

分类号：(按中国图书分类法，学位办网上可查)

单位代码：10335

密 级：(注明密级与保密期限)

学 号：_____

仅限于论文课题来源于国防军工项

浙江大学

硕士专业学位论文



中文论文题目：_____ (小二号仿宋体加黑)

英文论文题目：_____ (16pt Time New Roman, Bold)

双向隐名时，作者与导师姓名不填写

申请人姓名：_____

指导教师：_____

合作导师：_____ (若无合作导师，可空白)

专业学位类别：_____ 工程硕士

专业学位领域：_____ 电子与通信工程/集成电路工程

所在院系：_____ 信息与电子工程学系

论文提交日期_____

批注 [shen1]: 三号，黑体加粗，字间空一格

摘要

光纤 Bragg 光栅由于其固有的自然特性和波长编码特性，是理想的传感单元，在光纤光栅传感领域得到大量研究和应用。但温度和检测量的交叉敏感使光纤 Bragg 光栅传感应用受到了限制。

批注 [shen2]: 摘要正文，小四号，宋体，行间距 1.25 倍。硕士学位论文中文摘要字数为 1000-2000 字。

本文的研究工作主要围绕光纤 Bragg 光栅的双参量同时传感的研究展开，研制了通用的、系列的基础传感实验平台，实验检验了使用单个光纤 Bragg 光栅的双参量同时传感。主要包括：

介绍了分析光纤光栅特性的基本理论，用耦合模理论分析了光纤 Bragg 光栅的光谱特性，并简要介绍了光纤 Bragg 光栅写入技术，还有传输矩阵法和傅氏变换法光纤光栅理论。分析了光纤 Bragg 光栅的应变传感模型、温度传感模型、应变和温度同时传感模型，引出光纤 Bragg 光栅的交叉敏感效应，介绍了部分解决方法。

首次提出了一种用单个光纤 Bragg 光栅实现轴向拉伸应变和温度的双参量同时传感的方案，详细阐述了方案原理和要点，说明了方案应用时的结构要点。

在此基础上研制了一种可供多种光纤光栅测试的通用传感实验系统，包括轴向拉伸应变传感系统、温度传感系统、轴向拉伸应变-温度综合传感系统，为今后的各种光纤光栅研究建立了通用的、系列的基础实验平台。传感实验系统方案新颖、结构紧凑、工作可靠、测量准确。

用传感实验系统进行了光纤光栅的传感实验研究，实现并分析了用单个光纤 Bragg 光栅对轴向拉伸应变和温度的双参量的同时传感，检验了传感实验系统的有效性、稳定性，确定了传感实验系统的测量精度。实验中测得光纤 Bragg 光栅的轴向拉伸应变灵敏度是 $1.17\text{pm}/\mu\epsilon$ ，与理论值 $1.19\text{pm}/\mu\epsilon$ 基本吻合；温度灵敏度是 $10.78\text{pm}/^\circ\text{C}$ ，与理论值 $10.58\text{pm}/^\circ\text{C}$ 基本吻合。实验中测得长周期塑料光纤光栅的轴向拉伸应变灵敏度是 $1.144\text{pm}/\mu\epsilon$ ，温度灵敏度是 $56.23\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。

最后进行了总结，并对后续研究提出了进一步的设想和展望。

关键词：光纤光栅、应变、温度、传感

批注 [shen3]: 摘要内容后空 2 行；“关键词”小四号，黑体；其后关键词为小四号宋体

Abstract

Fiber Bragg Grating (FBG) has its own physical performance and wavelength coding characteristic to be widely used as perfect sensing unit in fiber grating sensing area. Yet the temperature and measurement intercross sensitivity becomes the limitation of its application.

This paper focused on FBG's double parameter sensing technique. It was designed and built a general sensing series experimental setup to test double parameters by using single FBG.

It introduced basic theory of the FBG performance, analyzed its spectrum characteristic with the mode coupling theory, simply introduced grating write technique and typical theory of transmit matrix and Fourier transform. Derived from the models of FBG strain sensing, temperature sensing, strain and temperature simultaneous sensing, FBG intercross sensitive effect was introduced together with part of its solutions.

A scheme of using single fiber Bragg grating for axial strain together with temperature sensing was raised for the first time and it is given in detail the principle and frame key point in the application..

Through this system, the sensing function of single FBG to axial strain together with temperature was implemented and the experimental system was confirmed its validity, stability and accuracy. In the experiment, the FBG axial strain sensitivity was measured as $1.17\text{pm}/\mu\epsilon$, nearly equal to the theoretical value $1.19\text{pm}/\mu\epsilon$, the temperature sensitivity was measured as $10.78\text{pm}/^\circ\text{C}$, nearly equal to the theoretical value $10.58\text{pm}/^\circ\text{C}$. Also in the experiment, the long period polymer optical fiber grating was measured as $1.144\text{pm}/\mu\epsilon$ of its axial strain sensitivity and $56.23\text{pm}/^\circ\text{C}$ of its temperature sensitivity.

In the last part of the paper, subsequent research work thinking and expectation has been given.

Keywords: fiber grating, strain, temperature, sensing

批注 [xs4]: 一级标题, 三号 times new roman 加粗, 居中

批注 [shen5]: 英文摘要内容, times new roman 字体, 小四号, 行间距 1.25.

批注 [shen6]: 摘要内容后下空二行打印“Keywords”, 其后关键词小写, 每一关键词之间用逗号分开

批注 [xs7]: 一级标题，三号黑体加粗，居中，中间空一格；目录内容只要显示两级标题即可；

目 录

摘 要.....i

Abstract.....ii

目录.....iii

符号说明.....v

第 1 章 引言.....1

 1.1 光纤传感技术的特点和发展趋势.....1

 1.3 光纤智能结构的特点和发展趋势.....2

 1.4 光纤传感技术的新进展.....2

 1.5 本文主要目的.....2

 1.6 本章小结.....2

第 2 章 光纤Bragg光栅传感的理论基础.....3

 2.1 引言.....3

 2.2 光纤光栅的理论模型.....3

 2.3 耦合模理论.....5

 2.4 光纤Bragg光栅.....5

 2.5 光纤Bragg光栅的写入技术.....6

 2.6 转移矩阵法.....6

 2.7 傅氏变换法.....6

 2.8 光纤Bragg光栅应变传感分析.....6

 2.9 光纤Bragg光栅 温度传感分析.....7

 2.10 本章小结.....7

第 3 章 光纤Bragg光栅的交叉敏感研究.....8

 3.1 光纤Bragg光栅的轴向应变和温度综合传感分析.....8

 3.2 光纤Bragg光栅的交叉敏感效应及部分解决方法.....8

 3.3 单个光纤Bragg光栅实现温度-轴向应变同时测量.....8

 3.4 本章小结.....9

第 4 章 光纤光栅传感系统的研制.....10

 4.1 主要目标.....10

 4.2 轴向拉伸应变传感系统的研制.....10

 4.3 温度传感系统的研制.....11

 4.4 轴向拉伸应变-温度综合传感系统的研制.....11

 4.5 本章小结.....12

第 5 章 光纤光栅应变及温度传感的实验研究.....13

 5.1 光纤Bragg光栅的温度传感实验研究.....13

 5.2 光纤Bragg光栅的轴向拉伸应变-温度综合传感实验研究.....14

 5.3 长周期塑料光纤光栅传感实验研究.....15

 5.4 光纤光栅传感实验研究小结.....16

 5.5 本章小结.....16

第 6 章 总结和展望.....17

参考文献.....18

附 录.....21

致 谢.....22

个人简历、申请硕士学位期间发表的学术论文与工作成果.....23

符号说明

批注 [xs8]: 一级标题，三号黑体加粗，居中；无此类内容，可省略。

论文中所用符号，及其所表示的意义与单位（或量纲）
阅后删除此框。无此内容，可省略。

批注 [shen9]: 章，一级标题，三号，黑体加粗，居中

第 1 章 引言

批注 [shen10]: 节，二级标题，四号，黑体加粗，左起

1.1 光纤传感技术的特点和发展趋势

当今的信息社会，科技发展日新月异，通信技术的发展更是突飞猛进。光纤通信系统是利用光纤进行信息传输的光波系统，80 年代在全球得到了广泛应用，使通信领域发生了巨大的变化，是信息时代来临的主要物质基础之一，已成为现代通信的基石。近年来，随着光纤与光波电子技术的发展，光放大器、波分复用器、光开关、光逻辑门、光路由器等许多新颖的光纤与半导体功能光器件的相继问世，在全世界范围内掀起了发展全光通信网的潮流。全光通信网不仅用光波系统传输信号，而且交换、复用、控制、路由选择等全部在光域完成，可构建真正的光波通信网。光通信系统的发展至今只 30 多年时间，但其发展之快，对通信技术影响之大始料未及，目前大量新的理论与技术研究和发展正在继续进行。光纤通信的研究和发展不仅为光纤传感器的研究提供了坚实的基础，而且也为光纤器件的应用提供了广阔的空间。

批注 [shen11]: 正文部分，小四，宋体，行间距 1.25 倍

光纤Bragg光栅由于其固有的自然特性和波长编码特性，得到大量的研究和应用，被证明在很多应用中是极其稳定和有效的^[1~8]。尤其是在智能材料和结构中，光纤Bragg光栅的固有属性便于将其埋入高级复合材料或其它材料中，进行负载、应变、温度、振动等的实时传感。

光纤Bragg光栅传感器具有优异性能，在传感系统中有重要的地位和价值^[9]：

- 1、光纤 Bragg 光栅不仅可响应应变等参量变化，还可作常规应变计中的绝缘替代物。
- 2、传感探头结构简单、尺寸小，适于各种埋入或嵌入应用场合。
- 3、大量的光纤 Bragg 光栅可被放于一条光纤的预定位置上，形成准分布、准定点的传感器阵列，波分多路复用 WDM 和时分多路复用 TDM 的传感系统可在一条光纤上同时定位大量的光纤 Bragg 光栅。

1.3 光纤智能结构的特点和发展趋势

1.4 光纤传感技术的新进展

近年, 光纤传感技术得到了迅速发展, 在科学研究和工程应用领域得到了广泛的应用, 取得了许多新进展。

1.5 本文主要目的

光纤Bragg光栅是一种性能独特的重要的光纤光栅, 具有良好的应用前景。光纤Bragg光栅的反射波长对温度和应变具有双重敏感性, 当环境温度改变时, 主要由于热光效应使折射率变化和热胀冷缩造成光栅周期变化, 从而引起反射波长变化; 当环境造成光纤内应力变化时, 主要由于光纤折射率变化, 从而引起反射波长变化。实际上, 应变和温度变化往往同时存在, 这两种影响是相互干扰的, 在测量某一参量时, 必须通过适当的补偿措施, 抵消另一参量的影响。为了充分利用光纤光栅的特性和优势, 进一步拓展光纤Bragg光栅在智能材料和智能结构中的应用, 本课题将进行应用光纤Bragg光栅实现应变和温度同时传感的研究, 这需要通过适当的方法将这两种效应所产生的影响区分开来。

研制系列、通用的光纤光栅传感系统, 不仅用于对光纤 Bragg 光栅的双参量传感研究, 而且为进一步开展塑料光纤光栅等的传感特性研究创造条件。

批注 [微软用户12]: 每章最后的小结

1.6 本章小结

介绍了光纤传感技术的特点及发展趋势, 光纤 Bragg 光栅传感技术的特点, 光纤智能结构的特点与发展趋势, 划分了论文内容的组成。

第 2 章 光纤Bragg光栅传感的理论基础

2.1 引言

在用于分析波状结构中光波场传播的方法中^[10]，应用最广泛的是Yariv A于1973年在波导光学中引入的耦合模理论^[11]，其中无扰动波导中的正向传播光场经光栅结构的微扰产生反向传播光场。耦合模理论最初适用于光纤Bragg光栅，1976年经Kogelnik H^[12]将其扩展到了非周期结构。1987年Yamada M等人引入了转移矩阵方法^[13]分析复杂结构的光栅，1992年Winick K A引入了有效折射率方法^[14]。

还有多种方法用于分析光栅结构，例如，1985年Weller-Brophy L A和Hall D G等人把计算薄膜设计的Rouard法用于描述波导结构^[15]，1991年Russell St J等人引入Bloch光栅分析方法^[16]，1995年Frolik J L和Yagle A E等人引入基于数字信号处理公式的离散时间法分析周期光栅^[17]，该DSP公式是一种快速算法，可用于分析任意结构的光栅响应，以及从响应分析出光栅的结构。其它基于WKB（相位积分）^[18]、Hamiltonian^[19]和变分原理^[20]等更基础的方法也被用于描述光纤光栅。

批注 [微软用户13]: 引用标注顺序，应与论文后面参考文献列表顺序一致

2.2 光纤光栅的理论模型

光纤是一种介质光波导，特点有：无传导电流；无自由电荷；线性各向同性。光纤中传播的光波遵从Maxwell方程组^[21~26]

$$\begin{cases} \nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \cdot H = 0 \\ \nabla \cdot E = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

批注 [shen14]: 公式单独成行，并注明序号，序号按章节编排

式中 E 和 H 是光波场的电矢量和磁矢量， ε 是介电常数， μ_0 是真空的磁导率。

将时谐场中电磁场的场量

$$\begin{cases} E(r, t) = E(r) e^{-i\omega t} \\ H(r, t) = H(r) e^{-i\omega t} \end{cases} \quad (2.2)$$

代入式(2.1)，并略去时间因子得到频域 Maxwell 方程

$$\begin{cases} \nabla \times H(r) = -i\omega\epsilon_0 n^2 E(r) \\ \nabla \times E(r) = i\omega\mu_0 H(r) \\ \nabla \cdot H(r) = 0 \\ \nabla \cdot E(r) = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

式中 ω 是光波角频率， ϵ_0 是真空的介电常数， $n = \sqrt{\epsilon} / \sqrt{\epsilon_0}$ 是媒质的相对折射率。

式(2.3)可导出复数形式的电矢量的频域波动（矢量 Helmholtz）方程

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 n^2 E + \epsilon_0 \nabla(E \cdot \nabla \lg n^2) = 0 \quad (2.4)$$

光纤光栅由于折射率变化，在纤芯中形成空间相位光栅，造成光纤波导条件的改变，使具有一定波长的光波在该区域发生相应的模式耦合。

光纤光栅的折射率分布可写为

$$n(r, \varphi, z) = \begin{cases} n_1[1 + F(r, \varphi, z)] & |r| \leq a_1 \\ n_2 & a_1 < |r| \leq a_2 \\ n_3 & |r| > a_2 \end{cases} \quad (2.5)$$

式中 $F(r, \varphi, z)$ 是纤芯光致折射率变化的函数，具有以下特性

$$F(r, \varphi, z) = \frac{\Delta n(r, \varphi, z)}{n_1} \quad (2.6)$$

$$|F(r, \varphi, z)|_{\max} = \frac{\Delta n_{\max}}{n_1} \quad 0 < z < L \quad (2.7)$$

$$F(r, \varphi, z) = 0 \quad z > L \quad (2.8)$$

$$\nabla^2 E + n^2 k_0^2 E = 0 \quad (2.9)$$

式中 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 是真空中波矢量的大小。

采用 Fourier 级数的形式对折射率周期变化和准周期变化进行分解，可得光致折射率变化的一般性函数为

$$F(r, \varphi, z) = \frac{\Delta n_{\max}}{n_1} F_0(r, \varphi, z) \sum_{q=-\infty}^{+\infty} a_q \cos[(k_g q + \varphi(z))z] \quad (2.10)$$

$$n(r, \varphi, z) = n_1 + \Delta n_{\max} F_0(r, \varphi, z) \sum_{q=-\infty}^{+\infty} a_q \cos[(k_g q + \varphi(z))z] \quad (2.11)$$

2.3 耦合模理论

K_{ml}^{++} 和 K_{ml}^{--} 都正比于两个同向传播的模式场量之间的耦合量，因为在同一波导中，两个同向传播的模式场量之间的耦合量不管在正向还是负向应该是相等的。正向模 $\frac{dA_l^+}{dz}$ 是随传播方向的增加量， $\frac{dA_l^-}{dz}$ 是随传播方向的减少量，因为负向模在负 z 轴方向传播，所以 K_{ml}^{++} 和 K_{ml}^{--} 相差一个负号。 K_{ml}^{+-} 和 K_{ml}^{-+} 之间的负号也有同样意义。

对理想波导的标量模， $E(x, y) = E^*(x, y)$ ，即 $E(x, y)$ 是实函数，因此耦合系数具有互易性，即

$$K_{ml} = K_{lm} \quad (2.27)$$

2.4 光纤 Bragg 光栅

在光纤的曝光区利用紫外激光可形成均匀干涉条纹，在光纤纤芯形成类似条纹结构的折射率变化，可得到均匀周期的光纤 Bragg 光栅， $\varphi(z) = 0$ ， $\overline{\Delta n_{eff}}(z)$ 不变，如图 2-1 所示。

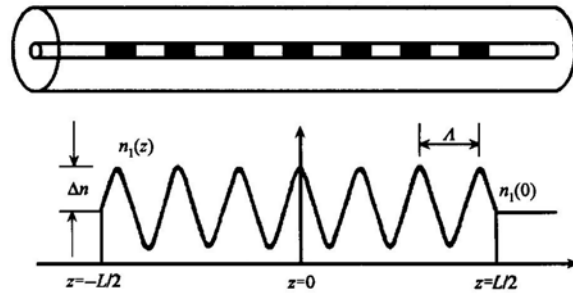


图 2-1 光纤 Bragg 光栅中的折射率分布原理

尽管在实际制作中很难使折射率变化严格遵循正弦结构，但光纤 Bragg 光栅具有重要的理论价值，是分析研究各种非均匀性影响的基础。

批注 [微软用户15]: 明确的指向，而不是“如下图所示”等

批注 [shen16]: 图标在图的下方，图号按章节编排，五号，楷体，

2.5 光纤 Bragg 光栅的写入技术

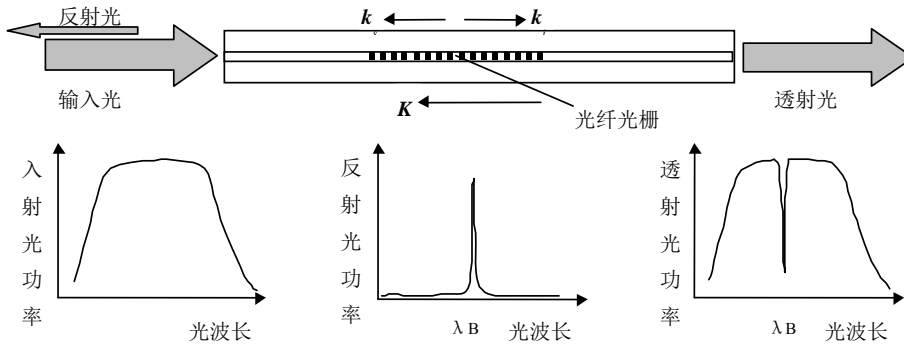


图 2-6 光纤光栅及其谱特性示意图

光纤 Bragg 光栅相位匹配的条件为 $\lambda = \lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ ，包括输入光谱（入射光谱）、透射光谱（输出光谱）和反射光谱（输出光谱），如图 2-6 所示。光纤 Bragg 光栅反射光谱的带宽很窄，一般为亚纳米数量级。

2.6 转移矩阵法

非均匀周期的光纤光栅也有大量的用途，例如可削减光纤 Bragg 光栅光谱的旁瓣。通常采用耦合模方程的数值积分和分段均匀方法来处理非均匀周期的光纤光栅。分段均匀法^[13,35]将光栅分成离散的均匀段，闭式解由代表每段的矩阵连乘而成，这种方法可快速计算具有 10^5 个周期的厘米级长度的光纤光栅。

2.7 傅氏变换法

1976 年，Kogelnik H 等人在非均匀周期结构中引入了 Fourier 变换法^[12,33]。

Fourier 变换法是模拟反射率较低的光纤光栅的光谱性质的有力工具，具有清晰、简单、快捷的特点，但对于反射率较高的光纤光栅有较大偏差。

2.8 光纤 Bragg 光栅应变传感分析

光纤 Bragg 光栅(FBG, fiber Bragg grating)的原理是由于光纤芯区的折射率周期变化造成光纤波导条件的改变，导致一定波长的光波发生相应的模式耦合，使

2.8.1 均匀轴向应变传感分析

本文着重考察其中的均匀轴向应变的传感模型。采用柱坐标分析，在均匀拉伸时 $\sigma_{zz} = -P$ ， P 为外加压强， $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = 0$ ，且不存在切向应力，故得应变

2.8.2 径向应变传感分析

对光纤 Bragg 光栅径向应变传感模型分析如下。

2.8.3 综合应变传感分析

光纤 Bragg 光栅综合应变传感模型分析如下。

2.9 光纤 Bragg 光栅 温度传感分析

从物理本质看，温度引起光纤光栅 Bragg 波长偏移的原因主要有 3 个方面：光纤热膨胀效应、光纤热光效应和光纤内部热应力引起的弹光效应。

2.10 本章小结

概要介绍了光纤光栅的理论模型、耦合模理论、转移矩阵法、傅氏变换法，用耦合模理论分析了光纤 Bragg 光栅的光谱特性。概要介绍了光纤 Bragg 光栅的写入技术。分析了光纤 Bragg 光栅的应变传感模型和温度传感模型。

批注 [shen17]: 小节，三级标题，小四号，黑体加粗，左起

批注 [微软用户18]: 每章都应有

第 3 章 光纤 Bragg 光栅的交叉敏感研究

3.1 光纤 Bragg 光栅的轴向应变和温度综合传感分析

光纤光栅在本征上是对温度敏感的^[54~58]，利用光纤 Bragg 光栅检测其它物理量时，不可避免地会受到温度的干扰。引起光纤 Bragg 光栅波长偏移的最直接参量就是应力、应变。

3.2 光纤 Bragg 光栅的交叉敏感效应及部分解决方法

光纤 Bragg 光栅的双参量交叉敏感效应限制了光纤 Bragg 光栅的传感应用，但另一方面，光纤 Bragg 光栅的波长编码等特性使其在传感领域有诸多优势，因此，光纤 Bragg 光栅的双参量同时传感技术一直是光纤 Bragg 光栅传感领域的一个研究热点。光纤光栅的双参量或多变量传感，既是为了满足实际应用中的需要，也是为了提高传感器的性能和效率，充分利用其潜能。

3.3 单个光纤 Bragg 光栅实现温度-轴向应变同时测量

3.3.1 双参量同时测量的方法

当光纤 Bragg 光栅同时受到应变和温度变化的作用时，如果应变和温度的变化不是很大，忽略 Taylor 展开的交叉项和高阶项，得到光纤 Bragg 光栅的 Bragg 波长发生偏移

3.3.2 单个光纤 Bragg 光栅实现轴向拉伸应变和温度同时传感的方案

当光纤光栅同时受到应变和温度变化的作用时，应变变化和温度变化都会使 Bragg 波长发生偏移，由于光纤 Bragg 光栅应变传感对轴向拉伸较为敏感，因此本课题主要考虑轴向应变和温度的双参量综合传感的情况。

3.3.3 方案要点

3.3.4 方案应用设想

现将用单个光纤 Bragg 光栅实现轴向拉伸应变和温度双参量同时传感的方案在应用中的设想的结构要点举例说明如下。

3.4 本章小结

分析了光纤 Bragg 光栅的应变和温度综合传感模型。讨论了光纤 Bragg 光栅的交叉敏感效应，并介绍了部分解决方法。提出了一种用单个光纤 Bragg 光栅实现轴向拉伸应变和温度的双参量同时传感的方案，详细阐述了方案原理和要点，说明了方案应用时的结构要点。

第 4 章 光纤光栅传感系统的研制

本章为了研究各种石英光纤光栅、塑料光纤光栅等光纤光栅的相关性能，对光纤光栅传感系统进行了详细、系列的方案设计和结构设计，并根据设计研制成轴向拉伸应变传感系统、温度传感系统、轴向拉伸应变和温度综合传感系统，建立通用光纤光栅传感实验平台。

4.1 主要目标

4.2 轴向拉伸应变传感系统的研制

轴向拉伸对光纤 Bragg 光栅作用明显，石英光纤的最大拉伸强度约为 1%~2%，聚合物光纤的最大拉伸强度约为 5%~10%^[86]。通常大的拉伸强度意味着能有很大的工作动态范围，我们希望今后建立测量范围较大的传感系统，因此首先设计轴向拉伸应变传感系统。

4.2.1 传感系统方案

是许多传感系统需要测量的基本参数。Bragg 光栅对轴向应变很敏感，利用 Bragg 光栅的轴向应变可变换测量位移、应力、压力、振动、声音、磁场等多种参量。

4.2.2 设计要点

4.2.3 设计小结

主要优点：

- 1、缠绕方式紧固光纤，对光纤光栅有较好的保护，系统有较大的轴向应变测量范围。
- 2、采用直接测量方式，消除或减小误差，保证应变测量精度。
- 3、尽可能剔除系统误差环节（如缠绕机构、拉伸机构等），精简有效变化环境，提高测量精度。

4.3 温度传感系统的研制

4.3.1 传感系统方案

光纤 Bragg 光栅温度传感方案框图见图 4-9。由光源提供具有一定谱宽的输入光谱,通过光纤耦合器进入光纤光栅。光纤光栅被置于受控的温度测试环境中。光纤光栅在温度变化的作用下, Bragg 波长发生偏移,以 Bragg 波长为中心波长的部分光谱反射后,经光纤耦合器后从另一端口输出,成为反射光谱,而其它的大部分光谱透过光纤光栅,成为透射谱。用光谱仪可观察、测量反射谱或透射谱。

4.3.2 设计要点

主要要求:

温度传感系统的设计主要是建立温度变化环境,应该使温度控制有足够大的变化范围,温度的可控性好,温度的稳定性好,温度测量点与光纤光栅处的温度一致性好,温度变化环境要小,系统的热交换效能高,温度响应快。

4.3.4 设计小结

4.4 轴向拉伸应变-温度综合传感系统的研制

4.4.1 传感系统方案

光纤 Bragg 光栅轴向拉伸应变-温度传感方案框图见图 4.21。由光源提供具有一定谱宽的输入光谱,通过光纤耦合器进入光纤光栅。光纤光栅被置于受控的轴向拉伸应变和温度测试环境中。光纤光栅在轴向拉伸应变和温度变化的作用下, Bragg 波长发生分裂和偏移,部分光谱反射后,经光纤耦合器后从另一端口输出,成为反射光谱,而其它的大部分光谱透过光纤光栅,成为透射谱。

4.4.2 设计要点

主要要求：

轴向拉伸应变-温度综合传感系统的设计主要是建立有效、小巧的轴向拉伸应变和温度变化环境，应该使轴向拉伸应变安全、有效，使温度控制有较大的变化范围，轴向拉伸应变和温度的可控性好，稳定性好，应变和温度的参照量与光栅处的实际应变和温度的一致性好，温度变化环境要小，系统的热交换效能高，温度响应快。

4.4.3 设计小结

主要优点：

- 1、轴向拉伸应变-温度传感系统与温度传感系统共用大部分组件，精简了实验平台，保留了温度传感系统的大部分优点；
- 2、使光纤 Bragg 光栅的上半段只受温度影响、下半段同时受温度和应变影响，简练地实现了轴向拉伸应变和温度的双参量综合传感；
- 3、采用间接测量方式，使轴向拉伸应变和温度控制在小容积的温控腔中同时实现，系统体积小；
- 4、实现了对光纤 Bragg 光栅的轴向拉伸应变和温度的双参量的点测量，使目标点的双参量的传感更精确；
- 5、轴向拉伸应变通过悬挂液体砝码实现，减少了误差环节，简化了机构。

主要缺点：

- 1、光栅的粘固方式，使光栅只能专用于实验，不能再作它用。

4.5 本章小结

设计并制作完成了轴向拉伸应变传感系统、温度传感系统、轴向拉伸应变-温度综合传感系统，详细阐述了系统方案、设计要点、设计细节，并总结设计的优缺点。

第 5 章 光纤光栅应变及温度传感的实验研究

本章利用自行研制的温度传感系统和轴向拉伸应变-温度综合传感系统，对光纤 Bragg 光栅的温度和应变的传感特性进行了实验测量

5.1 光纤 Bragg 光栅的温度传感实验研究

5.1.1 实验方案和实验系统

5.1.2 实验过程和实验现象

5.1.3 实验数据及分析

先使温控腔降温，从-16.7℃ 开始，记录电子测温仪的温度值和光纤 Bragg 光栅反射谱中的 Bragg 波长，逐渐升高温控腔温度直至114.8℃ ，共测得 16 个温度时对应的光纤 Bragg 光栅反射谱中的 Bragg 波长，如表 5-1 所示：

表 5-1 温度值和光纤 Bragg 光栅反射谱中的 Bragg 波长对照表

| 序号 | 温度（C） | 中心波长（nm） |
|----|-------|----------|
| 1 | -16.7 | 1547.600 |
| 2 | -13.7 | 1547.620 |
| 3 | -1.2 | 1547.720 |
| 4 | 11.3 | 1547.860 |
| 5 | 19.0 | 1547.920 |
| 6 | 27.2 | 1548.000 |
| 7 | 35.7 | 1548.080 |
| 8 | 44.1 | 1548.160 |
| 9 | 52.1 | 1548.220 |
| 10 | 62.3 | 1548.340 |
| 11 | 73.2 | 1548.460 |
| 12 | 83.8 | 1548.580 |
| 13 | 92.1 | 1548.700 |
| 14 | 102.6 | 1548.800 |
| 15 | 110.1 | 1548.900 |
| 16 | 114.8 | 1548.940 |

批注 [微软用户19]: 表的表示要明确指向，而不是“如下表所示”等；

批注 [shen20]: 表题在表的上方，五号，楷体，居中

5.2 光纤 Bragg 光栅的轴向拉伸应变-温度综合传感实验研究

5.2.1 实验方案和实验系统

5.2.2 实验过程

- 1、准备若干液体砝码，用天平计量并标记每个砝码和滑轮挂钩的重量。
- 2、开启风扇的 220 伏交流电源。
- 3、开启连接半导体致冷器的直流稳压电源，设置直流电压为零。
- 4、开启宽带光源和光谱仪电源，完成自检和功能设定。

5.2.3 实验依据和实验现象

实验依据：

如前所述，在轴向拉伸应变和温度的综合作用下，光纤 Bragg 光栅的 Bragg 波长的变化为：

5.2.4 实验数据及分析

在 23.3℃ 时，依次在光纤 Bragg 光栅的下端挂上 0、14.6、34.6、54.6、74.6、94.6 克重的砝码，分别记录反射谱，然后逐次调整温控腔的温度为 27.3℃、31.6℃、35.6℃、39.9℃、44.2℃、48.4℃、53.3℃、57.6℃、62.0℃、66.5℃、71.1℃、75.9℃、80.5℃、85.5℃、91.0℃、95.9℃、100.7℃、106.0℃、110.5℃，共 20 个测试温度，在每个测试温度上重复挂上 0、14.6、34.6、54.6、74.6、94.6 克重的砝码进行测量，分别记录反射谱，共得到 120 个光纤 Bragg 光栅的反射谱。

5.2.5 实验小结

利用单个光纤 Bragg 光栅实现了轴向拉伸应变和温度的双参量综合传感。

使光纤 Bragg 光栅的上半段光栅受单参量（温度）作用，下半段光栅受双变量（温度和轴向拉伸应变）作用。光纤 Bragg 光栅的上半段光栅光谱的 Bragg 波长相对于初始 Bragg 波峰的偏移 ($\lambda_{B1} - \lambda_{B0}$) 表征了温度的变化；

5.3 长周期塑料光纤光栅传感实验研究

第 4 章研制的各种传感系统可用于对多种光纤光栅的实验和研究。

我学院的陈松涛、廖启亮利用作者研制的轴向拉伸应变传感系统和温度传感系统，对长周期塑料光纤光栅的应变和温度的传感特性进行了实验研究，现简述分析如下^[87,88]。

5.3.1 长周期塑料光纤光栅的轴向拉伸应变传感实验研究

5.3.1.1 实验方案和实验系统

实验方案如图 5-12 所示：

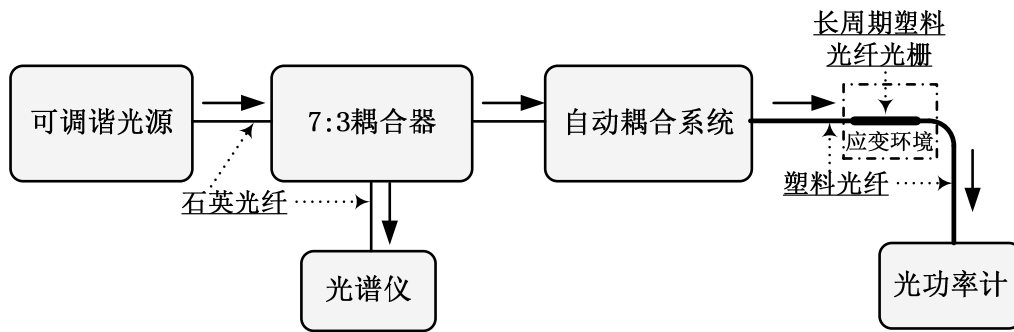


图 5-12 长周期塑料光纤光栅应变传感实验方案

5.3.1.2 实验数据及分析

采用波长递减逐点扫描法，分别测得在每个特定应变下光纤光栅的透射谱并获得此应变下的光纤光栅的损耗峰前向转折点 λ_{knee} ，得到如图 5-15 所示的应变变量 ε 与损耗峰前向转折点 λ_{knee} 的关系图和图 5-16 所示的应变变量 ε 与损耗峰前向转折点变化量 $\Delta\lambda_{\text{knee}}$ 的关系图。

从图中可以看出，损耗峰前向转折点变化量 $\Delta\lambda_{\text{knee}}$ 与应变变量 ε 之间具有较好的线性关系，对数据进行线性拟合可得： $\lambda_{\text{knee}} = 1551.645 + 1.144\varepsilon$ ，实验的长周期塑料光纤光栅的轴向拉伸应变灵敏度约为 $1.144\text{pm}/\mu\varepsilon$ 。

5.3.2 长周期塑料光纤光栅的温度传感实验研究

5.3.2.1 实验方案和实验系统

5.3.2.2 实验数据及分析

先对长周期塑料光纤光栅进行温度传感实验,采用波长递增逐点扫描法,分别测得温度在 23.6℃、30.4℃、43.2℃、52.2℃、61.3℃ 时光纤光栅的透射谱。长周期塑料光纤光栅温度传感响应曲线如图 5-22 所示。进行线性拟合所得公式为 $\lambda_{\text{knee}} = 1545.65 + 0.05623\Delta T$, 实验的长周期塑料光纤光栅的温度灵敏度约为 56.23pm/℃。

5.4 光纤光栅传感实验研究小结

本章利用第 4 章研制的传感系统完成了传感测量,用实验数据分析了光纤光栅的传感性能,同时检验了传感系统的工作可靠性和测量精度。

5.5 本章小结

分别整理分析轴向拉伸应变传感系统、温度传感系统、轴向拉伸应变-温度综合传感系统的实验数据,分析了用单个光纤 Bragg 光栅实现对轴向拉伸应变和温度的双参量的同时传感,测量了传感系统的轴向拉伸应变灵敏度和温度灵敏度。用传感系统对长周期塑料光纤光栅的应变和温度传感性能进行实验研究。

第 6 章 总结和展望

光纤 Bragg 光栅是最近几年发展最为迅猛的光纤无源器件之一，具有径细、质轻、柔韧、结构简单、稳定性好、抗干扰能力强等许多优势，使许多复杂的全光通信和传感网络成为可能，极大地拓宽了光纤技术的应用范围。但温度和检测量的交叉敏感效应使光纤 Bragg 光栅传感应用受到了限制，因此，作者研制了传感实验系统，对光纤 Bragg 光栅的双参量同时传感进行了探索性实验研究。本文的创新点：

首次提出了一种用单个光纤 Bragg 光栅实现轴向拉伸应变和温度的双参量同时传感的方案，详细阐述了方案原理和要点，说明了方案应用时的结构要点。

研制了一种可供多种光纤光栅测试的通用传感实验系统，包括轴向拉伸应变传感系统、温度传感系统、轴向拉伸应变-温度综合传感系统，为今后的各种光纤光栅研究建立了通用的、系列的基础实验平台。

轴向拉伸应变-温度综合传感平台结构精巧，应变和温度控制简便、稳定，可用于各种光栅结构的石英、聚合物光纤光栅的轴向拉伸应变和温度的双参量综合传感研究。

用传感实验系统进行了光纤光栅的传感研究，测得光纤 Bragg 光栅的轴向拉伸应变灵敏度和温度灵敏度与理论值基本吻合，分析了用单个光纤 Bragg 光栅对轴向拉伸应变和温度的双参量的同时传感，实验数据显示 Bragg 波长的变化与应变和温度的变化呈良好的正比线性关系。通过实验，检验了传感实验系统的有效性、稳定性，确定了传感实验系统的测量精度。传感实验系统还用于进行了长周期塑料光纤光栅的传感实验研究，测量了长周期塑料光纤光栅的轴向拉伸应变灵敏度和温度灵敏度，实验数据显示光纤光栅的损耗峰波长的变化与应变和温度的变化呈良好的正比线性关系。

本文所做的工作还有以下可以改进和继续深入研究的地方：

进一步深入对光纤 Bragg 光栅的交叉敏感研究，探寻双参量或多参量的同时传感的方法，进行光纤 Bragg 光栅与其它光器件组合的传感研究，例如光纤 Bragg 光栅和长周期光纤光栅的组合传感、光纤 Bragg 光栅和塑料光纤光栅的组合传感等等。

展开基于光纤 Bragg 光栅的多路复用的研究，采用合适的多路复用技术或复合多路复用技术，进行光纤 Bragg 光栅传感器网络的多点传感研究。研究光纤 Bragg 光栅在复合材料中的集成、性能影响，结合以上两方面内容，拓展在光纤智能结构中的双参量同时传感和多点传感研究。研究数字信号处理技术在光纤 Bragg 光栅传感中的信息处理应用，提高波长检测精度，还可采用光栅谱形状复用提高多点传感的光纤 Bragg 光栅传感器网络的性能。

参考文献

- [1] Yan L S, Luo T, Yu Q et al. Investigation of Performance Variations Due to the Amplitude of Group-Delay Ripple in Chirped Fiber Bragg Gratings. Optical Fiber Technology, 2006, Vol. 12: 238~242
- [2] Chien H C, Lee C C, Chen Y M et al. All-Optical 2R Regeneration Based on a Compact Self-Seeded Fabry-Pérot Laser Diode with an Embedded Fiber Bragg Grating. IEEE Photonics Technology Letter, 2006, Vol. 18: 559~561
- [3] Ole H. Polarization-Resolved Spatial Characterization of Birefringent Fiber Bragg Gratings. Optics Express, 2006, Vol. 14, Issue 10: 4221~4236
- [4] Delgado-Pinar M, Zalvidea D, Diez A et al. Q-Switching of an All-Fiber Laser by Acousto-Optic Modulation of a Fiber Bragg Grating. Optics Express, 2006, Vol. 14, Issue 3: 1106~1112
- [5] Zhao Yong, Meng Qingyao, Chen Kun. Novel Current Measurement Method Based on Fiber Bragg Grating Sensor Technology. Sensors and Actuators: A, 2006, Vol. 126: 112~116
- [6] Zhao Yong, Chen Kun, Yang Jian. Novel Target Type Flowmeter Based on a Differential Fiber Bragg Grating Sensor. Measurement, 2005, Vol. 38, No.3: 230~235
- [7] Jin X, Chi H, Zhang X, Improving Frequency Response of Radio over Fiber Systems by Fiber Bragg Grating. Electronics Letters, 2006, Vol. 42, No. 6: 369~370.
- [8] Feng Xinhuan, Liu Yange, Yuan Shuzhong et al. L-Band Seitchable Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Based on a Multimode Fiber Bragg Grating. Optics Express, 2004, 12(16): 3834~3839
- [9] 涂亚庆, 刘兴长. 光纤智能结构. 北京: 高等教育出版社, 2005: 111~115
- [10] 李川, 张以谟, 赵永贵等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用. 北京: 科学出版社, 2005: 79~102
- [11] Yariv A. Coupled-mode Theory for Guided-Wave Optics. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1973, 9: 919~933
- [12] Kogelnik H. Filter Response of Nonuniform Almost-Periodic Structures. Bell System Technical Journal, 1976, 55: 109~126

批注 [shen21]: 参考文献，一级标题，三号，黑体加粗。不少于 30 篇，其中外文文献不少于 5 篇

批注 [shen22]: 按本范例格式书写

- [18] Yamada M, Sakuda K. Analysis of Almost-Periodic Distributed Feedback Slab Waveguide Via a Fundamental Matrix Approach. *Applied Optics*, 1987, 26: 3474~3478
- [19] Winick K A. Effective-Index Method and Coupled-Mode Theory for Almost Periodic Waveguide Gratings: A Comparison. *Applied Optics*, 1992, 31: 757~764
- [20] Weller-Brophy L A, Hall D G. Analysis of Waveguide Gratings: Application of Rouard's Method. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2: 864~871
- [21] Russell St J. Bloch Wave Analysis of Dispersion and Pulse Propagation in Pure Distributed Feedback Structures. *Journal of Modern Optics*, 1991, 38: 1599~1619
- [22] Frolik J L, Yagle A E. An Symmetric Discrete-Time Approach for the Design and Analysis of Periodic Waveguide Gratings. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13: 175~185
- [23] Poladian L. Graphical and WKB Analysis of Nonuniform Bragg Gratings. *Physical Reviews E*, 1993, 48: 4758~4767
- [24] Hirono T, Yoshikuni Y. A Hamiltonian Formulation for Coupled Wave Equations. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1974, 8: 1751~1755
- [25] Poladian L. Variational Technique for Nonuniform Gratings and Distributed Feedback Lasers. *Journal of the Optical Society of America A*, 1974, 11: 1846~1853
- [26] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. 7th edition, Oxford University Press, London, 1999
- [27] 蔡圣善, 朱耕, 徐建军. 电动力学. 第二版, 北京: 高等教育出版社, 2002
- [28] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论. 第二版, 北京: 电子工业出版社, 2001
- [29] 陈秉乾, 舒幼生, 胡望雨. 电磁学专题研究. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [30] Jackson J D. *Classical Electrodynamics*. 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc, 1998
- [31] 叶培大, 吴彝. 光波导技术基本理论. 北京: 人民邮电出版社, 1981
- [32] 叶培大. 光纤理论. 上海: 知识出版社, 1985
- [33] 余守宪. 导波光学物理基础. 北京: 北京交通大学出版社, 2002

- [34] 李玉权, 崔敏. 光波导理论与技术. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- [35] 张国顺, 何家祥, 肖桂香. 光纤传感技术. 北京: 水利电力出版社, 1988
- [36] Mizrabli V, Sipe J E. Optical Properties of Photosensitive Fiber Phase Gratings. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11: 1513~1517
- [37] Kogelnik H, Shank C W. Coupled Wave Theory of Distributed Feedback Lasers. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43: 2327~2335
- [38] Kogelnik H. Theory of Optical Waveguides, in *Guided-Wave Opto-Electronics*. Springer-Verlag, 1990
- [39] Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Grystals*. John-Wiley, New York, 1984
- [40] Erdogan T. Fiber Grating Spectra. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15: 1277~1294
- [41] Boon-Gyoun K, Garmire E. Comparison Between the Matrix Method and Couple-Wave Method in The Analysis of Bragg Reflector Structures. *Journal of the Optical Society of the America A*, 1992, 9: 132~136
- [42] 杨佳通. 弹性力学. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [43] 杨佰源, 张义同. 工程弹塑性力学. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [44] 李同林. 应用弹塑性力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002
- [45] 单辉祖. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [46] Othonos A, Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, Inc. , 1999

附录

批注 [xs23]: 一级标题，三号黑体加粗，居中，中间空一格。

主要列入正文内过分冗长的公式推导，供查读方便所需的辅助性数学工具或表格；重复性数据图表；论文使用的缩写、程序全文及说明等。

阅后删除此框。

致谢

批注 [shen24]: 致谢，一级标题，三号，黑体加粗，中间空一格，居中

本文的研究工作是在导师***教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。*老师引领我进入了飞速发展的光纤光栅的研究领域，研究期间，我学习了许多科学理论和研究方法，增强了创新意识，提高了思考问题和解决问题的能力，锻炼了系统设计、实验研究等技能。×××老师强烈的创新精神和严谨的治学态度，对科学始终如一的热情追求以及正直坦荡、诲人不倦的师表风范将是我学习的楷模。学习期间，每当我在学术上遇到困难，或在学习受到工作的干扰，×××老师都会给以耐心的指导、细心的关照、热情的鼓励，是×××老师的求索精神和渊博学识激励我不断探寻新知。在研究期间，*老师使我在求知和为人方面都有颇多收获，值此论文完成之际，特向×××老师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

在研究期间，我得到了 ×××教授、×××教授、×××副教授等老师们的热情关心和帮助，几位老师丰富的理论知识和实践经验给予我很大帮助，在此表示衷心的感谢。

本课题是国家自然科学基金(项目编号: ×××)和高等学校博士学科点专项科研基金（项目编号: ×××）资助项目，在此表示诚挚的感谢。

感谢×××、×××、×××、×××等同学在课题研究中给予的鼓励和帮助，感谢×××实验室×××在实验过程中的协助。

特别感谢我的父母和妻子，是他们在生活中给我温馨的关爱，在工作中给我坚定的支持，在学习中给我热情的鼓励，帮助我顺利完成了学业。

由于水平有限，论文中存在的不妥和错误之处，恳请指正。

×××

200×年×月

批注 [xs25]: 一级标题，三号，黑体加粗，居中；

个人简历、申请硕士学位期间发表的学术论文与工作成果

个人简历

197X 年 XX 月 X 日出生于××省××市。

19××年 9 月考入××大学××系××××专业，19××年 7 月本科毕业并获得××学学士学位。

19××年一至今工作经历

××××年××月—××××年××月在浙江大学××××系××××学科（专业）工程硕士研究生班学习。

发表的学术论文与工作成果

- [1] ×××, ×××, ×××. 单个光纤布喇格光栅实现应变温度同时测量的研究. 传感技术学报, 2004 (3): 449~452 (EI 检索号: 05239142438)
- [2] ×××, ×××, ×××. ×××项目, 主要负责×××部分. 项目获×××奖励. ×年×月

批注 [shen26]: 学术论文著者排名

批注 [shen27]: 项目组成员排名

此例子只表明格式要求。

论文作者发表的论文如果被检索，应在其后加括号，注明该文检索类型，检索号，或影响因子等。

阅后删除此框。