武漢二代大学

Wuhan Institute Of Technology

硕士学位论文

光子晶体长周期光纤光栅传感特性 实验研究

学科专业: 光学工程
研究生: 付彩玲
指导教师: 王 英教 授
培养单位: 理学院

二〇一五年六月

分类号: 043

学校代号: 10490

学号: 201207004

武汉工程大学硕士学位论文

光子晶体长周期光纤光栅传感特性 实验研究

作者姓名:付彩玲 指导教师姓名、职称:王英教授
申请学位类别:工学硕士学位 学科专业名称:光学工程
研究方向:光纤传感
论文提交日期:2015年4月1日 论文答辩日期:2015年5月23日
学位授予单位:武汉工程大学 学位授予日期: 年月日
答辩委员会主席:兰鹏飞教授

Sensing Properties of Long-period-fiber-gratings Based on Photonic Crystal Fiber

A Thesis Submitted for the Degree of Master

Major: Optical Engineering Candidate: Fu Cailing Supervisor: Prof. Wang Ying

Wuhan Institute of Technology Wuhan, Hubei 430073, P. R. China April, 2015

独创性声明

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

学位论文作者签名: 体彩 砖

2015年 6月1日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解我校有关保留、使用学位论文的规定, 即:我校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子 版,允许论文被查阅。本人授权武汉工程大学研究生处可以将本学位 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。

保 密 O , 在____年解密后适用本授权书。 本论文属于

不保密 O。

(请在以上方框内打"√") 学位论文作者签名: A 彩 & 20/5 年 6 月 1日

指导教师签名: 上英

20 年 月 日

摘要

长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)由于其无后向散射、对 周围环境敏感等特点广泛应用于传感领域和通信及其它技术领域。光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF)的多孔结构使其具有很多优于传统光纤的特性, 改变包层中空气孔的排列方式、大小、孔间距等参数可改变其传输性质,这大大 拓展了光子晶体光纤的应用范围。光子晶体光纤长周期光栅(PCF-LPFG)整合 了光子晶体光纤和长周期光纤光栅的优点,它是通过在 PCF 上实现周期性折射 率调制而形成的,它们的结合使得空气孔可以为气体、液体和微粒子等提供通道。 与在普通单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)上制备的普通 LPFG 相比,它有 着设计自由度和灵活性高、制作工艺多样化、可进行多参量、多功能测量等特点。 LPFG 和 PCF-LPFG 两者的特性差别很大,如 PCF-LPFG 对温度不敏感,这可以 很好的解决温度和其它被测物理量之间交叉敏感的问题。制备 LPFG 的方法很多 种如紫外写入法、飞秒激光逐点写入、机械法等,但相比之下 CO2 激光曝光法具 有成本低、灵活性强、可靠性高、适用光纤类型广等优点。本文基于国内外学者 研究基础上,采用了一种改进型的 CO2 激光二维扫描制备 LPFG 的方法,并利用 该方法在 SMF 和 PCF 上成功制备了 LPFG。鉴于此,本论文的主要研究工作有:

(1)介绍了制作 LPFG 的五种方法各自的优缺点,并从残余应力释放、 玻璃致密化、物理变形三个方面分析了 CO₂ 激光制备 LPFG 引起折射率变化的 机理,且对长周期光纤光栅的光谱特性采用耦合模理论进行了分析和计算。

(2)搭建了一套高频 CO₂激光脉冲二维扫描制备 LPFG 的实验系统,主 要包括搭建 CO₂激光光路系统,并对系统进行了优化改进,提高了光栅制备的 稳定性、重复性和成功率。并且利用该系统分别在普通单模光纤和光子晶体光 纤上成功写制了消光比达 30dB 插入损耗小于 0.3dB 的 LPFG 和消光比达 25dB 和插入损耗小于 0.7dB 的 PCF-LPFG,并对制备过程中的传输谱的演变和其温 度、应变、折射率、弯曲等外界因素的传感特性进行了比较和分析。实验表明: PCF-LPFG 相对于普通 LPFG 其对温度不敏感灵敏度仅为 4pm/°C;当外界折射 率小于 1.46 时,随着折射率的增大两者的漂移方向相反; PCF-LPFG 轴向应变 灵敏度比普通 LPFG 的应变灵敏度提高了一个数量级,达到了-3.5pm/µε; PCF-LPFG 的谐振波长和损耗峰幅值对气压的灵敏度都较低,分别为

Ι

0.12 nm/MPa、 0.25 dB/MPa。

(3)除了上述工作以外,还做了光纤 F-P (Farby-Perot)干涉仪相关方面 的工作。FPI 传感器因其结构简单、高可靠性、高灵敏度等特点成为光纤传感 应用的热点之一,受到广泛关注。本文提出的两种 F-P 结构均是采用单模光纤 和石英毛细管制作而成的,两者分别具有高压强灵敏度和高温度灵敏度。其中 高压强灵敏度的 F-P 腔在常压下其灵敏度可大于 1000nm/kPa,比基于膜片的光 纤 F-P 传感器压强灵敏度至少高一个量级。高温度灵敏度的 F-P 腔的最高温度 灵敏度可达 23.4 nm/°C。

关键词:光纤传感; CO2激光; 长周期光纤光栅: 光子晶体光纤

Abstract

Long period fiber grating have been widely used in optical sensors, communication and other fields due to its no backscatter, highly sensitive to the external environment and so on. The feature of PCF's (Photonic Crystal Fiber) porous structure makes it superior to SMF. In order to change the propagationproperties of the PCF, we can change the arrangement of air holes, size, hole pitch in the cladding. PCF-LPFG (Photonic Crystal Fiber-long period grating) combines the merit of both the PCF and LPFG, which is achieved by the periodic refractive index modulation in the PCF. The air holes in the cladding can provide the channels for gas, liquid and particles. Comparing with ordinary LPFG, PCF-LPFG has the advantages of flexibility, craftdiversification and multi-parameter measurement. PCF-LPFG has singularcharacteristic such as insensitive to temperature, which can well solve the problem of cross sensitivity between temperature and other physical parameter. There are a number of ways to fabricate LPFG, for example, UV, femtosecond laser, mechanical method. Compared with other inscription methods, CO_2 laser irradiationhas advantages oflow cost, flexibility, high reliableand can be used to inscribe LPFG in almost all types of fiber, which has given rise to widespread concern. In this paper wedemonstrated a promising CO₂laser irradiation system based on an improved 2-D scanning technique. We employed such a system to inscribe LPFGs in SMF and PCF. The major work is summarized as follows:

(1) We presented five methods of inscribing LPFG, and the mechanism for the refractive index modulation of CO₂-laser-induced LPFGs is analyzed as three aspects: residualstressrelaxation, glass densification and physical deformation. Thetransmission spectrum characteristicis analyzed and simulated by use of coupled mode theory.

(2) ApromisingCO₂laser irradiation based on an improved two-dimensional scanning technique wasdemonstrated, including CO₂ laser optical system. This system could beavailable to inscribe LPFGs with good reproducibility, stability. We employed such a system to inscribe the LPFG in SMF and solid core PCF. The extinction ratio and insertion lossof LPFG and PCF-LPFG can respectively achieve

30dB, 25dB, less than 0.3dB and 0.7dB. We tested the characteristics of LPFG and PCF-LPFG, i.e. transmission spectrum evolution, temperatureresponse, strain response, surrounding refractive index response, etc. PCF-LPFG is insensitive to temperature, the sensitivity is only4pm/°C. When the refractive index is less than 1.46, drift direction is opposite with the increase of the refractive index. And PCF-LPFG exhibits a very high strain sensitivity of 3.5pm/µε, which is one order of magnitude higher than LPFG, i.e. 0.35pm/µε. The resonant wavelength and loss peak of PCF-LPFG's pressure sensitivity are low, respectively 0.12nm/MPa, 0.25dB/MPa.

(3) In addition, we also made the work on the F-P interferometer(FPI). The FPI has attracted attention due to its simple structure, reliability, and high sensitivity. In this paper, two FPIs are both fabricated by silica tube and SMF. The highest pressure sensitivity can achieve 1000nm/kPa and the temperature sensitivity can achieve 23.4nm/°C.

Keywords: Optical fiber sensor; CO₂ laser; long period fiber gratings; photonic crystal fiber

	=
	चेर
н	~~~

摘 要I
目 录V
第1章 绪论1
1.1 光纤光栅的发展1
1.2 长周期光纤光栅的研究现状2
1.2.1 长周期光纤光栅的传感研究2
1.2.2 长周期光纤光栅的应用
1.3 光子晶体光纤5
1.3.1 光子晶体光纤5
1.3.2 光子晶体光纤的传感研究7
1.4 光子晶体光纤长周期光栅的传感研究8
1.5 光纤法布里珀罗传感器9
1.6 论文的主要内容10
第2章 长周期光纤光栅理论分析13
2.1 长周期光纤光栅的制备法13
2.1.1 紫外写入法13
2.1.2 腐蚀刻槽法14
2.1.3 物理变形法14
2.1.4 飞秒激光制备法15
2.1.5 CO2 激光制备16
2.2 长周期光纤光栅耦合理论19
2.3 小结
第3章 光子晶体光纤长周期光栅25
3.1 CO2 激光制备长周期光纤光栅
3.2 长周期光栅特性
3.2.1 温度响应特性32
3.2.2 折射率响应特性
3.2.3 轴向应变响应特性
3.2.4 弯曲响应特性
3.2.5 气压特性40
3.3 小结
第4章 高灵敏度 F-P 干涉仪43
4.1 干涉型光纤传感器43
4.1.1 几种典型的光纤干涉型传感器43

4.1.2 光纤 F-P 干涉传感器的原理	
4.2 超高压强灵敏度的 F-P 干涉仪	
4.2.1 F-P 腔的制作步骤	
4.2.2 实验结果测试和分析	47
4.3 高温度灵敏度 F-P 干涉仪	
4.3.1 F-P 腔的制作步骤	
4.3.2 实验测试和结果分析	51
4.4 小结	53
第5章 总结与展望	
5.1 总结	55
5.2 展望	
参考文献	
攻读硕士期间已发表论文	65
致谢	67

第1章 绪论

1.1 光纤光栅的发展

光纤的出现给光纤传感和通信技术领域带来了新的生机和希望。1970年,美国康宁公司采用改进型化学相沉积法(MCVD法)成功研制出低传输损耗石英光纤,自此光纤通信技术飞速发展。随后,加拿大的Hill^[1]等人首次在掺锗光纤中利用驻波法写制出反向模式间耦合的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)。这一发现引起了人们的广泛关注,极大的推动了光纤光栅在理论研究、写入方法等方面的快速发展。

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性通过 UV 曝光的方法将入射 光相干场图样写入纤芯,进而在纤芯内产生沿纤芯轴向的折射率周 期性变化,从而形成光纤光栅。作用机理即光通过 FBG 时满足反射 条件的波长发生发射,其余波长继续沿着 FBG 继续传输。由于其高 灵敏度、小体积、操作简便、抗干扰能力强、能埋入智能结构等优 点在传感领域备受关注且广泛应用在实际中。比如军事领域的光纤 陀螺,航天、船舶、医学、建筑等领域工程的在线监测。

1989年,美国的 G.Meltz^[2]等人利用全息相干法侧面曝光写入 FBG。与 Hill 提出的驻波法相比,该方法的优点是可选择入射激光 波长或改变两相干光夹角在任何可用波段写入 FBG。但也存在缺点 即该制备方法对光源和周围环境的稳定性要求较高,且对光源的相 干长度要求极其严格。

1993年,Hill^{3]}等人在此基础上提出使用相位掩模法写入光纤 光栅。该方法的优点是相位光栅周期决定写入光栅的周期,而不再 依赖于辐射光的波长。该方法对周围环境的稳定性不高,且对写入 装置进行了简化。相位掩模写入法使大批量生产光纤光栅成为可能, 这在一定程度上极大促进了光纤光栅在传感和通信领域的应用,使 其走向产品化和实用化成为可能。

根据周期的不同光纤光栅可分为长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)和光纤布拉格光栅。周期小于 1µm 的布拉格

光纤光栅,特点是耦合发生在传输方向相反的纤芯模式之间,属于 反射光栅;周期为几十到几百微米的长周期光纤光栅与布拉格光纤 光栅相反,能量耦合发生在纤芯基模和同向传输的包层模之间。美 国贝尔实验室的 A.M.Vengsarkar^[4]首次采用紫外曝光法在载氢后单 模光纤中制备出第一支通常意义上的 LPFG。同年,Bhatia^[5]等人对 LPFG 的各种特性进行了详细讨论,并提出 LPFG 在传感和通信领 域中的应用。1998 年 D.D.Davis 等人首次报道了用 CO₂ 激光脉沿冲 轴向周期性加热光纤来制备 LPFG 的新方法,使 LPFG 的制备步入 了一个崭新的发展阶段。2003 年 Y.J. Rao 等人提出了改进的 CO₂激 光制备方法,即用高频 CO₂激光聚焦脉冲来实现光纤的周期性扫描 加热从而制备 LPFG,该方法可有效提高光栅制备质量并降低光栅 制作成本,使得 LPFG 的大规模批量生产成为可能,从而大大推动 了 LPFG 的发展。

1.2 长周期光纤光栅的研究现状

1.2.1 长周期光纤光栅的传感研究

由于 FBG 在传感应用中有一定的局限性,如灵敏度不高、光栅 传感系统中需要使用隔离器来消除后向散射光。而 LPFG 正好能较 好的克服这些不足,它是一种透射型光纤光栅,且 LPFG 的谐振波 长或幅值对外界被测参量的变化非常敏感,比 FBG 具有更高的温 度、弯曲、应变、横向负载和折射率灵敏度^[6,7],引起了众多学者的 关注。

LPFG 是一种比较理想的温度传感器,温度变化会引起 LPFG 周期的变化及纤芯和包层有效折射率差的变化,导致 LPFG 谐振峰的漂移,谐振波长会随温度线性变化,其漂移方向和灵敏度大小取决于耦合模的阶次和光纤种类。如 D.D.Davis 和 H.Georges^[8]等人采用电弧法制备的 LPFG 高温温度性较好,可在高温(1000°C)下的高温环境下工作,且其温度灵敏度随温度升高有较大提高。2001年,Y.Liu^[9]在 5.61m⁻¹的范围内得到了 14.51nm/m⁻¹的弯曲灵敏度,表明

LPFG 的横向负载灵敏度比 FBG 高两个数量级; 王义平等人^[10]采用 高频 CO₂ 激光脉冲单侧曝光在 SMF 上制备的 LPFG 扭曲方向具有 方向相关性,实现了既能够辨别扭曲方向又能测量扭曲量的扭曲传 感器; S.H. Chen 等人于 2004 年制作出对温度和应变均不敏感的弯 曲传感器。

利用 LPFG 还可以实现对外界环境折射率变化的测量。外界折 射率变化会引起光纤包层模的有效折射率随之发生变化,从而使 LPFG 的谐振峰波长或损耗峰幅值发生改变。利用这一特性可将 LPFG 作为测量折射率、浓度、湿度等参量的生物化学传感器。童 治^[11]等人采用耦合模理论对环境折射率对 LPFG 光谱特性进行理论 分析和数值模拟。舒学文^[12,13]等人利用导模与高阶包层模的能量耦 合形成的两个损耗峰对外界环境折射率有着不同的敏感度而制作出 高灵敏度的折射率传感器。1996 年,V.Bhatia^[14]用对温度不敏感的 LPFG 实现了折射率和应力的测量,解决了温度交叉敏感的问题。 2002 年,S.Luo^[15]等人在 LPFG 的外表面涂上特殊物质,该传感器 可用于对外界化学物质进行测量。利用 LPFG 谐振波长对外界环境 折射率敏感的特性,可以制作成浓度、折射率传感器^[16-18]。

同时 LPFG 在透射谱中可形成多个损耗峰,其原因在于传输的 纤芯模可与多个包层模发生能量耦合,故 LPFG 用作多参数的测量, 但多参数测量中存在的致命问题即交叉敏感。X.K Zeng 等人采用 LPFG、FBG 和 F-P 等传感器的联合结构解决了温度-静态应变-振动 -横向负载四个参数的同时测量。2003 年,Y.P. Wang 等人^[19]采用高 频 CO₂激光脉冲制备的非对称 LPFG 具有对弯曲不敏感的特性,这 很好的解决了弯曲与其他参数如温度、应变等参量的交叉敏感问题。

1.2.2 长周期光纤光栅的应用

长周期光纤光栅广泛应用在通信领域和传感领域,如通信领域 的增益平坦器、带阻滤波、光纤偏振器、光纤耦合器等,传感领域 的温度、应力、化学等传感器。

波分复用系统中使用的掺饵光纤放大器(Erbium-doped Optical

Fiber Amplifier, EDFA) 其本身的增益谱不平坦特性会限制通信系 统的无中继距离和增加接收端的误码率。若将不同谐振波长和峰值 的 LPFG 级联,我们就可得到一个与 EDFA 增益谱相反的损耗谱, 进而使 EDFA 的增益谱变得相对平坦。1997年, P.F.Wysocki 等人用 LPFG 获得带宽达 40nm 的 EDFA 增益平坦器。2002 年, L.Sohn^[20] 等人用机械微弯法制备的 LPFG 实现了可调谐增益平坦器, 使 EDFA 在 C 波段(1525~1560nm)的不平坦度小于 1dB。LPFG 的耦合方 式决定了对特定波长的光具有损耗能力,这样通过设计 LPFG 的参 数就可以来实现谐振波长的强衰减,而其他波长的光全部通过,从 而实现了基于 LPFG 的光学滤波功能。 D.S.Starodubov 和 P.K.Lam^[21,22]等人先后实现了基于 LPFG 的带通滤波器。X.J.Gu 和 C.D.Su^[23]等人通过级联 LPFG 实现了具有多个通道的梳状滤波器以 及多波长光源,只要改变级联 LPFG 的间距就可改变通道的间隔。 光纤本身具有双折射,而在光纤中写入LPFG 后双折射效应会变强, 不同偏振状态的模式对应的谐振波长就不同,在光谱上即表现为波 峰分离,若在特定波长处使光的某一偏振状态能量高度损耗,则可 实现光纤型偏振器件。提高光纤双折射可以采用特种光纤或者对光 纤截面进行特殊设计。2007年, Y.P.Wang^[24]等人用聚焦 CO₂ 激光在 实芯光子晶体光纤单侧周期性坍塌制备 LPFG, 实现了消光比可调 的光纤起偏器,该起偏器可有效解决温度交叉敏感问题。光纤耦合 器是光纤通信系统中不可或缺的器件,用于实现光信号分路/合路。 当两个 LPFG 紧紧贴合时,根据 LPFG 的耦合模特性,一个 LPFG 包层模中的能量在遇到另一个 LPFG 后会再耦合回纤芯形成导模, 从而实现耦合器功能。利用 LPFG 的耦合特性可极大地提高光纤耦 合器的工作距离和耦合效率。V.Grubsky 和 K.S.Chiang 等人^[25]分别 提出用两个相同的 LPFG 平行紧密贴合来实现波长选择耦合器以及 上下分路器。Y.O.Liu 等人^[26]用两个高频 CO₂ 激光制备的 LPFG 平 行贴合来形成全光纤耦合器,耦合效率与曝光方向密切相关。

LPFG 对温度、应力、折射率等参数具有较高的灵敏度,并且 LPFG 体积小、抗电磁干扰等特点广泛应用于各领域。国内外学者 对基于不同光纤类型和不同制备技术的 LPFG 的温度特性做了大量

研究,目前 LPFG 的温度灵敏度最高可达 19.2nm/°C^[27]。近年来基 于单模蓝宝石单晶光纤制备的 LPFG 温度传感器吸引了人们的注 意,因为蓝宝石有着 2040°C 的熔点,而用该光纤制作的 LPFG 有 可能在高达 1500°C 的高温环境下工作^[34]。LPFG 谐振波长和损耗峰 幅值对外界折射率的敏感性广泛应用于制备生物传感器、液位传感 器,如可以应用于在线检测溶液浓度或特定区域某物质浓度。 X.W.Su 等人用耦合模理论系统分析了 LPFG 的折射率特性,并指出 包层模式阶次越高模式其折射率响应灵敏度越高。L.Rindorf 等人^[28] 在光子晶体光纤上制备 LPFG 并用其来检测生物分子层的厚度。

1.3 光子晶体光纤

1.3.1 光子晶体光纤

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)是由具有空气孔周 期排列结构的单一石英介质材料构成的,其横截面上有较复杂的折射 率分布。包层中空气孔的排列方式、大小、孔间距和纤芯形成方式等 因素直接影响其传输性质。

根据导光机理 PCF 可分为全内反射型光子晶体光纤(Total Internal Reflection, TIR-PCF)和带隙型光子晶体光纤(Photonic Band-Gap Fiber, PBG-PCF)。TIR-PCF 又称折射率引导型光子晶体光纤,光纤中心是一个空气孔缺失形成的缺陷,纤芯周围的多孔空 气结构形成光纤的包层,这样由空气孔排列组成的光纤包层有效折射率小于纤芯折射率,故其导光机制与传统光纤一样。而带隙型光 子晶体光纤的包层有效折射率大于纤芯折射率,其导光机制是光子 禁带效应,即光纤包层结构对一定频率范围内的光子存在带隙效应。 处于带隙中频率的光进入光纤时光在缺陷中传播,处于带隙之外的 频率的光被禁止传播。PBF 和 PCF 光纤结构分别如图 1-1 所示。



图 1-1 光子带隙光纤 (PBF) 和光子晶体光纤 (PCF)

光子晶体光纤的多孔结构使其具有很多优于传统光纤的特性, 这为克服传统光纤发展中的技术障碍提供了可靠的解决途径,大大 拓展了光子晶体光纤的应用范围。本小节详细介绍光子晶体光纤的 特性:无截止单模特性、色散特性、有效模场面积、非线性特性和 双折射特性。

对于普通光纤,当归一化频率 V<2.405 时满足单模传输条件^[29]; 但对于光子晶体光纤,只要对其结构合理设计就可实现在任意波长 单模传输,即无截止单模特性。当空气孔直径与空气孔间距的比值 d/Λ小于产生多模的临界值时,其对应的光子晶体光纤可以保持无限 单模。且无截止单模传输特性与光纤的绝对尺寸无关,这就为大模 场面积光子晶体光纤^[30]提供了一种途径。

普通光纤在波长大于 1300nm 的区域才出现反常色散的这一特 性限制了非线性效应的产生。而光子晶体光纤的纤芯和包层的折射 率差可以很大,如在空气孔中填充高折射率材料,这样就能对光子 晶体光纤的色散进行调节和控制以便得到符合不同要求的色散特 性。

有效模场面积与光纤非线性有密切关系,它用来表示模式能量的大小及场强分布情况,也用来衡量光纤非线性效应,其定义为 $A_{eff} = [\int dr_1 I(r_1)]^2 [dr_1 I^2(r_1)]^1,其中 I(r_1)是基模的横向场强分布。普通单模光纤的模场面积在 10~100 µm² 范围内,而光子晶体光纤的有效模场面积可在 1~800 µm² 范围内变化。有效模场面积较小说明能量密度集中,即非线性效应更明显。所以在实际应用中可根据实际需要来设计光纤的模场面积,得到理想的非线性效应。$

光子晶体光纤非线性效应主要由石英的三阶电极化率引起的,

其非线性系数可以表述为: γ=n₂ω₀/cA_{eff}其中 A_{eff}为有效模场面积。 由此我们可知提高非线性系数可以通过减小模场面积或增加材料非 线性折射率来达到。光子晶体光纤的非线性效应如交叉相位调制、 四波混频、受激拉曼散射和受激布里渊散射等,可以应用于产生超 连续谱、光波长转换器方面。

光子晶体光纤中的高双折射特性是由于其几何形状效应或应力 感应效应。如改变 PCF 纤芯或包层中空气孔的形状或空气孔的排列 都可以实现 PCF 的几何形状的不对称。此外,也可通过人为引入双 折射的方法,如在空气孔中填充聚合物来控制光纤的折射率,这样 可制造出可调的高双折射光纤^[31,32]。

1.3.2 光子晶体光纤的传感研究

光子晶体光纤的特点使其作为敏感元件广泛应用于各种新型传感器中,如 PCF 光栅传感器、干涉型 PCF 传感器、材料填充 PCF 传感器。

基于普通单模光纤的光栅传感器存在一些弊端,比如交叉敏感和高温下不稳定,而基于光子晶体光纤制作的光纤光栅有望解决这类问题。2003年,N.Groothoff¹³¹在纯石英光子晶体光纤上用193nm的双光子吸收成功写制光栅,进行退火处理后发现只有当温度达到500°C时其反射谱才有所衰减,这说明其光栅稳定性很强。随后,O.Fraza^[34]在高双折射光子晶体光纤上制作出对温度不敏感的应力传感器。 Dobb等制作的光子晶体长周期光纤光栅的温度灵敏度小于6pm/°C,这可以很好的解决上述的温度交叉敏感问题,且该光栅表现出弯曲不一致性,故可以用来实现多维变量的传感。随后,Y.Wang等人利用飞秒激光微加工在PCF上打孔的方法使PCF包层结构周期性破坏而形成的PCF-LPFG。

干涉型光子晶体光纤传感器主要分为FPI(Fabry-Perot Interferometer)、MZI(Mach-Zehner Interferometer)和光纤环形腔干涉仪等结构。H.YChoi等人提出利用熔接、空间孔坍塌的方法制作出 基于光子晶体光纤的MZI。随后,J.Villatoro等人在两根单模光纤之间

熔接光子晶体光纤制成M-Z干涉仪,在光子晶体光纤中传输的两个模式因为折射率不同被作为光纤M-Z干涉仪的两臂^[35]。2004年,C.L Zhao提出在光纤环境中插入高双折射光纤,得到的干涉条纹对温度不敏感,可以用来作对温度不敏感的应力传感器^[36,37]。2008年,Shi Q^[38,39]等人提出基于空芯光子带隙光纤F-P光纤传感器,该传感器对温度不敏感,且还进行了相关组网和解调的技术研究。

光子晶体光纤灵活的设计结构使得气体和液体很容易注入其空 气孔,通过这种操作可以改变光的传输性质。Hoo.Y.L等人将气体充 入光子晶体光纤中的空气孔,进而影响光波消逝波^[40,41]。2002年, R.T.Bise^[42]等人将温敏材料填充在实芯光子晶体光纤中实现的温度灵 敏度高于2nm/°C。同年,C.Kerbag^[31]对柚子型光子晶体光纤进行选择 性填充,研制出了可调谐的光纤器件。

1.4 光子晶体光纤长周期光栅的传感研究

光子晶体长周期光纤光栅与传统的长周期光纤光栅相比, 有着 设计自由度和灵活性高、制作工艺多样化、可进行多参量、多功能 测量等特点。1999年, Eggleton 采用相位掩膜法在掺锗纤芯的光敏 六角形 PCF 中写入了 LPFG^[43]。2004 年, J.H.Lim 利用施加应力的 方法(周期模板压)在PCF中写制了LPFG^[44]。早在2000年, Hong SeokSeo 等人在空芯光纤中注入液晶并在光纤两侧加上电极片并通 电,此时液晶分子产生周期性排列,即形成了 LPFG。随后,2005 年, D.Noordegraaf利用电极调谐法在灌有液晶的大模场面积 PCF 上写制了 LPFG。2006 年, Y.P. Wang 等人采用 CO2 激光脉冲逐点写 制法在大模场面积 PCF 上写制出了插入损耗小、温度灵敏度低的 PCF-LPFG^[45]。实验中通过优化激光器输出功率、扫描速度等参数 得到的 PCF-LPFG 的温度灵敏度和应变灵敏度分别为 3.91pm/°C 和 -7.6pm/με。2010年, Kyriacos KALLI 等人采用飞秒激光在无截止 单模 PCF 上成功写制弯曲灵敏度高、低温度灵敏度的非对称 LPFG。 实验发现,非对称 PCF-LPFG 对弯曲方向特别敏感,其中凹弯曲灵 敏度和凸弯曲灵敏度分别为 11.4nm/m⁻¹、7.0nm/m⁻¹。同年, 刘书静

等人同样采用红外飞秒激光微孔加工的方法在 PCF 上周期性写制 微孔,获得了周期数为 9、长度小于 4mm、谐振峰值大于 20dB 和 25dB 的偏振相关损耗的光子晶体光纤长周期光纤光栅。

1.5 光纤法布里珀罗传感器

FPI 传感器近年来成为光纤传感应用的热点之一,因其结构简 单、高可靠性、高灵敏度等特点受到广泛关注。根据 FPI 结构可分 为本征型法布里珀罗干涉仪(IFPI)和非法布里珀罗干涉仪(EFPI)。 由于 IFPI 光纤传感器的干涉腔由光纤本身构成,外界可变因素对光 纤折射率有较大影响,故限制了 IPFI 的应用。随后研究者又提出膜 片式 EFPI 光纤压力传感器,工作原理是外界压力作用时膜片产生 位移进而引起 F-P 腔长发生变化,该结构可以通过调节膜片的厚度 来控制灵敏度,如基于 SiO2 膜^[46]、银膜^[47]和石墨烯薄膜^[48]。目前 所用的压力传感器大多是基于电学器件,这类器件易受电磁干扰、 精确度低、并且重复性和稳定性方面不太如意。而 F-P 光纤压力传 感器耐高温、腐蚀和高压等特点,故可以很好的解决上述不足。F-P 光纤压力传感器可应用于生物医学和工业方面。医学上可用于检测 各种压力,如动(静)脉的血压、颅内压、心内压等,因为 F-P 光 纤压力传感器的小体积,故可以在一定程度上减少病人的痛苦。

各领域的需求推动了 FPI 传感器的发展,一大批学者开始对其 展开研究。2004年,Z.L. Ran^[49]利用 157nm 激光在无截止单模 PCF (ESM1500) 微加工制作出一个 F-P 腔,此结构耐高温。随后,2011 年,W.Y. Wang^[50]等人利用采用同样的思路利用飞秒激光在单模光 纤上成功制作出温度范围在-20~80°C 其灵敏度为 9.2pm/°C 的 IFPI, 由于飞秒激光作用在单模光纤上时并没有引起光纤机械结构的改 变,故该 IFPI 的结构比较稳定。1991年,Murphy^[51]采用光纤、毛 细管制作了高温度灵敏度低压力灵敏度的 EFPI 光纤传感器。2004 年,I.I.B. Kwon^[52]等人在反射光纤端面镀膜,制作了全反射型 EFPI, 它可以应用于应力检测,如检测建筑物、飞机、桥梁等结构。

2009年, Y.J.Rao^[53]首次提出基于单模光纤-空芯带隙光子晶体

光纤-单模光纤的结构来制作 FPI 传感器,并对其温度、应力、弯曲 和横向负载特性进行了研究,发现该结构对弯曲和横向负载不敏感, 温度灵敏度仅为 1.4nm/°C,但有着较高的应变灵敏度 5.9nm/με,鉴 于这些特点该结构可用于高温环境下的应力测试。2011 年,香港理 工大学的 Chuang Wu^[54]等人将空芯带隙光子光纤改为 PCF,采用单 模光纤-PCF-单模光纤的结构制作压强和温度范围分别为

0~40MPa 和 25~700°C 时灵敏度分别为-5.8pm/MPa 和 13pm/°C,此 结构中的 PCF 充当 F-P 腔的腔体,在熔接单模光纤和 PCF 时熔接点 区域的 PCF 周围的空气孔有塌陷,这有利于增加 F-P 腔的反射率。 随后,2012 年 J. Zhang 等人利用单模光纤和保偏 PCF 错位熔接(错 位大约 5μm)制作高温度灵敏度 FPI 传感器,温度范围为 33~600°C 时的灵敏度为 13.8pm/°C,其灵敏度与之前基于 PCF 的灵敏度相差 不大。

2012 年,重庆大学的 D.H.Wang^[55]利用玻璃管两端熔上单模的 的 FPI 结构用来探测高强度聚焦超声(High Intensity Focused Ultrasound, HIFU),实验结果表明外界压强为 2.69MPa,频率为 0.93MHz 的 HIFU 的信噪比能够达到 42.8dB。

1.6 论文的主要内容

CO₂激光制备 LPFG 具有操作简单、成本低、灵活性强、稳定 性高等特点,并且无需载氢或掺杂等增敏技术,只要灵活改变制作 参数就可在任意类型光纤上制备各种结构的 LPFG。基于此,本论 文采用 CO₂激光在普通单模光纤和光子晶体光纤上制备长周期光纤 光栅。本论文的创新之处在于搭建的一套改进的 CO₂激光脉冲二维 扫描制备 LPFG 的实验装置可有效提高光栅制备的稳定性、重复性 和成功率,而且操作简便,只要输入光栅参数即可自动制备所需的 高质量 LPFG;并且采用该套实验装置分别在普通单模光纤和光子 晶体光纤上成功写制了消光比达 30dB 插入损耗小于 0.3dB 的 LPFG 和消光比达 25dB 和插入损耗小于 0.7dB 的 PCF-LPFG,并对其温度、 应变、折射率、气压等外界因素的传感特性进行了比较和分析。 本论文的研究内容如下:

第一章绪论,首先对长周期光纤光栅在传感和通信方面的研究 进行了回顾;然后对光子晶体光纤导光机制、特性和基于光子晶体 光纤的各类传感器在传感方面的应用进行了简要的介绍;最后对光 子晶体光纤长周期光纤光栅在实验上的进展进行了总结。

第二章,介绍了制作长周期光纤光栅的五种方法,并对 CO₂激 光制备长周期光纤光栅引起折射率变化的机理进行了分析,且运用 耦合模理论分析了长周期光纤光栅的光谱特性。

第三章,搭建了一套改进的 CO₂ 激光脉冲二维扫描制备 LPFG 的实验装置,该装置可有效提高光栅制备的稳定性、重复性和成功率,并利用该装置在光子晶体光纤和单模光纤上制备 LPFG,并对它们对外界环境的传感特性进行了比较和分析。

第四章,基于研究生阶段所做的工作,我们利用单模光纤和石 英毛细管制作了两种不同的 F-P 腔结构。高压强灵敏度的 F-P 腔在 常压下其灵敏度大于 1000nm/kPa,比基于膜片的光纤 F-P 传感器压 强灵敏度至少高一个量级。高温度灵敏度的 F-P 腔的最高温度灵敏 度可达 23.4nm/℃,并对两者的相关特性进行了分析。

第五章,总结与展望,总结了该论文的主要工作内容,并对今 后主要的工作内容和研究方向进行了展望。

第2章 长周期光纤光栅理论分析

2.1 长周期光纤光栅的制备法

长周期光纤光栅的制作方法很多,各有其优缺点,其形成机理 以及写制成的长周期光纤光栅特性各异,这在一定程度上也扩大了 其在不同领域的应用。

2.1.1 紫外写入法

A.M. Vengsarkar 等人于 1996 年通过振幅掩模板利用载氢光纤 对紫外光的高灵敏性而引起纤芯折射率周期性调制而成功写制长周 期光纤光栅[56]。这种制备方法比较稳定成熟,而且可以用来批量生 产光纤光栅,但其缺点则在于要求光纤纤芯掺杂稀土元素(锗、磷 等),而且需要通过载氢来增强光纤的光敏性,而载氢会影响光纤光 栅热稳定性。此后,许多学者就开始关注长周期光纤光栅的理论研 究、形成机理、写入方法等,这快速推动了长周期光纤光栅的发展。 X.W. Su^[57]等人采用该方法写制了周期大于 1mm 的 LPFG,并对其 特性进行了相关研究。紫外写入 LPFG 的原理可用色心模型和应力 释放模型来解释。通常采用的紫外光源有:157nm 氟分子激光器^[58]、 248nm 准分子激光器和 193nm ArF 准分子激光器。紫外写入法的缺 点就是在写制过程中需要使用掩模板,而掩模板的价格比较昂贵, 且其写入周期是固定不变的,这在一定程度上限制了紫外写入法的 应用。为了提高光栅的制作率, H.Y.Tam 人采用提出将振幅掩模板 用微透镜阵列代替。该方法就是由熔融石英构成微透镜阵列,相邻 微透镜间无间隙,光纤放置在透镜焦平面上。248nm 的紫外光透过 微透镜阵列会在光纤上形成一系列等间距的条纹,这样就形成了 LPFG。该方法写入一个 LPFG 仅需十秒钟左右, 所以提高了制备光 栅的效率。

2.1.2 腐蚀刻槽法

腐蚀刻槽法的步骤是沿轴向等间距涂上金属薄层,再用氢氟酸腐蚀,未被金属薄层覆盖部分的光纤将被腐蚀,这样形成周期性的凹槽结构^[59,60]。紫外光写入方法只会引起纤芯折射率变化,但腐蚀刻槽法会引起纤芯和包层折射率的变化。制作过程其腐蚀刻槽部分主要在包层表面,能量耦合较弱,且腐蚀和未腐蚀部分的直径不一样,若在光纤两端施加应力时会使折射率发生调制从而形成强耦合的LPFG。这样,我们就可以通过改变轴向应力,或者施加扭曲应力来实现谐振波长可调的长周期光纤光栅。该制作方法成本低,但操作比较危险,且机械强度较低。C.Y.Lin^[60,61]和Y.Jiang^[62,63]等人对该方法制备的LPFG 应力、扭曲、弯曲、温度等多种传感特性进行了比较系统分析。

2.1.3 物理变形法

制作 LPFG 时可采用微弯、机械压力、电弧放电等措施使光纤 发生周期性的物理形变。机械微弯变形法^[64]是利用机械应力使光纤 发生周期性的物理微弯变形,进而通过弹光效应使光纤轴向发生周 期性的折射率调制,从而在光纤中写入长周期光纤光栅。该方法操 作简单,成本低廉,不需光纤具有光敏性,可以在几乎所有种类光 纤中写制光纤光栅,改变凹槽和光纤间的夹角就可改变光栅周期, 另外施加不同压力就可改变谐振峰幅值大小。但因为该方法会使光 纤的包层结构受到破坏,所以整体机械强度降低。

电弧放电法的制作方法就是将光纤置于两个电极之间,电极放 电使光纤产生熔融微弯变形,通过控制放电时间和电流调节光纤加 热的时间,从而得到不同的光谱。该方法操作简单,且周期可以随 意设置,并且无需载氢和掺杂。电弧放电法制备的 LPFG 的高温特 性^[65]很好。该方法的缺点主要是电弧放电区域较大,电极易氧化进 而影响放电强度稳定性,而且制备过程不能重复放电

2.1.4 飞秒激光制备法

飞秒激光法可通过逐点、逐线和相位掩模板三种方式写制。 LPFG。该方法主要基于飞秒激光的多光子吸收和光致电离机理,聚 焦光斑尺寸小,加工精度高,属于"冷"加工特性,避免了热融化 发生,保证了 LPFG 的机械强度,制作的 LPFG 热稳定性好且不易 老化。而且光纤不需要光敏性和增敏处理,通过控制平台的移动速 度与激光脉冲的重复率之比就可设定光栅周期,刻写快速,操作灵 活,但需要复杂的聚焦光学系统以及精确机械位移平台。飞秒激光 写制光纤光栅的原理是聚焦的飞秒激光照射到光纤上时被照射的区 域会产生缺陷和结构的变化,进而使被照射区域产生折射率改变。 1999年, KondoY.[66]等人利用 800nm 红外飞秒激光采用逐点写入的 方法在单模光纤中成功制作出了 LPFG, 首次实现了飞秒激光直写 长周期光纤光栅,制备的 LPFG 可以承受更高的温度(500℃ 以上), 并且谐振波长与温度有良好的线性关系。2004年,T.Fujii^[67]在特制 的纯石英纤芯光纤上采用飞秒激光写制的 LPFG 的损耗只有 0.26dB。2011年香港理工大学的 Y. Wang^[68,69]在普通单模光纤上制 备出了一种新型的非对称型微孔结构长周期光纤光栅,其折射率灵 敏度可达 190nm/RIU。飞秒激光制备 LPFG 也存在不足如透射光谱 有很多尖峰并且没有规律性。红外飞秒激光直写光栅的系统图如图 2-1 所示,该系统包括:飞秒激光、半波片、格兰棱镜、抬高镜、 显微镜系统、三维电移平台等。在制备过程中,经物镜聚焦后的飞 秒激光直接作用到光纤上,由于聚焦后的焦斑尺寸极小故可实现对 物质的微加工,同时在写制过程中可在实时观测系统 CCD (Charge Coupled Device)上控制红外飞秒激光焦点位置使其作用在光纤纤芯 上。制备光纤光栅时,首先将光纤放置在三维移动平台的夹具上, 再通过三维移动平台调节水平和俯仰,红外飞秒激光经 50×物镜聚 焦后作用到光纤纤芯上,写制时通过软件控制三维移动平台的移动 来确定写制周期,利用光路中的电控开关(Shutter)来控制激光的 曝光时间。



图 2-1 飞秒微加工系统

2.1.5 CO2 激光制备

高频 CO₂ 激光脉冲写入 LPFG 装置如图 2-2 所示:在写制过程 中,先将普通单模光纤呈水平直线状态置于移动平台上,光纤一端 用夹具固定,另一端悬挂重物,目的是使光纤在 CO₂ 激光曝光期间 处于水平绷直状态且在光纤轴向保持恒定的预应力。该方法适用光 纤类型广,无需光纤具有光敏性或其他载氢增敏处理,制备效率高、 成本低廉,而且可以通过软件控制灵活改变光栅的周期。密度变化、 残余应力释放、掺杂剂热扩散和熔融变形是目前 CO₂ 激光写制光栅 机理的四种解释。



图 2-2 高频 CO2 激光制备 LPFG 装置示意图

光纤通常采用 SiO₂ 材料作基底,故当玻璃的结构特性如体积、 密度等变化时,光纤纤芯和包层的折射率会相应变化。图 2-3 为热 处理过程中玻璃折射率、密度、体积随温度的变化关系^[70],图中坐 标箭头指向为图中物理量的增大方向,其中 T_{f1}和 T_{f2}是玻璃的两个转化温度。从图 2-3 中可以看到该现象,即将光纤加热到温度高于 T_{f2}再快速固化时光纤的折射率会减小;将光纤放在远小于 T_{f2}的环境中快速冷却时,光纤体积变小,其纤芯和包层的折射率均会变大。CO₂激光写入法引起光纤局部快速加热并快速冷却,所以在写制 LPFG 时会引起被加热部位的密度变化进而引起折射率变化。如果 将光纤加热至一定高温后让其慢慢冷却时,玻璃内部晶格等会恢复 到原来状态,但若让其快速冷却,其玻璃粘度会随着温度的降低而 增大,使得玻璃内部晶格无法达到原先处于室温时的平衡点,最终 导致降温后的折射率小于初始时的折射率。

由于纤芯和包层的掺杂量和浓度的不一致,在快速固化和快速 冷却时会导致拉制成光纤时存在残余应力。光纤中的残余应力分为 热应力和机械应力^[71-73],纤芯和包层热膨胀系数不同会引入热应力, 与拉制条件无关;纤芯和包层黏弹性质及杨氏模量不同会引入机械 应力,与拉制条件有关。CO2激光照射光纤时,被照射处强烈吸收 CO2激光,产生的热量使该处的残余应力得到释放,通过光弹效应 使被照射处的折射率发生变化。Y.G.Han^[74]等人证明被加热的光纤 拉制时的拉应力较大时其折射率的变化量较大。随后,Y.Park^[75]用 偏振的方法测试了光纤中的残余应力分布,这一结论与理论分析相 符。图 2-4 是不同拉力(150、270、400g)拉制的光纤中残余机械 应力和折射率变化的关系图,从图中可以看到为提高制作效率,应 选用较大的拉应力拉制的光纤来制作 LPFG。



图 2-3 热处理过程玻璃的密度、体积、折射率随温度变化关系



图 2-4 不同拉力拉制的光纤中残余机械应力引起的折射率变化

光纤中纤芯或包层中掺杂使两者之间具有一定的折射率差,而掺杂会改变光纤折射率。CO2激光加热光纤时,光纤中的掺杂物质如Ge、B会发生热扩散,从而引起光纤的折射率变化。1997年,E.M.Dianov等人发现在光纤中掺入氮时只需短时间加热就会引起较大折射率变化,其中当温度达到1400-1600°C时热扩散效率最高。

掺杂SiO₂的熔点一般为1200~1700°C,若CO₂激光能量够大,且 加热时间够长时,当被加热光纤达到其熔点时会使光纤发生熔融变 形。若加热时在光纤上施加一定的拉力,光纤熔融处的直径会变小, 即熔融变形。一般情况下,熔融变形会引入较大的插入损耗。

CO2激光写制光栅时由于被照射一侧光能量较强,因此折射率改 变较大,而另一侧折射率变化较小,这样就会引起光纤横截面折射率 改变不均匀,故产生双折射,会引起透射光谱中有较大的偏振相关损 耗,可以通过双侧对称加热减小光纤横截面折射率改变不均匀的现 象。图2-5为CO2激光单侧入射后光纤横截面的能量分布。



图2-5CO2激光单侧入射后光纤横截面的能量分布

2.2 长周期光纤光栅耦合理论

耦合模理论是分析长周期光纤光栅光谱特性的重要工具,本节 只讨论 LPFG 中纤芯基模和一阶包层模间的耦合。假定制作 LPFG 过程中只有纤芯折射率被调制,并假定调制后的 LPFG 沿光纤轴向 的折射率调制函数为:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos(\frac{2\pi}{\Lambda} z)$$
(2.1)

n₀为纤芯基底的折射率, Δn为折射率调制深度。对于均匀光栅 其纤芯折射率的改变量可表示为:

$$\Delta n(z) = \overline{\Delta n}(z) \{1 + v \cos[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \Phi(z)]\}$$
(2.2)

v为条纹可见度;为光栅啁啾的附加相位(均匀光纤光栅);是平均 有效折射率变化。

弱导光纤中,横向耦合系数远大于纵向耦合系数,故可只考虑 横向耦合系数。由于此处的推导是基于均匀光纤光栅,故Φ(z)=0, 所以横向耦合系数*K*[']_k表达式(表示 j 阶和 k 阶模的横向模式耦合系 数)^[76]为:

$$K_{kj}' = \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right)\right] \frac{\omega \varepsilon_0 n_1}{2} \overline{\Delta n}(z) \iint_{co} \vec{e}_{kl(x,y)} \vec{e}_{jl(x,y)} dx dy$$
$$= \sigma_{kj}(z) \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right)\right]$$
$$= \sigma_{kj}(z) + 2k_{kj}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right)$$
(2.3)

其中σ_{kj}(z), k_{kj}(z)分别为两个模式间的直流和交流耦合系数,且 其表达式为:

$$\sigma_{kj}(z) = \frac{\omega \varepsilon_0 n_1}{2} \overline{\Delta n}(z) \iint_{c_0} \vec{e}_{kt(x,y)} \vec{e}_{jt(x,y)} dx dy$$

$$k_{kj}(z) = \frac{v}{2} \sigma_{kj}(z)$$
(2.4)

LPFG 的模式耦合方程通常表示作:

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + ikS(z)$$
(2.5)

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) + ik^*S(z) \qquad (2.6)$$

其中,R、S分别是基模、包层模的幅度大小, $\hat{\sigma}$ 和k分别是模式间的自耦合系数和交叉耦合系数,且 $\hat{\sigma} \equiv \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$

*δ*是一个与光栅 z 向无关的分量,即模式间的失谐量,表达式为:

$$\delta = \pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) \tag{2.7}$$

在失谐量为零时,LPFG的谐振波长满足相位匹配条件: $\lambda_{res} = (n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{eff})\Lambda$ (2.8)

其中*n*^{eff} 为纤芯有效折射率, *n*^{eff}_{cl,m}为 m 阶包层模有效折射率, Λ 为光栅周期。

设长周期光纤光栅的边界条件:在入射点z=0处纤芯基模的能量为R(0)=1,包层模的能量为S(0)=0,可知

$$R(z) = \cos(\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}z}) + j\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}}}\sin(\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}z})$$

$$S(z) = \frac{k}{\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}}}\sin(\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}z})$$
(2.9)

根据上式可得到光栅纤芯基模中已耦合及未耦合到包层模中的 能量比例,即交叉耦合率t_x和自耦合率t_{_}分别为:

$$t_{x} = \frac{\left|S(z)\right|^{2}}{\left|R(0)\right|^{2}} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{\sigma}^{2}}{k^{2}}} \sin^{2}\left(\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}z}\right)$$
(2.10)

$$t_{=} = \frac{|R(z)|^{2}}{|R(0)|^{2}} = \cos^{2}\left(\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}z}\right) + \frac{1}{1 + \frac{k^{2}}{\hat{\sigma}^{2}}}\sin^{2}\left(\sqrt{k^{2} + \hat{\sigma}^{2}z}\right) \quad (2.11)$$

根据耦合方程和边界条件可以得到光栅光栅的透射率和交叉耦 合率最大值为:

$$T = \cos^{2}(kL_{g}) + \frac{\Delta\beta_{L}^{2}}{4k^{2}}\sin^{2}(kL_{g})$$
 (2.12)

$$t_{\rm x,max} = \sin^2(\rm kL_g) \tag{2.13}$$

自耦合系数 $\sigma=0$ 时即交叉耦合率最大时的谐振波长为:

$$\lambda_{res} = \frac{1}{1 - (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \frac{\Lambda}{2\pi}} \lambda_D$$
(2.14)

由于折射率调制主要发生在纤芯其包层折射率调制很小,即 $\sigma_{11} >> \sigma_{22}$,忽略 σ_{22} ,且 $\sigma_{11} = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}}$,则谐振波长可简化为:

$$\lambda_{res} = (1 + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{\Delta n_{eff}})\lambda_D \qquad (2.15)$$

由此可知,在写制过程中谐振波长先出现在 λ_p 处,随 $\overline{\delta n}_{eff}$ 的增加谐振波长向长波方向漂移,故可知对于均匀 LPFG 其谐振波长由 λ_p 和 $\overline{\delta n}_{eff}$ 决定。对折射率调制绝大部分发生在纤芯的长周期光栅,其交叉耦合系数和自耦合系数分别表示为

$$k = \frac{\pi \overline{\delta n_{eff}}}{\lambda}$$
(2.16)

$$\hat{\sigma} = \pi \left(\frac{\Delta n_{eff} + \delta n_{eff}}{\lambda} - \frac{\Delta n_{eff}}{\lambda_D}\right)$$

$$kL \le \frac{\pi}{2}$$
(2.17)

可知长周期光纤光栅的带宽Δλ 为

$$\Delta \lambda = \frac{2N\sqrt{(\lambda_D + \Lambda \overline{\delta n_{eff}})^2 + \Lambda^2 \overline{\delta n_{eff}}^2 (1 - N^2)}}{N^2 - 1}$$
(2.18)

从以上讨论我们可得到当折射率调制较小时,随 δn_{eff} 增大带宽 变窄,边带效应明显。根据以上的分析,运用 Matlab 软件模拟了均 匀 LPFG 的 传输 谱, 假 设 基 模 与 包 层 模 有 效 折 射 率 差 是 $\Delta n_{eff} = n_{co} - n_{clad} = 0.0038$,光栅周期是 $\Lambda = 400 \mu m$,周期数是 N = 80,则 LPFG 的谐振波长 λ_p 在 1550nm 附近。 κL 值不同时 LPFG 传输谱如图 2-6 (a)所示,可以看到随着 κL 值的增加,基模能量 逐渐耦合到包层模中,当 $\kappa L = \pi/2$ 时,基模的能量全部耦合到包层 模中,此时谐振峰幅值最大;当 $\kappa L > \pi/2$ 时,模式过耦合,包层模 的能量又转移到基模,谐振峰幅值开始减小。在实际制备光栅过程 中,尽量控制 κL 值不超过 $\pi/2$,避免发生过耦合。LPFG 的透射谱 与有效折射率调制的关系如图 2-6(b)所示,随有效折射率调制 δn_{eff} 增加,LPFG 谐振峰波长逐渐向短波方向漂移,幅值慢慢增大,带 宽逐渐变窄,开始出现边带旁瓣。



图 2-6 (a) κL 值不同 (b) 有效折射率调制 δn_{eff} 改变时 LPFG 的传输谱

2.3 小结

本章节主要对长周期光纤光栅的制备方法如紫外写入法、物理 变形法、腐蚀刻槽法、飞秒激光写入法、高频 CO₂激光写入法这五 类进行了比较,每种方法都各有优缺点。CO₂激光制备 LPFG 引起 折射率变化机理比较复杂,本章对 CO₂激光制备 LPFG 形成机理进 行了理论分析,主要是玻璃密度变化、残余应力释放、物理变形。 运用耦合模理论分析了 LPFG 各模式的耦合,并用 Matlab 软件对 LPFG 的传输谱、有效折射率等进行了模拟计算。

第3章 光子晶体光纤长周期光栅

3.1 CO2 激光制备长周期光纤光栅

1998年 D.D.Davis 等人首次提出用 CO2激光制备 LPFG 的方法, 由于该方法灵活性高、成本低且无需载氢等优点,使其得到了广泛 的应用。随后,人们为了提高光栅制备效率和质量,提出了各种改 进 CO2激光装置的方法。最常用的装置是利用 CO2激光沿光纤轴向 逐点曝光制备 LPFG (即点对点技术),这种装置要求激光曝光与光 纤移动有较好的同步性,而且需要聚焦光斑与光纤严格准直,因此 光栅制备稳定性和重复性都较差。2003 年 Y.J.Rao 等人提出了高频 CO2激光脉冲二维扫描制备 LPFG 的装置,该装置脉冲能量较集中、 加热时间短,无需精密移动平台,因此可以有效提高 LPFG 制备效 率。但该装置是用计算机控制 CO2激光器的二维扫描振镜来完成周 期性加热,若多次扫描后曝光区域将偏离光栅区域,此外 CO2激光 的输出功率稳定性差,仅为±10%,这会导致不同周期的受热区域不 均匀,因此光栅制备精度和重复率不是很高。

本节基于上述基础上设计了一种优化改进的聚焦 CO2 激光二维 扫描制备 LPFG 系统^[77],可有效提高光栅制备稳定性和重复性,具 有制作简单,灵活操作、可靠性高等优点。实验装置示意图如图 3-1 (a)所示,该系统包括 CO2 激光器、光学聚焦系统、电子快门、 三维高精度移动平台、宽带光源、光谱分析仪以及控制计算机。所 用 CO2 激光器波长为 10.6µm,频率为 5kHz,最大输出功率为 10W, 功率稳定性为,通过改变脉冲占空比可以调节激光输出功率。为了 提高激光输出功率稳定性,在 CO2 激光器上加了一个闭环系统,可 将功率稳定性有效提高到。一个四倍扩束镜和一个焦距为 63.5mm 的硒化锌 ZNSE 透镜 (PO/CX)用来实现 CO2 激光光束聚焦。电子 快门用来控制激光光路的开关闭合,以实现对光纤的周期性曝光。 三维高精度移动平台采用 Newport 公司的电控平移台,X、Y 和 Z 轴分别对应着 Newport XMS50、VP-25X 和 GTS30V 三个精密位移 平台,其中 X 轴平台的最小步进位移可达 10nm,而重复定位精度 为 80nm。宽带光源(BBS, NKT Photonics SuperK Compact)和光 谱分析仪(OSA, YOKOGAWA AQ6370C)用来实时监测 LPFG 制 备过程透射谱的变化情况。

整个实验系统由计算机控制,运用 Labview 软件编程控制三维 位移平台及电子快门,以实现 LPFG 的制备。Labview 的软件操作 界面如图 3-1 (b)所示,当系统初始化后,可以单独控制 X、Y 和 Z 三轴位移平台和电子快门,即可以任意移动光纤位置及光路通断。 将光纤光栅的参数如光栅周期、周期数、扫描次数等,输入到操作 界面中,再点击"Write"按钮,该系统就会自动刻写 LPFG,在制 备过程中只要点击按钮"Pause"或"Stop"可以随时暂停或终止光 栅刻写,通过调节参数即可获得所需谐振波长或损耗峰幅值的光栅 光谱。因此该系统具有灵活性好、效率高及操作简单等优点。



图 3-1(a) CO2 激光二维扫描制备 LPFG 的装置示意图(b)控制软件的操作界面

利用上述 CO₂ 激光系统制备 LPFG,实验系统如图 3-2 所示, 其制备过程如下所述:首先将光子晶体光纤(PCF)两端用熔接机 与普通单模光纤熔接,将熔接后的光纤放置在三维移动平台上,其 中光纤一端用夹具固定,由于 CO₂ 激光加热过程会引起光纤拉伸或 微弯,因此在光纤另一端悬挂重物,以使光纤在 CO₂ 激光曝光时处 于水平绷直状态并在光纤轴向保持恒定的预应力,施加的预应力可 有效提高光纤光栅的制备效率。然后通过控制 Z 轴把光纤移动到 CO₂ 激光的焦平面,即 CO₂ 激光束经过扩束镜和聚焦透镜后聚焦到 光纤上,需要手动调节支架使激光焦点位置与光纤保持在同一平面 上,由于 CO₂ 激光作用于光纤上会有光散射出来形成亮斑,因此只 需调整光纤位置与激光能量使光纤最左端和最右端的亮斑一致即可
实现焦平面与光纤水平面准直,从而保证加热区激光聚焦光斑大小 及能量密度一致,提高 LPFG 制备质量。通过观测 CO,激光在光纤 表面诱导形成的熔融区域就可以测量聚焦后的光斑直径大小, CO2 激光多次扫描作用后在光纤单侧表面形成一个约为 30um 宽的刻 槽,因此聚焦光斑直径约为30µm,这是目前测量到的最小CO2激 光聚焦光斑。通过计算机控制,首先打开电子快门同时使光纤沿Y 轴即光纤径向移动一段距离, 使 CO2 激光光束扫描光纤一次, 形成 光栅的第一个周期,然后关闭电子快门使光纤沿-Y轴移动同样的距 离,即回到扫描前的位置:接着使光纤沿 X 轴即光纤轴向移动一个 光栅间隔,然后打开电子快门让 CO2 激光再次扫描光纤形成第二个 光栅周期,接着关闭快门把光纤移回扫描前位置,光纤每沿 X 方向 偏移一次就沿Y方向扫描一次,这个扫描与偏移的过程重复N次(N 是光栅的周期数),直至完成最后一个光栅周期。通常一次扫描不能 引起足够的折射率调制,因此上述从第一个光栅周期至最后一个光 栅周期的扫描过程常常要重复循环 K 次才能制备一个比较满意的 LPFG.



图 3-2 CO2 激光制备 LPFG 系统图

文献^[78]的制备方法中光纤是固定的,主要是利用高频 CO₂ 激光器的三维动态聚焦系统,通过控制 X 轴和 Y 轴的扫描振镜偏转来完成激光的周期性加热,由于 CO₂ 激光功率稳定性差且扫描振镜重复扫描精度低,使光纤受热区域不均匀多次扫描后焦斑重叠区域多,以致光纤光栅制备成功率低仅为 30%。而在此系统中,CO₂ 激光是固定不动的,主要是控制超精密二维平台移动使光纤沿 X 轴和 Y 轴

周期性偏移和扫描来制备LPFG,移动平台的最小步进位移为10nm, 且重复定位精度可达80nm,此外由于CO2激光器加了闭环系统其 功率稳定性可达到,而且CO2激光聚焦光斑质量好,调节光纤使其 始终处于激光束焦平面上,因而保证了光纤不同周期加热区域的光 斑大小及能量密度均匀一致,使重复曝光过程更加稳定,并且扫描 过程焦斑与加热区域可以精确重叠,所以可以通过多次扫描制备高 质量的LPFG。当然,只要合理设计光栅参数,并适当控制激光能 量及光纤扫描速度(即曝光时间),也可以实现一次扫描制备所需要 的高质量LPFG。通过多次实验表明,利用我们的CO2激光系统制 备LPFG的成功率较高几乎可达100%。

利用上述 CO₂ 激光系统首先在普通单模光纤(长飞单模光纤) 上刻写了四个相同周期数(N=30)但不同光栅周期的 LPFG,如图 3-3 所示,对应的光栅周期分别为 840、760、640、560µm 的 LPFG, 每个 LPFG 的谐振峰幅值都能达到 20dB 以上且插入损耗小于 0.5dB,在 1300-1700nm 波长范围内可以观察到每个光栅都有几个 谐振峰,不同谐振峰对应着纤芯基模耦合到不同的包层模式中。



实验中所用 PCF 为 NKT 公司拉制的大模场面积实芯光子晶体 光纤 (NKT ESM-12),整个空气孔区域成六边形排列结构,空气孔 直径为 3.3μm,孔与孔的间距为 7.4μm,纤芯直径为 10.4μm,包层 直径为 125μm。实验中利用有限元分析法研究了 NKT 公司生产的

大模场实芯 PCF 的模场分布,图 3-4(a)是 PCF 横截面的扫描电镜图, 光纤包层空气孔呈正六边形分布,纤芯为纯石英材料,纤芯周围有 六层空气孔,纤芯和包层直径分别为d_{co} = 10.4μm 和d_{cl} = 125μm, 空气孔的直径为d = 3.3μm,空气孔与空气孔的间距为Λ = 7.4μm。 根据 PCF 的结构参数在有限元分析法软件界面中画好简化几何模 型,如图 3-4(b)所示,假设石英折射率为n_{co} = 1.446,空气孔折射 率为n_{air} = 1.0,设好边界条件:光纤外包层区域引入 PML 边界条件, 而内包层设定为连续边界条件。对求解区域进行网络分格,即通过 节点和单元划分将光纤内区域划分成多干个互不干扰的子单元,如 图 3-4(c)所示,若对网格加密处理可提高模拟计算的精度,但对计 算机要求较高且耗时较长。



图 3-4 (a)PCF 横截面扫描电镜图(b)PCF 几何建模图形(c)网络分格时

PCF 横截面图

有限元分析软件模拟的入射波长为 1550nm 时 PCF 模场分布如 图 3-5 所示,其中图 3-5(a)是 PCF 的纤芯基模 LP_{ot}的模场分布,图 3-5(b)是 PCF 的高阶圆对称包层模 LP_{ot}的模场分布,图 3-5(c)是 PCF 的高阶非圆对称包层模 LP_u的模场分布,图 3-5(d)是 PCF 包层折射 率引起非对称调制时的高阶非圆对称包层模 LP_u的模场分布,其模 场能量向包层折射率未调制的一侧扩散,由于 CO₂ 激光制备的 PCF-LPFG 具有非对称折射率分布,所以会导致基模 LP_{ot}与高阶圆 非对称模发生耦合。



(a) LP_{01} (b) LP_{02} (c) LP_{11} (d) LP'_{11}

图 3-5 模拟计算的 PCF 模场分布

利用上述CO2激光系统在长飞单模光纤和PCF上制备了周期数 均为 30, 周期分别为 640um、500um 的 LPFG 和 PCF-LPFG。其中 在光子晶体光纤上制备长周期光纤光栅时首先用商业光纤熔接机 (FujikuraFSM-60) 在手动操作模式下将 PCF 一端与单模光纤熔接 上,熔接过程需要手动调整熔接参数(放电电流、放电时间及光纤 重叠区域)保证熔接处有一定的机械强度又防止 PCF 空气孔塌陷: 然后在距离熔接点约 5mm 处用精密切割刀将 PCF 平整切断,在显 微镜下观察熔接点处的 PCF 空气孔是否塌陷;最后再用同样的参数 将 PCF 的另一端熔上单模光纤。图 3-6(a)所示为 CO2 激光制备普通 LPFG 的过程,从图中可以明显看到随着扫描次数增加,光栅谐振 峰波长向短波方向漂移,损耗峰幅值逐渐增大,3dB带宽慢慢变窄。 经过7次循环扫描后,可以获得谐振波长为1547.8nm,谐振峰幅值 为-35.6dB, 插入损耗小于 0.3dB 的高质量 LPFG。透射谱的三个谐 振峰从左到右依序对应着纤芯基模与高阶包层模 LP12、LP13 和 LP14 的耦合。制备光子晶体长周期光纤光栅过程如图 3-6(b)所示,从图 中对比可以得出结论,在写制过程中随着扫描次数的增加谐振波长 是一个向长波方向微小漂移而谐振峰幅值逐渐增加的过程,经过11 次循环扫描后得到插入损耗低于 0.7dB, 两个光栅损耗峰 Dip21 和 Dip22的谐振波长和幅值分别对应着1507.1nm、-27.2dB和1371.5nm、 -4.3dB的透射谱。



图 3-6(a)LPFG 和(b)PCF-LPFG 随着循环扫描次数 K 增加传输谱的演变

用聚焦CO2激光在光子晶体光纤上制备长周期光纤光栅时由于 在制作过程中采用的是单侧CO2激光加热的方式,这样会导致光子 晶体光纤包层中空气孔出现塌陷和局部的玻璃结构发生改变。如图 3-7所示,在光子晶体光纤表面由于弹光效应就会引起基模和包层 模有效折射率的周期性调制,这样就形成了光子晶体光纤长周期光 栅。下面实验中所用光子晶体长周期光纤光栅样品的光栅周期为 500μm,周期数为30。同时我们在实验中利用该系统在普通单模光 纤上制作了光栅周期为 840μm,周期数为30的基于普通单模光纤 的长周期光纤光栅。对光子晶体长周期光纤光栅和普通 LPFG 的温 度、折射率、气压等传感特性进行了对比分析。



图 3-7 (a) 写入 LPFG 前(b) 写入后 PCF 的横截面图(c) CO₂ 激光制备的 LPFG 显微 图像

3.2 长周期光栅特性

3.2.1 温度响应特性

长周期光纤光栅模式耦合发生在同向传输的纤芯基模 LP₀₁ 和 包层模之间,其谐振条件可用式 λ^m_{res} = (n^{co}_{eff} – n^{c1,m}_{eff})Λ 表示,对其两边 对温度取微分,可得到谐振波长对温度的灵敏度为:

$$\frac{d\lambda_{res}^{m}}{dT} = \left(\frac{dn_{eff}^{co}}{dT} - \frac{dn_{eff}^{cl,m}}{dT}\right)\Lambda + \left(n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m}\right)\frac{d\Lambda}{dT}$$
(3.1)

其中 λ^m_{res} 是谐振波长, n^{co}_{eff} 和 n^{cl,m} 分别是基模和 m 次包层模有效折射 率, Λ 是光栅周期, T 是温度的变化。温度变化会引起热胀冷缩, 在这过程中光纤光栅周期变化为:

$$d\Lambda/dT = \alpha \cdot \Lambda \tag{3.2}$$

其中α为热膨胀系数。另外热光效应会引起纤芯基模和包层模的有 效折射率变化,分别为:

$$\frac{dn_{eff}^{co}}{dT} = \xi_{co} n_{eff}^{co}$$
(3.3)
$$\frac{dn_{eff}^{cl,m}}{dT} = \xi_{n} n_{eff}^{cl,m}$$
(3.4)

$$\frac{\ln_{eff}^{cl,m}}{dT} = \xi_{cl} n_{eff}^{cl,m}$$
(3.4)

其中纤芯和包层的热光系数分别为 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 。考虑到光纤的色散,上式(3.1)可表示为^[79-81]:

$$\frac{d\lambda_{res}^m}{dT} = \lambda_{res}^m \cdot \gamma^m \cdot (\alpha + \Gamma_T^m)$$
(3.5)

其中 γ'' 是光纤波导色散因子, Γ_{r}'' 是温度灵敏度因子,且定义为

$$\Gamma_T^m = \frac{\xi_{co} n_{eff}^{co} - \xi_{cl} n_{eff}^{cl,m}}{n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m}}$$
(3.6)

从上式可以看出,谐振波长的灵敏度与 γ^m 和 Γ_r^m 有关,而 γ^m 与 光栅周期A及包层模阶次 m有关, Γ_{temp}^m 与纤芯和包层的热光系数 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 有关。所以在实验中如果我们想得到对温度不敏感的 LPFG, 就该选择 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 相差较小的光纤,而要获得温度灵敏度高的就该选 择 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 相差较大的光纤。这样我们就可以根据各领域的需求来选 择热光系数相差大或小的光纤。 实验中测试研究了普通长周期光纤光栅(LPFG)和光子晶体光 纤长周期光栅(PCF-LPFG)的温度响应特性,所用温度测试装置 为精密数控温度烤箱(温度变化范围为室温~100°C,精度为 0.1°C)。 将 PCF-LPFG(LPFG)置于数控温度烤箱中,两端从烤箱开孔中伸 出分别用光纤夹具固定,以避免温度变化过程引起光栅微弯变形导 致测量误差,PCF-LPFG(LPFG)输入端、输出端分别接光源和光 谱分析仪(AQ6370C),其中光谱仪用来实时监测传输谱变化。温 度由数控温度箱设置,温度从室温 30℃开始以 10℃ 为步长逐渐升 温,每隔 10℃ 测量记录传输谱一次,直至温度到 100℃,每次记录 传输谱时需保持恒温 10 分钟,以使光谱稳定减小测量误差。

LPFG的实验结果如图 3-8 所示,其中(a)表示高阶模 LP₀₁从 30°C 升温到 100°C 过程的透射谱变化情况,可以发现 LPFG 谐振峰波长 随着温度的升高向长波方向漂移,而损耗峰幅值的变化非常微小, 并且降温时谐振波长往回漂移且基本上能恢复到初始波长位置,稳 定性和重复性较好(b)是 LPFG 不同阶次高阶模的谐振波长随温度变 化关系,可以看到谐振波长与温度基本呈线性变化关系,耦合高阶 模 LP₁₂、LP₁₃和LP₁₄的温度灵敏度分别为 55、62、79pm/°C,故 LPFG 的耦合模式阶次越高其温度灵敏度越大。

PCF-LPFG 的实验结果如图 3-9 所示,同样可以看到随着温度 升高谐振波长往长波方向漂移,但漂移幅度较小,其温度灵敏度仅 为 4pm/°C,并且线性度比 LPFG 差。也就是说该 PCF-LPFG 对温度 不敏感,这主要是由于纯硅 PCF 的空气孔结构使得纤芯热光系数和 包层的热光系数差异变小,因此使其谐振波长温度灵敏度非常小, 这有利于克服温度所带来的交叉敏感问题。



图 3-8 (a)LPFG 透射谱随温度的变化(b)不同阶次包层模的温度响应特性



3.2.2 折射率响应特性

对于制备好的光栅,外界环境没有热或者力的作用时,其光栅 的周期、折射率等参数不会发生改变,但如果外界环境折射率变化 时,光纤包层模有效折射率会随外界环境发生变化,进而引起基模 和包层模有效折射率之差也跟着变化,从而导致 LPFG 的谐振峰波 长和幅值变化。基模有效折射率与纤芯半径、纤芯和包层本身折射 率有关,而包层模有效折射率与包层半径、包层和外界折射率有关。 在相位匹配条件 $\lambda_{res}^{n} = (n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m})\Lambda$ 两端对折射率 n 取微分,并考虑 到光纤的色散问题,可得 LPFG 折射率响应灵敏度为:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dn_{sur}} = \lambda_{res} \cdot \gamma^m \cdot \Gamma_{sur}$$
(3.7)

$$\Gamma_{sur} = \frac{u_m^2 \lambda_{res}^3 n_{sur}}{8\pi r_{cl}^3 n_{cl} (n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m}) (n_{cl}^2 - n_{sur}^2)^{3/2}}$$
(3.8)

其中 γ^{m} 和 Γ_{sur} 分别是光纤波导色散因子以及折射率灵敏度因 子, r_{cl} 是包层的半径, n_{cl} 和 n_{sur} 分别是包层与外界的折射率。LPFG 的谐振峰波长和幅值随折射率变化大小与方向决定于 γ^{m} 和 Γ_{temp}^{m} 这两 参数,折射率灵敏度与模式阶次 m 紧密相关, m 越大则灵敏度越大。 当外界折射率小于包层折射率时, Γ_{sur} <0即谐振波长向短波方向漂; 当外界折射率大于包层折射率时, Γ_{sur} >0即谐振波长向长波方向漂; 当外界折射率接近包层折射率时, 包层模不再是离散导模而是变成 泄露模,从而使模式耦合强度变弱,模式阶次越高耦合越弱。

实验中测试研究了普通长周期光纤光栅(LPFG)和光子晶体光 纤长周期光栅(PCF-LPFG)的对外界环境折射率的响应特性。实验装 置如图 3-10(a)所示,首先使用光纤夹具将 PCF-LPFG(LPFG)两端固 定以保证测量过程光栅始终处于水平绷直状态,光纤输入端、输出 端分别与光源和光谱分析仪连接,光谱仪用来实时监测光谱变化。 将 PCF-LPFG(LPFG)固定好后,记录其在空气中稳定之后的光谱, 然后在一可升降小平台上放上玻璃载玻片再将平台慢慢靠近光纤下 方,将折射率匹配液滴在载玻片上浸没整个光栅区域以改变光栅的 外界折射率,同时观测其传输谱变化。更换折射率匹配液时需把载 玻片取出并用酒精清洗擦拭干净,再用酒精去除光栅表面的残余匹 配液使其光谱返回空气中的初始位置,等光谱稳定后再把载玻片放 到光纤下方滴加新的折射率匹配液,将 PCF-LPFG(LPFG)浸入到不 同折射率匹配液中的光谱记录下,就可以得到 PCF-LPFG(LPFG)对 外界折射率的响应灵敏度。图 3-10(b)为实验中所用到的折射率匹配 液。

对于 LPFG 测试了折射率匹配液从 1.0~1.70 范围内的 LPFG 传输谱的变化情况,实验结果如图 3-11 所示,可以发现当外界折射率 小于 1.4500 时,随着折射率增大损耗峰幅值变化不大,而谐振波长 向短波长方向非线性漂移,折射率越接近包层折射率(即 1.45 附近) 其谐振波长漂移越大,即 LPFG 对外界折射率变化越敏感。当外界 环境折射率为 1.4600 时, LPFG 光谱出现一个突变点,即谐振波长

和损耗峰幅值都急剧变化并变化达到最大值,包层模阶次越大其变 化越大,对于更高阶的模式耦合强度几乎消失。当外界环境折射率 大于1.4600时,随着折射率增大高阶模耦合强度慢慢加深,即损耗 峰幅值逐渐变大,但谐振波长漂移量非常小,即高于包层折射率的 外界环境变化对谐振波长影响很小。

对于 PCF-LPFG 测试了折射率匹配液从 1.4000 变化到 1.4560 过程中的光谱变化,如图 3-12 所示。我们可以观察到随着外界折射 率的增大其谐振波长向长波长方向漂移,其谐振波长呈指数漂移, 且其损耗峰的幅值变化没有规律性。



图 3-10(a)LPFG 的折射率实验装置示意图(b)折射率匹配液



图 3-11LPFG(a)透射谱随外界折射率变化(b)谐振峰波长和幅值与外界折射率的 关系



图 3-12PCF-LPFG(a)透射谱随外界折射率变化(b)谐振峰波长与外界

折射率的关系

3.2.3 轴向应变响应特性

对长周期光纤光栅施加轴向应变时会存在光弹效应,进而会导致包层和纤芯折射率的变化。LPFG的谐振波长轴向应力灵敏度可表示为:

$$\frac{d\lambda_{res}^{m}}{d\varepsilon} = \left(\frac{dn_{eff}^{co}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{eff}^{cl,m}}{d\varepsilon}\right)\Lambda + \left(n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m}\right)\frac{d\Lambda}{d\varepsilon}$$
(3.9)

考虑到光纤的色散问题,可得 LPFG 谐振波长轴向应力灵敏度为:

$$\frac{d\lambda_{res}^m}{d\varepsilon} = \lambda_{res}^m \cdot \gamma^m \cdot (1 + \Gamma_{\varepsilon}^m)$$
(3.10)

其中Γ, 为应变灵敏因子, 定义表达式为

$$\Gamma_{\varepsilon}^{m} = \frac{\eta_{co} n_{eff}^{co} - \eta_{cl} n_{eff}^{cl,m}}{n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m}}$$
(3.11)

其中η_{co}和η_{cl}为纤芯和包层的弹光系数。

实验中测试研究了普通长周期光纤光栅(LPFG)和光子晶体光 纤长周期光栅(PCF-LPFG)的轴向应变响应特性,实验装置如图 3-13 所示。首先使 LPFG(PCF-LPFG)处于自由水平直线状态,将其一端 粘贴在固定不动的平台上,另一端粘于精密位移平台上,移动精度 可达到 10μm,两平台初始距离为 *L* = 200*mm*,根据微应变公式 Δ*L* / *L*×10⁻⁶,可知平台每移动 10μm 对 LPFG 施加的轴向拉伸应力 为50με,每增加 200με 便观测传输谱并记录一次,实验结果如图 3-14(a)和(b)所示,随着轴向应变增加 LPFG 谐振波长向短波方向漂 移,其应变灵敏度较低仅为-0.35pm/με,而损耗峰幅值先减小后增 大,这可能是由于光栅初始状态时没有完全绷紧,存在微弯效应的 影响,当施加应力后引起折射率扰动,从而引起损耗峰幅值变化。

对 PCF-LPFG 的轴向应变特性进行实验研究,测试其在 0~1000με变化范围内的传输光谱响应情况,如图 3-15(a)是 PCF-LPFG 在轴向应变为 0、200、400、600、800 和 1000με时的传 输谱,可以看到随着轴向应变增大谐振波长往短波方向漂移且谐振 峰幅值的变化很小,但变化趋势与普通 LPFG 相反,是随着先增大 后减小。对谐振波长的实验数据点进行线性拟合得到 PCF-LPFG 谐 振波长的应变灵敏度为-3.5pm/με。PCF-LPFG 的灵敏度相对 LPFG 高出一个数量级。



图 3-14 (a)LPFG 透射谱随轴向应变的变化(b)LPFG 的谐振峰波长和幅值与轴向 应变的关系



3.2.4 弯曲响应特性

LPFG 被弯曲时,一方面使 LPFG 变成弯曲波导,另一方面使 LPFG 的被调制折射率横截面发生倾斜。弯曲后基模和包层模的有 效折射率差的表达式为:

$$n_{\rm eff}^{\rm co} - n_{\rm eff}^{\rm cl,m} = \Delta n_{\rm eff} + (\Delta n_{\rm eff}^{\rm co} - \Delta n_{\rm eff}^{\rm cl,m})$$
(3.12)

其中为弯曲之前基模和包层模的有效折射率差,该值恒定不变; 和为弯曲引起的两者有效折射率的变化。而和的符号和大小与模式 阶数和归一化频率有关,故随着曲率的增加,的值增大或减小都有 可能,故谐振波长可能向长波漂移也可能向短波方向漂移。

实验中采用坐标纸的方法测试了 PCF-LPFG 的弯曲响应特性, PCF-LPFG 两端分别接光源和光谱仪。每弯曲一次待光谱稳定或记 录一次光谱,得到测试结果如图 3-16 所示。由于实验中采用坐标纸 方法事先未计算好曲率,导致所取的曲率不是等步长均匀变化。但 从图中我们可以看到随着曲率变化的整个趋势。随着曲率的增加, PCF-LPFG 的谐振波长和幅值均发生变化,且规律性不大。主谐振 峰分裂成两个损耗峰,两个新峰先向短波长方向漂移,并且两个幅 值都在变化,当达到一定曲率时光栅损耗峰就消失了。这是因为光 纤轴向两边折射率由于弯曲作用会发生非对称性变化,因而光纤模 场分布也会相应变化并向外偏,导致包层模和基模的模场叠合因子 降低,弯曲越大模场失叠越严重,所以弯曲曲率达到一定程度后光 栅损耗峰会消失。



图 3-16 PCF-LPFG 传输谱随弯曲曲率增大的变化

3.2.5 气压特性

实验中对 PCF-LPFG 气压响应特性进行了测试。气压测试装置 如图 3-17(a)所示,首先将 PCF-LPFG 绷直粘贴在一硬铁片上,以防 气压变化过程引起光栅微弯变形所造成的测量误差,然后放进气压 室内并用 AB 胶将两端口密封起来,光纤输入输出端分别接宽带光 源 和 光 谱 分 析 仪 以 便 观 测 传 输 谱 变 化 ,利用 台 式 气 压 泵

(ConST-162, 气压变化范围为 0MPa~14Mpa, 调节精度为 10Pa) 向气压室内提供稳定气压,并用高精度压力表校验气压大小,使气 压测试过程气压室内气压大小保持稳定准确。3-17(b)是台式气压 泵及气压管的实物图。



图 3-17 (a)光栅气压测试装置示意图(b)台式气压泵及气压管实物图

气压测试实验从 0Mpa 开始,以 1Mpa 为步长逐渐升高气压直至 10Mpa,在每个气压点上恒压保持 10 分钟以保证气压室内气压均匀恒定,待光栅传输谱稳定后测量并记录一次,PCF-LPFG 的传输谱随气压的变化如图 3-18 所示,可以发现随着气压的增大,其谐振波长向长波长方向线性漂移,且谐振峰幅值逐渐减小,气压响应较快且稳定性和重复性都较好,气压降低时谐振峰基本能回复到原来位置。



图 3-18 气压从 0MPa 升到 10MPa 时 LPFG 传输谱的变化

图 3-19(a)PCF-LPFG 谐振波长随气压的变化关系,对数据点作 线性拟合,可以得出其谐振波长的气压响应灵敏度仅为 0.12nm/MPa。图 3-19(b)是其谐振峰幅值随气压的变化关系,对数据 点作线性拟合,可以看出随着气压增大 PCF-LPFG 的幅值缓慢减小 响应灵敏度仅为 0.25dB/MPa.



图 3-19 PCF-LPFG(a)谐振波长(b)谐振峰幅值随气压的变化

3.3 小结

本章设计并搭建了一套优化改进的 CO₂激光脉冲二维扫描制备 LPFG 的实验系统,该系统包含了功率稳定性较好的二氧化碳激光 器(输出功率起伏小于±2%)和超高精密的三维位移平台(重复定 位精度可达 80nm),这很大程度上提高了光栅制备的稳定性、重复 性和成功率。此外,通过 Labview 软件编程设计了平台控制程序, 只要在操作界面上输入光栅参数如光栅周期、周期数等,就可以自 动获得所需要的高质量光栅,而且还可集成到光纤拉丝塔中大批量 生产光栅,这具有广泛的商业价值及发展应用前景。

利用 CO₂ 激光实验系统在普通单模光纤和光子晶体光纤上制备 均匀 LPFG,系统研究了普通 LPFG 和 PCF-LPFG 的光谱特性和普 通 LPFG、PCF-LPFG 对温度、折射率、应变等外界环境因素变化的 传感响应特性,发现两者对外界传感特性有所区别。实验表明: PCF-LPFG 相对于普通 LPFG 其对温度不敏感灵敏度仅为 4pm/°C; 当外界折射率小于 1.46 时,随着折射率的增大两者的漂移方向相反; PCF-LPFG 轴向应变灵敏度比普通 LPFG 的应变灵敏度提高了一个 数量级,达到了-3.5pm/με; PCF-LPFG 的谐振波长和损耗峰幅值对 气压的灵敏度都较低,分别为 0.12nm/MPa、0.25dB/MPa。

第4章 高灵敏度 F-P 干涉仪

4.1 干涉型光纤传感器

光纤传感器就是通过测量光纤中传输光波特征参量(如谐振波 长、振幅、偏振态等)对外界环境(如温度、应变、气压等)的响 应变化,来实现对外界环境变量的测量。根据传感器的结构可分为 光纤光栅型、微弯型和干涉型。其中干涉型光纤型传感器有 MZI、 FPI、迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer)和 Sagnac 干涉仪。 其中 F-P 传感器是非常典型的干涉型传感器, F-P 传感器结构简单、 体积小、成本低、安装方便等特点,广泛应用在超声探测、磁场测 量、生物医学等领域。

4.1.1 几种典型的光纤干涉型传感器

(1) 马赫-曾德尔干涉型传感器

马赫-曾德尔干涉仪工作原理是经耦合器分出的两束光,一束光进入参考光纤,另外一束进入传感光纤,外界环境因素会使传感光纤的某些特征参量发生变化,两束光在另一端相遇时会产生干涉干涉进入探测器。MZI 传感器由于参考信号光纤不能埋入待测结构中,这样就会给实际使用带来了不便。2015年,H. Sun^[82]等人利用如图 4-1 所示的复合型结构布拉格光栅和多模光纤复合而成的 MZI,该MZI 传感器可用来同时测量温度和应力或温度和弯曲。



图 4-1 MZI(a)干涉仪原理图(b)纤芯偏移图

(2) 迈克尔逊干涉型光纤传感器

入射光进入光纤后被耦合器分成的两束强度相等的光束后分别 进入传感臂和参考臂中,再经各自端面的反射镜重新反射回光纤中 在耦合器的另一端发生干涉。2014年,深圳大学的Z.Y.Li^[83]等人采 用单模光纤(SMF)一细芯光纤(Thin core fiber, TCF)—单模光纤 (SMF)制作而成的 Michelson 干涉仪如图 4-2 所示,外界折射率 灵敏度在折射率为 1.440 和 1.500 时高达-208.24、-125.44dB/nm,温 度范围在 25~100°C 时其灵敏度只有 48pm/°C,该 Michelson 干涉仪 结构极小不到 2mm,并且有着高达 24dB 的消光比,可以应用于化 学和生物传感器中。



图 4-2 Michelson 干涉仪的(a)显微图片(b)原理图

(3) Sagnac 干涉型光纤传感器

Sagnac干涉仪传感器的工作原理是宽带光源发出的光经3dB耦合器分成两束强度相等的光,两束光分别沿顺时针方向和逆时钟方

向传播,经过环路之后再返回耦合器相遇时产生干涉。目前,基于 Sagnac 干涉仪而制作的水听器和光纤陀螺仪已成为军事、航天、航 海等多领域运用最多的干涉型传感器件。

(4) F-P 干涉型光纤传感器

在反射镜 R₁和 R₂之间往返多次的入射光反射形成的多光束干 涉输出,当 F-P 腔的腔长和腔内折射率改变时干涉谱会发生相应的 变化,如反射波长偏移、自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR) 等,测出干涉谱的变化即可得到外界环境因素的变化。2013年, Y.Wang等人基于简化空芯光子晶体光纤而提出的 F-P 传感器在室温 至 900℃ 温度范围下对温度不敏感,其灵敏度只有 0.273nm/℃。采 用飞秒微加工方式在 F-P 腔结构上制作的微通道可让 F-P 腔结构中 充满液体,故该 F-P 传感器可用作折射率传感器,且其温度交叉灵 敏度低。

4.1.2 光纤 F-P 干涉传感器的原理

两束光产生干涉的条件是两束光同频率、同振动方向和相位差 恒定。根据双光束干涉方程可知干涉强度 I 为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\frac{4\pi n_0 L}{\lambda} + \varphi_0)$$
(4.1)

其中L为腔长, φ_0 为初始相位, n_0 为腔体内的折射率。 当相位条件满足 $2m\pi$ 时,干涉强度最大,即

$$\frac{4\pi L}{\lambda_m} + \varphi_0 = (2m+1)\pi \tag{4.2}$$

其中m为整数。自由光谱范围(free spectral range,FSR)为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL} \tag{4.3}$$

则可得到 F-P 腔腔长 L 为

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \tag{4.4}$$

4.2 超高压强灵敏度的 F-P 干涉仪

4.2.1 F-P 腔的制作步骤

压力测量在工业和环境的健康监测中是重要参数之一。各种光 纤压力传感器也应用而生,如基于光子晶体光纤、基于光纤布拉格 光栅等,其灵敏度一般在10 pm/Mpa 数量级上。基于 F-P 结构的光 纤压力传感器通常在光纤末端使用弹性薄膜,如聚合物薄膜、SiO₂ 薄膜和石墨烯等,此种结果的 F-P 腔灵敏度依赖于所用薄膜的尺寸 大小和薄膜的机械质量。

该小节实验中所用单模光纤为康宁的 SMF-28e、郑州英诺高科 的内径/外径分别为 75/125µm 的熔融石英毛细管。采用熔接的方法 来制作 F-P 腔, 优点是操作简单, 成本低。制作方法为首先分别取 一段单模光纤和石英毛细管并剥掉涂覆层,用酒精擦拭干净后用光 纤切割刀切割,而后调节熔接机(日本藤仓 FS-60S)的熔接参数(如 放电电流、放电时间等) 对单模光纤和石英毛细管进行熔接, 再利 用精密切割刀 (Fujikura DT-30) 在距离熔接点约 10mm 处切去多余 的石英毛细管,保留预先设定的 F-P 腔长度。精密切割过程中,光 纤切割刀置于精密移动平台上(全方位移动),上方放置光学显微镜, 整套装置可以进行精确切割。将精密切割后的 F-P 腔的石英毛细管 端浸入液体中,此时由于毛细管效应会在单模光纤端面形成一个密 闭的空腔即 F-P 腔,其中空气-SMF 和空气-液体两个端面充当 F-P 腔的两个反射面。F-P 腔的结构示意图和显微图如图 4-3 所示,其 中(b)中石英毛细管长度为114µm, F-P 腔腔长为90µm。在压强为 1~10bar 范围内 F-P 腔内气体可以看作理想气体, 故满足理想气体 状态方程

$$PV = nRT \tag{4.5}$$

其中 P、V、T 分别为腔内气体的压强、体积和热力学温度, R 为理 想气体常数 R = 8.31 J·K⁻¹·mol⁻¹, n 表示气体物质的量。

腔内气体体积可用圆柱体体积公式来表示。对于常压下初始腔

长 L₀的 F-P 腔, 直径为石英毛细管的直径 D, 则腔内气体体积可表示为

$$V = \pi D^2 L/4 \tag{4.6}$$

等温变化时将式(4.6)带入式(4.5)计算后,可得到压强灵敏度公式为 $dL/dP = -P_0L_0/P^2$ (4.7)

其中L为外界压强为P时的腔长,P0为标准大气压,L0为初始腔长。 从式(4.7)可以得出结论: F-P腔的压强灵敏度(F-P腔腔长随外界压 强的变化)只与初始腔长和外界所施加的压强有关,与石英毛细管 的内径外径都无关。



图 4-3 可压缩 F-P 腔的(a)原理图和(b)显微图

4.2.2 实验结果测试和分析

实验中测试了 F-P 腔初始腔长分别为 44.7、96.8、142.2μm 的 光谱,对应的石英毛细管长度分别为 57、116、151μm。测试中采 用环形器,环形器三个端口分别接宽带光源(Fiber Lake ASE-LIGHT SOURCE)、光谱仪(YOKOGAWA AQ6370C)和 FPI 传感器,光谱 仪用来实时监测 FPI 光谱随外界环境的变化。实验中首先讨论了压 强灵敏度和初始腔长的关系,测试了常压下三个不同初始腔长 FPI 的干涉谱如图 4-4 所示。从图中可以发现,FPI 的干涉谱条纹可见 度均大于 15dB,并且随着初始腔长的增加而逐渐减小。但当初始腔 长大于 300μm 时条纹可见度急剧减小,小于 1dB,导致这种现象的 原因是初始腔长过大会引起光波在石英毛细管内传输时损耗增大和 水-空气界面的弯曲。



图 4-4 常压下不同初始腔长 F-P 腔的反射谱

为了探讨压强灵敏度和外界施加压强的关系,在实验中测试了 初始腔长 L₀=411µmF-P 腔的反射谱在外界压强分别为 1.5、3.0、 5.0bar 时反射谱的变化。图 4-5 所示为不同压强下的反射谱,从图 中可发现外界压强的增大可有效提高 FPI 条纹可见度。4-5(b)表示腔 长和自由光谱范围随压强的变化图。对不同压强下的腔长和自由光 谱范围进行了记录,拟合后得到压强在 1~1.5bar 范围时,平均压强 灵敏度高达 3.04µm/KPa,该灵敏度比目前为止基于膜片式的 F-P 传 感器的最高灵敏度至少高出两个数量级。实验中发现增大初始腔长 压强灵敏度会更高,所以同时测试了初始腔长为 1063µm 的 F-P 腔 随外界压强的变化,拟合后得到在 1.0~1.3 bar 时平均灵敏度为 6.9µm/KPa。压强范围在 9~10 bar 时平均压强灵敏度也可达到 161 nm/KPa。从拟合的曲线中可以看到自由光谱范围随外界压强时 线性变化的,但腔长与外界压强的变化是非线性变化关系。其中对 于初始腔长为 411µm 的 F-P 腔,自由光谱范围随压强变化的灵敏度 为 2.26nm/bar。



光谱范围变化图

根据式(4.3)和式(4.7)可推导得到,自由光谱范围随外界压强变化的 灵敏度可表示为

$$d(\text{FSR})/dP = \lambda^2 / (2P_0 L_0) \tag{4.8}$$

在初始腔长和压强确定时,压强灵敏度只与所选定监测的波长 有关。由(4.8)式可以算出 L₀=411μm, P₀=1bar 时灵敏度为 2.92nm/bar,与实验中得到的 2.26nm/bar 能够很好的吻合。由式(4.2) 和式 (4.5) 得到波长漂移随压强变化的灵敏度为:

$$d\lambda/dP = -\lambda/P \tag{4.9}$$

从上式可知波长漂移随压强变化的灵敏度与腔长无关。故常压下不管初始腔长多大,只要选定波长在1550nm附近,其灵敏度都为-15.5nm/kPa。实验中测定了压强在0kPa~4kPa时波长漂移随压强的变化,其中反射谱中选取的均为干涉谷波长在1550nm附近,结果如图 4-6 所示。经过拟合后得到在1550nm 波长附近灵敏度范围在-15.63nm/kPa~-22.82nm/kPa,比理论值稍大一点,这可能是因为在单模光纤和石英毛细管熔接时熔点处有部分塌陷且空气-水界面的弯曲,这两个因素引起腔内的气体体积满足圆锥体积,而不是圆柱体的体积。



图 4-6 Lo=113.3µm F-P 腔在 1500nm 附近波谷处波长随压强的变化图

4.3 高温度灵敏度 F-P 干涉仪

4.3.1 F-P 腔的制作步骤

实验中用为康宁的单模光纤 SMF-28e、郑州英诺高科的内径/ 外径分别为 75/125μm 的熔融石英毛细管。其制作步骤首先利用注 射器将水银注入石英毛细管内;单模光纤 SMF-28e 和石英毛细管剥 掉涂覆层并用酒精擦拭干净后用切割刀切割,并保证其端面干净; 采用熔接机(FS-60S)将注有水银的石英毛细管两端熔上单模光纤 SMF-28e。其中在石英毛细管另外一端熔上单模光纤 SMF-28e 时需 采用精密切割刀在距离熔接点大约 6.5mm 处对石英毛细管进行切 割,该切割步骤在光学显微镜下其切割精度可小于 5μm。在注入水 银过程中,石英毛细管两端都会有一段空气区域形成,在实验中将 较短的空气区域当作 F-P 腔,则空气-SMF 和空气-水银充当 F-P 腔 的两个反射面, F-P 腔结构的原理图如图 4-7 所示。



图 4-7 F-P 腔结构原理图

4.3.2 实验测试和结果分析

实验中对初始腔长为 120µmF-P 腔的温度响应特性进行了测 试。实验中使用精密数控温度烤箱(温度变化范围为室温~100℃, 精度为 0.1°C), 如图 4-8(a)所示。将 F-P 腔结构置于数控温度烤箱 中,两端从烤箱开孔中伸出分别用光纤夹具固定,以避免温度变化 过程引起光栅微弯变形导致测量误差。测量过程中环形器三个端口 分别接宽带光源、光谱仪和 F-P 传感器。温度由数控温度箱设置, 测试过程中以 0.1℃ 为步长逐渐降温,每隔 0.1℃ 记录一次光谱, 每次测量反射谱时需保持恒温 10 分钟以使光谱稳定减小测量误差。 图 4-8(b)所示为温度范围在 40.0~39.0°C 内反射谱的变化图,可以发 现温度升高时反射谱中的波谷向短波方向漂移。同时,对温度范围 在 40.0~39.0°C 和 50.0~49.0°C 的光谱进行了分析, 对其波谷偏移进 行线性拟合后得到如图 4-9 所示,其灵敏度分别为 -14.4 nm/°C、 -21.3 nm/°C。在实验中得到最大灵敏度可达 23.4 nm/°C, 而且发现 当温度超过 80℃ 后, 其反射谱便不再像室温时稳定。其中 44~45℃ 和 54~55°C 时的灵敏度分别为 15.5 nm/°C、20.0 nm/°C。从上述实 验结果中可以发现不同温度范围下拟合得到的灵敏度数值均不同, 即灵敏度不再是一个常数,而是一个变化的值,且其温度灵敏度值 都很高。



图 4-8 (a)温度测试实物装置图(b)温度范围在 39.0~40.0°C 反射谱

随温度的变化图



图 4-9 不同温度范围下的温度灵敏度(a)39~40°C(b)49~50°C

引起不同温度范围下不同温度灵敏度值的原因可能是外界温度 变化时石英毛细管内注入的水银不是均匀变化的。为了验证上述推 论,我们对数据进行了进一步分析。由于水银和石英毛细管是不浸 润的,两者接触时接触角大于 90°C,即水银和空气接触形成的界面 是个凸弧形。当外界温度发生变化时,F-P 腔腔长的变化主要是由 水银的膨胀引起的。20°C 时水银的体膨胀系数为 1.8×10⁴/℃。注入 石英毛细管内汞的体积可用圆柱体的体积公式来计算,其中汞的长 度为 6.26mm,则汞的体积可表示为 V=πD²L/4,根据水银体膨胀系 数公式可知

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V \Delta T} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} \cdot \Delta L}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot L_{mercury} \cdot \Delta T} = \frac{\Delta L}{L_{mercury} \cdot \Delta T}$$
(4.10)

其中 ΔL 为水银长度变化量,即对应的 F-P 腔腔长变化量, ΔT 为温

度的变化量。从而可以得到腔长随温度变化的值即温度灵敏度为

$$\frac{dL}{dT} = L_{mercury} \cdot \gamma \tag{4.11}$$

实验中通过自由光谱范围公式可得到对应温度下的腔长,对腔 长随温度的变化进行拟合后发现温度范围在 39~40°C 和 49~50°C 时 其灵敏度分别为-2.46、-4.03nm/°C,如图 4-10 所示。从图中也可发 现相同温度间隔下腔长变化值不同,即 F-P 腔腔长随温度变化并不 是均匀变化的。通过式(4.11)即可算得在两个温度范围下水银的体膨 胀系数分别为 4.0×10⁻⁴/°C 和 6.5×10⁻⁴/°C,这说明水银体膨胀系数是 随着温度变化而变化的,即石英毛细管内注入的汞随温度变化并不 是均匀变化的。



4-10 不同温度范围腔长随温度的变化

4.4 小结

本章中高压强灵敏度和高温度灵敏度两种 F-P 腔结构均采用单 模光纤和石英毛细管制作而成,制作方法简单。其中高压强灵敏度 是利用石英毛细管浸入液体中的毛细管效应在单模光纤端面形成的 密闭的空腔而作为 F-P 腔。该 F-P 腔的特点是可压缩并且其灵敏度 极高,比基于膜片的光纤 F-P 传感器压强灵敏度至少高一个量级。 常压下压强灵敏度大于 1000nm/kPa,有望用于水听器、液位监控等 方面。但该结构也存在不足,如所形成的密闭空腔即 F-P 腔稳定性 不高,而且当 F-P 腔腔长过长时条纹对比度小于 1dB。高温度灵敏 度 F-P 腔结构是利用向石英毛细管中注入水银过程中形成的部分空 气区域来充当 F-P 腔腔体。实验中发现其温度灵敏度最高可达 23.4 nm/°C,但灵敏度在不同温度范围下不同,形成这个现象的原因可 能是因为汞的体膨胀系数随温度变化而变化,而不是一个固定值。 该 F-P 腔结构的特点是温度灵敏度高,存在的不足是当温度达到 80°C 时,其光谱则不再稳定。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本论文首先介绍了光子晶体光纤长周期光栅的研究现状,并对 其应用进行了简要的介绍;然后介绍了制备 LPFG 的几种方法并对 CO₂激光制备 LPFG 的形成机理、耦合模理论进行了系统分析,并 用 Maltab 对 LPFG 的传输谱进行了模拟仿真;最后搭建了一套改进 的 CO₂激光制备 LPFG 的系统,并用该系统在单模光纤和光子晶体 光纤上制备 LPFG,对其传感特性进行了比较,如外界温度,折射 率变化,轴向应变等;最后对硕士研究生阶段所做的法布里珀罗相 关工作进行了总结和分析。总结全文主要分为以下几部分:

1、对目前制备 LPFG 的方法进行了介绍并指出其优缺点,对 CO₂激光制备 LPFG 引起光纤射率变化的机理从残余应力释放、玻 璃致密化、物理变形这三个方面进行阐述。用耦合模理论分析了 LPFG 的传输谱特性并用 Matlab 软件对 LPFG 的传输谱进行仿真计 算。

2、搭建了一套改进的 CO₂ 激光脉冲二维扫描制备 LPFG 的实验装置,主要包括搭建 CO₂ 激光光路系统,并对该装置进行了优化,有效提高了光栅制备稳定性、重复性和成功率。利用该实验装置在单模光纤和光子晶体光纤上成功制备 LPFG,并研究了两者对温度、应变、折射率等外界环境因素变化的传感响应特性。

3、FPI 传感器因其结构简单、高可靠性、高灵敏度等特点成为 光纤传感应用的热点之一,受到广泛关注。除了上述工作以外,还 做了光纤 F-P (Farby-Perot)干涉仪相关方面的工作。利用单模光纤 和石英毛细管制作了两种不同结构的 F-P 腔。高压强灵敏度的 F-P 腔在常压下其灵敏度可大于 1000nm/kPa,高温度灵敏度的 F-P 腔的 最高温度灵敏度可达 23.4nm/°C,并对两者的相关特性进行了分析。

5.2 展望

在总结本文工作的基础上,对本研究内容存在的不足和今后的 工作进行了如下概括:

1、CO₂激光制备 LPFG 和 PCF-LPFG 传输谱相关特性,如光栅 光谱变化、相位匹配曲线、谐振峰模场分布等方面的理论工作还有 待进一步深入研究发掘。对于 LPFG 和 PCF-LPFG 两者对外界环境 的不同响应特性的分析方面理论知识有待加强。

2、CO₂激光制备 LPFG 适用于多种类型的光纤,可以尝试在其他类型光纤上写制 LPFG。且 PCF-LPFG 对外界环境变化的灵敏度都比较低,可以采取其他方式提高其灵敏度。

3、光子晶体光纤的空气孔为气体、液体等提供了通道,可以进 一步研究其生化传感应用。

参考文献

- [1]K.O.Hill,*et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguide:application to reflection filter fabrication[J]. ApplPhysLett. 1978,32(10):647-649.
- [2]Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method Optics Letters. 1989, 14(15):823-825.
- [3]K.O.Hill. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV expose through a phase mask[J]. Appl PhysLett. 1993,62(10): 1035-1037.
- [4]Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B., *et al.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology. 1996, 14(1): 58-65.
- [5]Bhatia V., DAlberto T., Murphy K. A., et al. Optical fiber long-period grating sensors[J]. OFS-11, 1996, 360-363 vol.361.
- [6]RaoY.J. In-fiber Bragg grating sensors[J]. MeasSciTechnol. 1997.
- [7]Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology. 1997, 15(8):1442-1463.
- [8]Humbert G., Malki A. Temperature characterization of long-period fiber gratings fabricated with electric arc discharge[J]. Optical Fiber and Planar Waveguide Technology; 2001, p.176-183.
- [9]Liu Y., Zhang L., et al. Bend sensing by measuring the resonance splitting of long-period fiber gratings[J]. Optics Communications. 2001, 193(1-6): 69-72.
- [10]Wang Y.P., Rao Y.J., Hu A.Z., et al. A novel Long-Period Fiber Grating Torsion Sensor[J]. Acta Optica Sinica. 2002, 22(9):1096-1099.
- [11]Tong Z., Wei H., Wang M., et al. Effect of Change of Ambient Refractive Index on Characteristics of Long-Period Fiber Gratings[J]. Acta Optica Sinica. 2002; 22(9): 1088-1091.
- [12]Su X.W., Dexiu H. Highly sensitive chemical sensor based on the

measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100-mmperiod fiber grating[J]. Optics Communications. 1999, 171(1-3):65-69.

- [13]Su X.W., Xuemei Z., Qinglin W., et al. Dual resonant peaks of LP₀₁
 cladding mode in long-period gratings[J]. Electronics Letters. 1999, 35(8):
 649-651.
- [14]Bhatia V., Burford M.K., Zabaronick N., et al. Strain and refractive index sensors using temperature-insensitive long-period gratings[J]. OFS-11 . 1996: 2-5 vol.2.
- [15]Luo S.F., Liu Y.C., et al. Applications of LPG fiber optical sensors for relative humidity and chemical warfare agents monitoring. Advanced Sensor Systems and Applications[J]. 2002
- [16]Joo Hin C., Ping S., et al. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer[J]. Optics Communications. 2004, 229(1-6): 65-69.
- [17]Falciai R., Mignani A.G., Vannini A. Long period gratings as solution concentration sensors[J]. Sensors and Actuators B-Chemical. 2001, 74(1-3): 74-77.
- [18]Yan W., Dakai L., et al. Fiber grating sensor for measurement of solution refractive index and concentration[J]. Transducer and Microsystem Technology. 2007, 26(7):24-26
- [19]Wang Y.P., Rao Y.J., Ran Z.L., et al. Bend-insensitive long-period fiber grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering. 2004, 41(1):233-239.
- [20]Sohn I.B., Lee N.K., Kwon H.W., et al. Tunable gain-flattening filter using microbending long-period fiber gratings[J]. Optical Engineering. 2002, 41(7):1465-1466.
- [21]Starodubov D.S., Grubsky V., Feinberg J. All-fiber bandpass filter using cladding-mode coupling[J]. 1998.
- [22]Lam P.K., Stevenson A.J., Love J.D. Bandpass spectra of evanescent couplers with long period gratings[J]. Electronics Letters. 2000, 36(11): 967-969.
- [23]Su C.D., Wang L.A. Multiwavelength fibre source by using long period

fibre gratings in superfluorescent fibre source[J]. Electronics Letters. 1999, 35(11): 927-929.

- [24]WangY.P., Wang D.N., et al. In-fiber polarizer based on a long-period fiber grating written on photonic crystal fiber[J]. Optics Letters. 2007, 32(9): 1035-1037.
- [26]Liu Y., Chiang K.S., Rao Y.J., et al. Light coupling between two parallel CO₂-laserwritten long-period fiber gratings[J]. Opt Express. 2007, 15(26):17645-17651.
- [27]Khaliq S., James S.W., Tatam R.P. Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor[J]. Measurement Science & Technology. 2002, 13(5):792-795.
- [28]Rindorf L., Jensen J.B., et al. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing[J]. Opt Express. 2006, 14(18):8224-8231.
- [29]Nielsen M.D., Folkenberg J.R., et al. Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers[J]. Optics Express. 2004, 12(3).
- [30]Hu M.L., Wang C.Y., Chai L., et al. Frequency-tunable anti-Stokes line emission by eigenmodes of a birefringent microstructure fiber[J]. Optics Express. 2004, 12(9):1932-1937.
- [31]Kerbage C., Steinvurzel P., Reyes P., et al. Highly tunable birefringent microstructured optical fiber[J]. Optics Letters. 2002, 27(10):842-844.
- [32]Kerbage C., Steinvurzel P., *et al.* Microstructured optical fibre with tunable birefringence[J]. Electronics Letters. 2002, 38(7):310-312.
- [33]Groothoff N., Canning J., et al. Bragg gratings in air-silica structured fibers[J].Optics Letters. 2003, 28(4):233-235.
- [34]Frazao O., Carvalho J.P., et al. Discrimination of strain and temperature using Bragg gratings in microstructured and standard optical fibres[J]. Measurement Science & Technology. 2005, 16(10):2109-2113.
- [35]Saitoh K., Florous N.J., Koshiba M., et al. Design of narrow band-pass filters based on the resonant-tunneling phenomenon in multi-core photonic crystal fibers[J]. Optics Express. 2005,13(25).

- [36]Dong X., Shum P. Temperature-insensitive strain sensor with polarizationmaintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. Applied Physics Letters. 2007, 90(15).
- [37]Fu H.Y., Shao L.Y., et al. Pressure sensor realized with polarizationmaintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. Applied Optics. 2008, 47(15):2835-2839.
- [38]Shi Q., Wang Z., Jin L., et al. A hollow-core photonic crystal fiber cavity based multiplexed Fabry-Perot interferometric strain sensor system[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2008, 20(13-16):1329-1331.
- [39]Qing S., Fuyun L., Zhi W., et al. Environmentally stableFabry-Perot-type strain sensor based on hollow-core photonic bandgapfiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2008, 20(4):237-239.
- [40]Hoo Y.L., JinW., et al. Evanescent-wave gas sensing using microstructure fiber[J]. Optical Engineering. 2002, 41(1):8-9.
- [41]Pickrell G., Peng W., Wang A. Random-hole optical fiber evanescentwave gas sensing[J]. Optics Letters. 2004, 29(13):1476-1478.
- [42]Bise R. T., Windeler R. S., Kranz K. S., et al. Tunable photonic band gap fiber; 2002.
- [43]Eggleton B.J., Westbrook P.S., et al. Cladding-mode-resonances in airsilica microstructure optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology. 2000, 18(8):1084-1100.
- [44]Lim J.H., Lee K.S., Kim J.C., et al. Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure[J]. Optics Letters. 2004, 29(4):331-333.
- [45]WangY.P., Wang D. N., et al. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. Optics Letters. 2006, 31(23):3414-3416.
- [46]Donlagic D., Cibula E. All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO₂ diaphragm[J]. Optics Letters. 2005, 30(16):2071-2073.
- [47]Guo F., Han M., et al. High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver

diaphragm[J]. Optics Letters. 2012, 37(9):1505-1507.

- [48]Ma J., Jin W., *et al.* High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm[J]. Optics Letters. 2012, 37(13):2493-2495.
- [49]Ruan Z.L, Rao Y.J, Deng H.Y, et al. Miniature in-line photonic-crystalfiber etalon fabricated by 157 nm laser micromachining[J]. Proceedings of the SPIE. 2008, 7004: 70041E-70041-70044.
- [50]Wang W., Pang F., Chen N., et al. Fiber-Optic Intrinsic Fabry-Perot Temperature Sensor Fabricated by Femtosecond Lasers. Optical Sensors and Biophotonics Ii, 2011.
- [51]Murphy K. A., Gunther M. F., Vengsarkar A. M., et al.Quadrature phase-shifted extrinsic Farby-Perot optical fiber sensors[J]. Optics Letters. 1991, 16(4): 273-275.
- [52]Man-Yong C., Hahngue M. Strain measurement using fiber optic total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor with a digital signal processing algorithm[J]. Sensors and Actuators A (Physical). 2004, A112(1):10-17.
- [53]Rao Y.J., Deng M., et al. In-Line Fabry-Perot Etalons Based on Hollow-CorePhotonic Bandgap Fibers for High-Temperature Applications[J]. Journal of Lightwave Technology. 2009, 27(19):4360-4365.
- [54]Wu C., Fu H.Y., et al. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. Optics Letters. 2011, 36(3): 412-414.
- [55] Wang D.H., Wang S.J., et al. In-line silica capillary tube all-silica fiberoptic Fabry-Perot interferometric sensor for detecting high intensity focused ultrasound fields[J]. Optics Letters. 2012, 37(11):2046-2048.
- [56]Patrick H. J., Askins C. G., et al. Amplitude mask patterned on an excimer laser mirror for high intensity writing of long period fibre gratings[J]. Electronics Letters. 1997, 33(13):1167-1168.
- [57]Su X.W., Lin Z., et al. Fabrication and characterisation of ultra-longperiod fibre gratings[J]. Optics Communications. 2002, 203(3-6):277-281.
- [58] Chen K.P., Herman P.R., Zhang J., et al. Fabrication of strong

long-period gratings in hydrogen-free fibers with 157-nm F₂-laser radiation[J]. Optics Letters. 2001, 26(11):771-773.

- [59]Lin C.Y., Wang L.A., et al. Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure[J]. Electronics Letters. 1999, 35(21): 1872-1873.
- [60]Lin C.Y., Wang L.A. A wavelengthand loss-tunable band-rejection filter based on corrugated long-period fiber grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2001, 13(4):332-334.
- [61]Chunn-Yenn L.,*et al*.Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors[J]. Journal of Lightwave Technology. 2001, 19(8): 1159-1168.
- [62]Yan J., Qun L., et al. A novel strain-induced thermally tuned long-period fiber grating fabricated on a periodic corrugated silicon fixture[J]. IEEEPh otonics Technology Letters. 2002, 14(7):941-943.
- [63]Lin C.H., Li Q., et al. A loss tunable long-period fiber gratings on corrugated silicon with on-chip microheater and temperature sensor, 2002.
- [64]Enboa W., Rou-Ching Y., et al. A highly efficient thermally controlled loss-tunable long-period fiber grating on corrugated metal substrate[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2005, 17(3):612-614.
- [65]Palai P., Das M., et al. Characterization and simulation of long period gratings fabricated using electric discharge[J]. Optics Communications. 2001,93(1-6):181-185.
- [66]Kondo Y., Nouchi K., Mitsuyu T., et al. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. Optics Letters. 1999; 24(10): 646-648.
- [67]Fujii T., Fukuda T., et al. Characteristics improvement of long-period fiber gratings fabricated by femtosecond laser pulses using novel positioning technique[J]. Optical Fiber Communication Conference,2004
- [68]Wang Y., Wang D.N., Yang M.W., et al. Asymmetric microholestructured long-period fiber gratings[J]. Sensors and Actuators: B Chemical. 2011,160(1):822-825.
[69] Wang D.N., Wang Y., et al. US2011135245-A1:US8160412-B2.

- [70]Liu Y.,Lee H.W., et al. Glass Structure Changes in CO₂-Laser Writing of Long-Period Fiber Gratings in Boron-Doped Single-Mode Fibers[J]. Journal of Lightwave Technology. 2009, 27(7):857-863.
- [71]Kim B. H., Ahn T. J., Park Y., et al. Measurement of refractive index change due to CO₂ laser irradiation using an LPG pair in optical fibers. Optical Fiber and Planar Waveguide Technology. 2001,286-295.
- [72]Park Y., et al. Residual stresses in a doubly clad fiber with depressed inner cladding[J]. Journal of Lightwave Technology.1999,17(10):1823-1834.
- [73]Kim B. H., Park Y. et al. Residual stress relaxation in the core of optical fiber by CO₂ laser irradiation[J]. Optics Letters. 2001,26(21): 1657-1659.
- [74]Han Y.G., Park H.S., Han W.T., et al. Temperature stability and mechanical strength of long-period fiber gratings fabricated with CO₂ laser,2000
- [75]Park Y., Ahn T. J., *et al.* Novel technique for measuring theresidual stress and the photoelastic effect profile of an optical fiber. 2001
- [76]Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology. 1997,15(8):1277-1294.
- [77]Zhong X.Y., Wang Y.P., Liao C.R., et al. Long Period Fiber Gratings Inscribed With an Improved Two-Dimensional Scanning Technique[J]. IEEE Photonics Journal. 2014,6(4).
- [78]Rao Y.J., Wang Y.P., Ran Z.L., et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. Journal of Lightwave Technology. 2003, 21(5):1320-1327.
- [79]Su X.W., Lin Z., Bennion I. Sensitivity characteristics near the dispersion turning points of long-period fiber gratings in B/Ge codoped fiber[J]. Optics Letters. 2001,26(22):1755-1757.
- [80]Su X.W., Allsop T., et al. Room-temperature operation of widely tunable loss filter[J]. Electronics Letters. 2001,37(4):216-218.
- [81]Su X.W., Allsop T., et al. High-temperature sensitivity of long-period

gratings in B-Ge codoped fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2001, 13(8):818-820.

- [82]Sun H., Yang S., Zhang X., et al. Simultaneous measurement of temperature and strain or temperature and curvature based on an optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Communications. 2015,340: 39-43.
- [83]Li Z.Y., Wang Y.P., Liao C.R., *et al.* Temperature-insensitive refractive index sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. Sensors and Actuators B: Chemical. 2014; 199: 31-35.

攻读硕士期间已发表论文

付彩玲,夏巨江.超高压力灵敏度的光纤微型 F-P 腔[J].电子测试, 2015,5

致谢

硕士三年,转瞬即逝。在即将毕业之时,既有深深的感谢之意 也有留恋和不舍。真心感谢在硕士三年学习期间,每个帮助我、关 心我、支持我的人们。

在此特别要感谢我的导师王英老师!在过去的三年研究生生活 中,王老师在学习和工作等各方面都给予了我无微不至的关心与指 导。王老师为人随和,总是一副乐呵呵的样子,在研究生三年里, 他亦师亦友。作为我的导师,他让我见识到了科研的魅力,也让我 感受到了学者教授的大家风范。作为朋友,他与我年纪相差不大, 总是可以和他推心置腹的谈论我学习和生活中的困惑。特别感谢王 老师在研三时将我派到深圳大学学习,让我认识到了我和别人的差 距,见识到了怎样的状态才是硕士研究生该有的。在此向王老师致 以深深的谢意。感谢在深圳大学学习期间王义平老师和廖常锐老师 给予我学习和生活上的帮助,廖老师总是在我想偷懒的时候 push 我。

感谢武汉工程大学理学院的各位老师,特别要感谢于文兵老师、 郝向英老师,他们在我无助和彷徨时总是开导我、指引我、鼓励我。 感谢何志聪、周卓洋等 12 级兄弟姐妹们,谢谢你们这三年来对我的 包容与帮助!特别感谢深圳大学钟晓勇同学对我论文的软件编程和 实验指导,感谢师弟夏巨江对我论文的帮助,感谢理学院师弟师妹 们平时给予我的所有帮助,谢谢你们!感谢理学院各位领导和老师 在我读研期间给予我的帮助。

感谢家人一直以来对我学业的支持,是他们无私的爱陪我走到 现在。感谢我的朋友,感谢他在背后的默默付出,感谢他的支持和 鼓励帮助我应对了各种困难,感谢他为我创造继续深造的条件。

最后向在百忙之中审阅论文及参加硕士论文答辩的专家和老师 们表示最诚挚的感谢!

67