤矢量磁场传感器及其制备方法:中国,公开 CN109709498A, 2019.05.
- [2] 乔学光,张军英,王若晖等。一种基于光纤光栅的探针式矢量磁场传感器及 其制作方法:中国,公开 CN109709499A,2019.05.

#### 3. 参与科研项目

[1] 国家自然科学基金仪器研究专项,地震波勘探光纤测井仪器关键技术研究,2014/01-2017/12,结题,参与。

[2] 国家自然科学基金科学重点项目群,面向地层能源的光纤传感基础研究, 2018/01-2022/12,在研,参与。

[3] 国家自然科学基金面上项目,井中地震波勘探光纤检测关键技术研究, 2013/01-2016/12,结题,参与。

# 作者简介

### 1. 基本情况

张军英,女,河北邯郸人,1982 年 8 月出生,西北大学物理学院光学专业 2014 级博士研究生。

### 2. 教育和工作经历

2000.09~2004.06 河北师范大学,本科,专业:物理学 2004.09~2007.06 兰州大学,硕士研究生,专业:凝聚态物理 2007.08~2014.08 河西学院物理与机电学院,教师 2014.09~至今西北大学,博士研究生,专业:光学

## 3. 攻读博士学位期间的其它奖励

2014 西北大学研究生一等学业奖学金2015 西北大学研究生二等学业奖学金2016 西北大学研究生三等学业奖学金