

学校编码: 10384  
学号: 22420051403216

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

新型光纤光栅技术及其在光通信与  
光纤传感方面应用的研究

Investigation on the Novel Technology of the Fiber Bragg  
Gratings and Applications in Optical Fiber Communications  
and Sensors

周 金 龙

指导教师姓名: 董 小 鹏 教授

专业名称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2008 年 4 月

论文答辩时间: 2008 年 5 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。  
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（），在      年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期：      年    月    日

导师签名：

日期：      年    月    日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

光纤光栅已经成为当前最具发展前途,最具代表性的光无源器件之一,在光通信与光传感领域都得到了广泛的应用。D形光纤光栅与基于光纤光栅的法珀结构是其中两种比较新型的技术,它们各自具有独特的性质,可以实际应用在许多场合,因此,研究它们具有重要的理论和实际意义。

本文主要的研究工作体现在三个方面:

一、光纤光栅波长解调技术及其应用的研究。研究了基于边沿滤波器及可调谐法珀滤波器的两种光栅波长解调技术,实验得到的波长分辨率分别为 3.1pm 和 3pm。并且将这两种解调技术相结合,实际应用于桥梁结构健康监测。

二、D形光纤光栅的弯曲敏感特性及其应用的研究。用材料力学理论详细分析了D形光纤光栅的弯曲敏感机理。实验测得其弯曲灵敏度比圆对称的常规光栅分别高 78 倍(压缩光栅)及 86 倍(拉伸光栅)之多。将其应用在线位移及加速度的测量中,实验获得的灵敏度分别为 $-0.27\text{nm/mm}$ 及 $0.191\text{nm}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ 。提出了将D形光纤光栅弯曲成‘ $\Omega$ ’形状,使其啾啾化,实现了光栅色散值的可调谐;并且将其中点设置在零应变点的位置,能够保持中心波长不发生漂移。实验获得的反射谱带宽由 0.299nm 调谐到 2.057nm,同时中心波长漂移小于 17pm。

三、基于光纤光栅的法珀结构的原理及应用的研究。提出了光纤光栅法珀滤波器具体的设计和制作方法。并将这种滤波器应用在光纤激光器以及微波信号的光子学生成技术中。实验分别获得了波长可调谐的 19 个单波长激光和 18 对双波长激光,以及 9.4885~10.0712GHz 一系列频率的微波信号。提出了基于光纤光栅法珀结构的可调谐相移光栅。建立了理想模型及实际模型两种仿真模型,详细的分析讨论了各个参数对相移光栅透射谱的影响。与传统的腐蚀光栅法相比,这种新型的可调谐相移光栅在折射率传感中能够大幅提高灵敏度。

**关键词:** 光纤光栅; 波长解调; D形光纤光栅; 法珀滤波器; 相移光纤光栅

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

Fiber Bragg gratings have become one of the most promising and representative optical passive devices at present, and have been broadly applied in optical fiber communications and sensors. The D-shaped fiber Bragg grating (D-FBG) and FBG based Fabry-Perot structure are two novel techniques, which can be applied in many areas for their special properties. So it is really important for theory and practical applications to study them.

In this dissertation, the author investigates some problems in FBG techniques as follows:

1. Investigation on the wavelength demodulation techniques of FBG and the applications. Two techniques of wavelength demodulation based on the linear edge filter and the tunable Fabry-Perot filter (FPF) are investigated. The experimental wavelength resolutions are 3.1pm, and 3pm, respectively. Then, both of them are cooperated and applied in the health monitoring of bridge structure.
2. Study on the bending sensitivity of the D-FBG and its applications. The bending sensitivity of the D-FBG is analyzed with mechanics of material in detail. The experimental results are 78 times (compression) and 86 times (stretch) as high as the uniform FBG's, respectively. Then the D-FBGs are applied in sensors of linear displacement and acceleration, and the sensitivity of -0.27nm/mm and 0.191nm·s<sup>2</sup>/m are obtained, respectively, in experiment. A novel method is proposed for tuning the grating's dispersion through bending the D-FBG into the  $\Omega$ -shape in order to chirp it. The central wavelength of the D-FBG can be kept no shift by locating its center at the zero strain point. The bandwidth of the reflection spectrum is significantly tuned from 0.299nm to 2.057nm, while the central wavelength shift is within 17pm.
3. Research work on the FBG based Fabry-Perot structure and its applications. The method for designing and fabricating the FBG based FPF is demonstrated concretely. Thus, such FPFs are applied in optical fiber ring laser and photonic generation of microwave. Nineteen single-wavelength lasings, eighteen pairs of dual-wavelength lasings, and a series of microwave signals with frequency from 9.4885GHz to 10.0712GHz are experimentally obtained, respectively. A novel tunable phase-shift FBG (PS-FBG) based on such Fabry-Perot structures is proposed. Two modes, including the 'ideal mode' and the 'practical mode', are created for simulation. The

influence on the PS-FBG's transmission spectrum induced by the parameters is discussed. Compared with the traditional FBG-etching method, the sensitivity of such PS-FBG is much higher when it is applied in refractive index sensing.

**Keywords:** Fiber Bragg grating; wavelength demodulation; D-shaped fiber Bragg grating; Fabry-Perot filter; phase shift fiber Bragg grating.

厦门大学博硕士论文摘要库



摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
Contents.....	VIII
<b>第 1 章 绪论.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 光纤光栅技术的基本理论.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 光纤光栅技术的发展概况.....	1
1.1.2 光纤光栅的分类.....	3
1.1.3 光纤 Bragg 光栅的制作方法.....	4
1.1.4 光纤 Bragg 光栅的工作原理.....	7
<b>1.2 光纤光栅技术的应用.....</b>	<b>11</b>
1.2.1 光纤光栅在光纤通信中的应用.....	11
1.2.2 光纤光栅在光纤传感中的应用.....	13
<b>1.3 本文的主要工作及创新点.....</b>	<b>15</b>
<b>第 2 章 光纤光栅波长解调技术的研究及其应用.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 光纤光栅波长解调技术概述.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 边沿滤波法光栅波长解调系统.....</b>	<b>18</b>
2.2.1 工作原理.....	18
2.2.2 信号处理方法的分析与讨论.....	20
2.2.3 等强度悬臂梁定标.....	23
<b>2.3 基于可调谐法珀滤波器的光栅波长解调系统.....</b>	<b>28</b>
2.3.1 方案分析与讨论.....	28
2.3.2 等强度悬臂梁定标.....	34
<b>2.4 在桥梁结构健康监测中的应用.....</b>	<b>35</b>
2.4.1 方案介绍.....	35
2.4.2 测量结果.....	37
<b>2.5 本章小结.....</b>	<b>39</b>
<b>第 3 章 D 形光纤光栅的弯曲敏感特性及其在传感技术中的应用..</b>	<b>40</b>
<b>3.1 D 形光纤.....</b>	<b>40</b>
3.1.1 D 形光纤的技术背景.....	40
3.1.2 D 形光纤的制作技术.....	40
3.1.3 D 形光纤跟常规单模光纤的熔接.....	42
3.1.4 D 形光纤的双折射效应及偏振依赖损耗.....	45
<b>3.2 D 形光纤光栅弯曲敏感特性.....</b>	<b>46</b>

3.2.1 研究背景.....	46
3.2.2 理论分析.....	47
3.2.3 实验结果.....	51
<b>3.3 基于 D 形光纤光栅弯曲敏感特性的传感应用 .....</b>	<b>52</b>
3.3.1 线位移传感.....	52
3.3.2 加速度传感.....	54
<b>3.4 本章小结 .....</b>	<b>57</b>
<b>第 4 章 D 形光纤光栅在光通信色散补偿技术中的应用.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 光纤光栅色散补偿技术的研究进展 .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 基于 D 形光纤光栅的色散调谐技术 .....</b>	<b>61</b>
4.2.1 工作原理.....	61
4.2.2 仿真结果.....	63
4.2.3 实验结果.....	65
<b>4.3 D 形光纤光栅色散特性优化设计 .....</b>	<b>66</b>
4.3.1 啁啾光栅的分布反射模型.....	66
4.3.2 切趾啁啾光栅的色散特性仿真.....	67
4.3.3 切趾的 D 形光纤光栅的色散特性仿真.....	70
4.3.4 弯曲引起的 D 形光纤光栅的法珀效应.....	72
<b>4.4 本章小结 .....</b>	<b>73</b>
<b>第 5 章 光纤光栅法珀滤波器的原理及其应用 .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1 基于光纤光栅的法珀滤波器 .....</b>	<b>75</b>
5.1.1 法布里-珀罗干涉仪.....	75
5.1.2 光纤光栅法珀滤波器的工作原理.....	76
5.1.3 光纤光栅法珀滤波器的设计与制作方法.....	77
<b>5.2 FBG-FPF 在可调谐光纤激光器中的应用 .....</b>	<b>78</b>
5.2.1 可调谐光纤激光器的结构.....	78
5.2.2 半导体光放大器增益特性测量.....	80
5.2.3 激光输出及稳定性测量.....	82
5.2.4 激光线宽测量.....	83
<b>5.3 FBG-FPF 在可调谐微波信号生成技术中的应用 .....</b>	<b>84</b>
5.3.1 微波信号光子学生成技术简介.....	84
5.3.2 双波长激光拍频生成可调谐微波信号.....	85
<b>5.4 本章小结 .....</b>	<b>87</b>
<b>第 6 章 新型可调谐相移光纤光栅的原理及其应用 .....</b>	<b>88</b>
<b>6.1 相移光纤光栅简介 .....</b>	<b>88</b>
<b>6.2 基于法珀结构的新型可调谐相移光纤光栅 .....</b>	<b>89</b>
6.2.1 基本原理.....	89
6.2.2 理想模型仿真.....	92
6.2.3 实际模型仿真.....	95
<b>6.3 实验结果 .....</b>	<b>100</b>
<b>6.4 在折射率传感中的应用分析 .....</b>	<b>101</b>

6.5 本章小结 .....	104
第 7 章 总结及展望 .....	105
参考文献 .....	108
致 谢 .....	117
附 录 .....	118

厦门大学博硕士论文摘要库

## Contents

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>III</b>
<b>Contents in Chinese</b> .....	<b>V</b>
<b>Contents in English</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Chapter 1 Preface</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Fiber Bragg grating fundamentals</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Development of the technology on FBG.....	1
1.1.2 Category of FBG.....	3
1.1.3 Fabricating methods of FBG.....	4
1.1.4 Working principle of FBG.....	7
<b>1.2 Applications of fiber Bragg gratings</b> .....	<b>11</b>
1.2.1 Applications of FBG in optical fiber communications...11	
1.2.2 Applications of FBG in optical fiber sensors.....13	
<b>1.3 Main work and innovation of this thesis</b> .....	<b>15</b>
<b>Chapter 2 Wavelength demodulation and applications</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Summary of the wavelength demodulation techniques</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 Edge filter based wavelength demodulation system</b> .....	<b>18</b>
2.2.1 Working principle.....	18
2.2.2 Analysis and discussion of the signal processing.....	20
2.2.3 Calibrating the system with a uniform strength beam...23	
<b>2.3 Tunable F-P filter based wavelength demodulation system</b> ...	<b>28</b>
2.3.1 Analysis and discussion of the system schemes.....	28
2.3.2 Calibrating the system with a uniform strength beam...34	
<b>2.4 Application in the health monitoring of bridge structure</b> ..	<b>35</b>
2.4.1 Introduction of the system scheme.....	35
2.4.2 Experimental results.....	37
<b>2.5 Summing-up</b> .....	<b>39</b>
<b>Chapter 3 D-FBG's Bending sensitivity and applications in sensors</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1 Introduction of the D-fiber</b> .....	<b>40</b>
3.1.1 Technique background of the D-fiber.....	40
3.1.2 Fabricating methods of the D-fiber.....	40
3.1.3 Fusion loss between the D-fiber and uniform fiber.....	42

3.1.4 Birefringence and PDL of the D-fiber.....	45
<b>3.2 Bending sensitivity of the D-FBG .....</b>	<b>46</b>
3.2.1 Background.....	46
3.2.2 Theoretical analysis.....	47
3.2.3 Experimental results.....	51
<b>3.3 Applications based on D-FBG's bending sensitivity.....</b>	<b>52</b>
3.3.1 Linear displacement sensor.....	52
3.2.2 Acceleration sensor.....	54
<b>3.4 Summing-up .....</b>	<b>57</b>
<b>Chapter 4 D-FBG's application in dispersion compensation</b>	<b>58</b>
<b>4.1 Development of the dispersion compensation techniques based on the FBGs .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 Tunable dispersion compensation based on the D-FBG .....</b>	<b>61</b>
4.2.1 Working principle.....	61
4.2.2 Simulation results.....	63
4.2.3 Experimental results.....	65
<b>4.3 Optimization of the tunable dispersion based on the D-FBG .</b>	<b>66</b>
4.3.1 Distributed reflection mode of the CFBG.....	66
4.3.2 Simulation on the dispersion of the apodized CFBG....	67
4.3.3 Simulation on the dispersion of the apodized D-FBG....	70
4.3.4 Fabry-Perot effect of the D-FBG induced by bending....	72
<b>4.4 Summing-up .....</b>	<b>73</b>
<b>Chapter 5 Principle and applications of the FBG-FPF.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1 FBG based Fabry-Perot filter .....</b>	<b>75</b>
5.1.1 Fabry-Perot interferometer.....	75
5.1.2 Working principle of the FBG-FPF.....	76
5.1.3 Design and fabrication methods of the FBG-FPF.....	77
<b>5.2 Application of the FBG-FPF in tunable optical fiber laser .</b>	<b>78</b>
5.2.1 Structure of the tunable optical fiber laser.....	78
5.2.2 Measurement of the SOA' s gain characteristics.....	80
5.2.3 Measurement of the lasing output and stability.....	82
5.2.4 Measurement of the linewidth.....	83
<b>5.3 Application of the FBG-FPF in tunable microwave generation</b>	<b>84</b>
5.3.1 Introduction of photonic generation of microwave.....	84
5.3.2 Frequency tunable microwave generation by beating the dual-wavelength lasing.....	85
<b>5.4 Summing-up .....</b>	<b>87</b>
<b>Chapter 6 Principle and applications of the Novel PS-FBG</b>	<b>88</b>
<b>6.1 Introduction of the phase-shifted FBG .....</b>	<b>88</b>
<b>6.2 Novel tunable PS-FBG based on the Fabry-Perot structure ...</b>	<b>89</b>
6.2.1 Working principle.....	89

6.2.2 Simulation on the ideal mode.....	92
6.2.3 Simulation on the practical mode.....	95
<b>6.3 Experimental results .....</b>	<b>100</b>
<b>6.4 Analysis of the application in refractive index sensor ...</b>	<b>101</b>
<b>6.5 Summing-up .....</b>	<b>104</b>
<b>Chapter 7 Conclusion and prospect.....</b>	<b>105</b>
<b>Reference.....</b>	<b>108</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>117</b>
<b>Appendix.....</b>	<b>118</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第1章 绪论

以光纤通信与光纤传感为代表的信息技术,从20世纪60年代至今得到了蓬勃的发展,极大的推动了人类社会的进步。1966年,英籍华裔科学家高锟博士发表了一篇具有里程碑意义的论文《用于光频率的介质纤维表面波导》<sup>[1]</sup>,指出如果减少或消除光导纤维中的有害杂质,可大大降低光纤传输损耗,提高光纤的传光能力。1970年,康宁公司根据高锟博士的理论,第一个制造出损耗小于20dB/km的光纤,就此揭开了光纤技术的序幕。

### 1.1 光纤光栅技术的基本理论

#### 1.1.1 光纤光栅技术的发展概况

光纤光栅是一种基于光纤的无源器件,其纤芯折射率沿轴向呈周期性变化。1978年,加拿大通信研究中心 Hill<sup>[2]</sup>等人首次在纤芯掺锗的石英光纤中,发现了纤芯的折射率在某些波长的光照射下会产生周期性的永久改变,并且采用驻波写入法制成了世界上第一个光纤 Bragg 光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG),这是光纤光栅研究的起点。1989年,美国东哈特福德联合技术研究中心 Meltz<sup>[3]</sup>等人利用两束相干的紫外光形成的干涉条纹照射光纤的侧面,刻写出反射谱在可见光波段的光栅,成栅技术取得了重大的突破。1993年, Lemaire<sup>[4]</sup>等人把掺锗光纤进行高压载氢,增加了光纤的光敏性,为在通信单模光纤中写出高反射率的光栅提供了可能性。1993年, Hill<sup>[5]</sup>等人提出了相位掩模板法,大大降低了刻写装置的复杂程度,使得光纤光栅真正走向实用化和产业化。

许多理论和计算方法都可以用来分析光纤光栅的光学特性。1973年, Yariv<sup>[6]</sup>在导波光学中引入耦合模理论,波导的折射率微扰导致正向模式与反向模式耦合,产生了反向传输光场,但是该理论仅适用于均匀的 Bragg 光栅,1976年, Kogelnik<sup>[7]</sup>将其拓展到非周期结构的波导光栅。对于复杂结构的光纤光栅,用耦合模理论是难以分析的,因此人们引入了数值分析方法。1985年, Wller-Brophy<sup>[8]</sup>等人把计算薄膜的 Rouard 法引入到波导光栅的分析中来,这种算法与耦合模理论的结果差异通常都小于 1%<sup>[9]</sup>。1987年, Yamada<sup>[10]</sup>等人在分析分布反馈平面波导时引入了传输矩阵方法,即把光栅分成若干段,每段的长度远大于光栅的最大周期,因此每段光栅可以近似看成是均匀的,写出其光场的传输矩阵,最后把所

有矩阵连乘就得到了光栅的总矩阵。1992年, Winick<sup>[11]</sup>等人引入有效折射率法, 把光栅分成许多小段, 每段的长度都小于光栅最小周期, 假定每段的有效折射率都是固定的, 计算模场时利用每段与前后段的匹配条件, 得到输入输出场的关系, 计算结果与耦合模理论相符。不过这种方法计算量大, 一般适合毫米级的光栅。1997年, Erdogan<sup>[12]</sup>在前人工作的基础上, 将传输矩阵法引入到光纤光栅的仿真计算中, 能够快捷、准确的计算各种周期性、非周期性 Bragg 光栅和长周期光栅。此外, Bloch 波法<sup>[13]</sup>、非对称离散时间法<sup>[14]</sup>、WKB 法<sup>[15]</sup>、哈密顿公式<sup>[16]</sup>及变量法<sup>[17]</sup>等方法也可以用来分析光纤光栅。

在工程应用中, 往往更注重光纤光栅的逆向设计, 即由反射率、带宽、色散等目标性能逆向求得光栅的光致折射率分布、长度等参数。对于满足一阶波恩近似<sup>[18]</sup>的弱光栅而言, 求解其折射率分布, 只需要对反射系数作逆傅立叶变换<sup>[19]</sup>。1985年, Song<sup>[20]</sup>等人求得 Gel'fand-Levitan-Marchenko (GLM) 耦合方程的解析解, 并应用在褶皱光波导的设计中, 这种方法结果准确, 但是仅适用于波导的反射系数是有理函数的情况。1990年, Winick<sup>[21]</sup>等人采用更合适的近似, 将傅立叶变换法应用到强光栅的设计中。1996年, Peral<sup>[22]</sup>等人求得 GLM 方程的积分形式的解, 相比解析解得到了更平滑的模式耦合系数。1998年, Skaar<sup>[23]</sup>等人在光栅逆向设计中引入了基因算法, 能够根据目标性能的侧重点不同作灵活调节, 算法具有高度普适性。1999年, Feced<sup>[24]</sup>等人将一种基于因果分析的差分算法应用于光纤光栅的设计中, 具有计算效率高、结果准确等优点。

加拿大 Apollo 公司的 FOGS-BG, 以及 Optiwave 公司的 Opti-Grating 等软件, 不但能够根据给定的参数来仿真光栅的光谱、色散等各种性能, 而且能够根据目标性能进行逆向设计、优化光纤光栅的参数。以它们为代表的商用软件大大促进了光纤光栅的设计及应用。

光纤光栅已经成为当前最具发展前途, 最具代表性的光无源器件之一。它具有插入损耗低、体积小、波长选择性好、性价比高、抗电磁干扰、稳定性高等诸多优点, 因此在光纤激光器、光纤传感器和高速光通信系统等领域中得到了广泛的应用。光纤光栅的出现, 使许多全光纤器件的研制成为可能, 极大地拓展了光纤技术的应用范围。人们普遍认为, 光纤光栅是继掺铒光纤放大器之后, 光通信发展史上又一个里程碑。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库