


# 光纤光栅：

## 原理、技术与传感应用

• 李川 张以谟 赵永贵 李立京 编 著

FIBER GRATING:  
PRINCIPLES, TECHNIQUES,  
AND SENSING APPLICATIONS

 科学出版社  
www.sciencep.com

# 光纤光栅：原理、技术与传感应用

李 川 张以谟 编著  
赵永贵 李立京

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书围绕光纤光栅的基本原理、制作技术和传感应用等三个方面展开讨论,主要内容有光纤的光敏性、光纤光栅的写入法、光纤光栅的模式理论、光纤光栅传感器、光纤光栅传感器的集成和数据融合及光纤光栅的传感应用。

本书可供从事光纤传感、检测、仪器仪表等理论和应用研究的科研人员、工程技术人员及高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅:原理、技术与传感应用/李川,张以谟,赵永贵,李立京编著.  
—北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016225-0

I. 光… I. ①李…②张…③赵…④李… III. ①. 光学纤维 光栅  
IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 101796 号

责任编辑:马长芳 贾瑞娜 / 责任校对:宋光光  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年10月第 1 版 开本:B5(720×1000)

2005年10月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1--3 500 字数:280 000

定价:28.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 前 言

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,在纤芯内形成空间相位光栅,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜,使得光在其中的传播行为得以改变和控制。利用光纤光栅的这一特性,可构成许多性能独特的光纤无源器件,再加之光纤本身具有低耗传输、抗电磁干扰、轻质、径细、柔韧、化学稳定及电绝缘等优点,因此,光纤光栅在光纤传感领域有着广阔的应用前景。

作为传感单元,光纤光栅的主要优势是检测信息为波长编码的具有  $10^{-6} \sim 10^{-2}$  四个数量级线性响应的绝对测量。另外,插入损耗低和窄带的波长反射提供了有利于在一根单模光纤上的复用,可实现光纤网络中的星型、串联、并联和环型连接。目前,光纤光栅传感器被视为具有推动光纤传感器进入前沿发展的潜力。

自 20 世纪 70 年代光纤传感器出现以来,已过去了近 30 年。通常,传感器的开发周期为 10 年,因此,我们拟以 10 年为周期,将光纤传感技术的发展划分为以下三个主要阶段。

第一阶段,基础实验阶段。20 世纪 70 年代,光纤的出现,验证了在光纤中传输的光的特性变化与外界待测量参量之间的关系。这一阶段的光纤传感技术借鉴了传统光学传感器的特点,其代表性的工作包括:C. D. Kissinger 等人利用光纤和透镜改善非接触的位移测量;W. F. Jacobsen 等人利用光纤和光传感器检测液位;L. Reynolds 等人利用光纤传输研究血液的漫反射系数;G. Pircher 等人研究基于 Sagnac 干涉仪的光纤旋转传感器和 C. D. Butter 等人研制的光纤应变仪等。

第二阶段,技术开发阶段。20 世纪 80 年代,单模光纤的出现,促进了光纤传感技术的发展。这一时期的主要特点是强度调制、相位调制、波长调制、偏振调制、时分调制、频率调制、光栅调制等多种光纤调制技术的发展,光纤传感技术的商业开发条件也日益成熟,一些光纤传感仪器开始投入实际应用,出现了一批光纤传感器产品,比如 Herga 的基于微弯调制的分布式光纤传感器,Honeywell 的液位传感器,Fiso Technologies 开发并由 Roctest 进行商业运作的 Fabry-Perot 干涉仪, York Sensors 的分布式 Raman 温度传感器等。

第三阶段,工程应用阶段。20 世纪 90 年代,光纤传感技术呈产业化发展,主要形成了五个应用领域,即医学和生物、电力工业、化学和环境、军事和智能结构等。

我国是从 20 世纪 80 年代开展对光纤传感技术的研究工作的,到 20 世纪 90 年代后期,已进行了大量的实验研究和技术开发工作,取得了大量的研究成果,但受光纤传感器的制作工艺和调制技术的制约,未能大规模进入工程应用。

进入 21 世纪以后,这种情况发生了明显的变化,由于光纤光栅在 20 世纪 90

年代期间生产工艺的成熟,以及相关调制技术的不断进步,我国目前已出现了专门生产光纤光栅器件的企业,这标志着我国光纤传感技术开始进入工程应用阶段。

目前,我国正处于基础建设的高峰时期,高速公路、铁路、高层建筑、桥梁、隧道、边坡等大型土木工程的建设,为我国光纤传感技术的成长和应用带来了机遇和挑战。在建筑结构健康监测这一重要的应用领域中,不但吸引了国际上生产光纤传感器的企业,而且也促进了我国光纤传感技术在工程应用方面的进步。可以认为,现阶段光纤传感器在土木工程应用的领域是我国光纤传感技术开发和工程应用的重要催化剂。现存的主要问题是,如何根据应用对象,依据理论设计出稳定可靠、价格低廉的器件。

作为一种重要的传感技术,光纤光栅传感器的内容分散于各类文献,但国内还未有专门论述光纤光栅传感器的书籍。为了推动光纤光栅传感器的设计和应用,特别是在结构测量方面的应用,反映光栅传感器技术的最新进展,特别是反映我国光栅传感技术的进步,本书将围绕光纤光栅的基本原理、制作技术和传感应用等三个方面展开讨论。

本书受云南省中青年学术与技术带头人培养项目和云南省教育厅教学、科研带头人培养项目的资助。特别地,云南航天质量无损检测站(云南航天新技术工程有限公司)利用所承担的云南省省院省校、昆明市中小企业创新和云南省交通厅等科研项目,为光纤光栅传感器的工程应用提供了研发平台。在编写的过程中,得到了云南航天监测技术有限公司、云南省科技厅、云南省教育厅、云南省交通厅、昆明市科技局、嵩待高速公路指挥部、天津建筑科学研究院、加拿大 O/E Land 公司、中国科学院地质与地球物理研究所、北京航空航天大学、天津大学和昆明理工大学等单位的支持和帮助,在此一并表示感谢。此外,对吴卫平、张汝文、熊秉衡等先生在论文写作过程中的支持,也表示真诚的谢意。同时,对未能在书中将所有关心和支持我们的人们一一写出,表示深深的歉意。

希望这本著作能够对从事光纤光栅传感技术领域的工程技术人员和高校有关教学人员有所帮助,书中系统阐述的基本原理、技术和应用等内容能够对光纤传感器研究有重要参考价值和理论意义。

张以谟

2005 年于天津大学

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 光纤光栅的重要性 .....	1
1.3 本书的主要内容 .....	5
参考文献.....	6
<b>第 2 章 光纤的光敏性</b> .....	13
2.1 引言.....	13
2.2 光纤材料的光敏性.....	14
2.3 光纤光栅的光敏类型.....	15
2.3.1 I型光栅 .....	16
2.3.2 IIA型光栅 .....	16
2.3.3 II型光栅.....	17
2.4 光纤光敏性的各向异性.....	18
2.5 锗硅光纤的光敏性机理.....	18
2.5.1 掺锗石英光纤材料光敏性的缺陷和紫外吸收谱 .....	19
2.5.2 掺锗石英光纤材料光敏性的微观机理 .....	21
2.6 光纤材料的紫外增敏技术.....	22
2.6.1 载氢增敏技术 .....	23
2.6.2 光纤材料的换原性处理 .....	24
2.6.3 多种掺杂.....	24
2.7 锗硅光纤的光敏性模型.....	25
2.7.1 色心模型.....	25
2.7.2 密致模型.....	26
2.8 非锗硅光纤的光敏性.....	28
2.9 光纤光栅的生命周期和稳定性.....	29
2.9.1 光纤光栅的热退化 .....	29
2.9.2 光纤光栅的机械强度 .....	31
参考文献 .....	32
<b>第 3 章 光纤光栅的写入法</b> .....	42

3.1	引言	42
3.2	内部写入法	42
3.3	干涉写入技术	44
3.3.1	分振幅干涉仪	44
3.3.2	分波阵面干涉仪	49
3.4	逐点写入法	51
3.5	振幅掩模写入法	52
3.6	相位掩模写入法	53
3.6.1	相位掩模的近场衍射特性	53
3.6.2	相位掩模的接触式写入法	57
3.6.3	改变相位掩模的周期	59
3.6.4	相位掩模干涉仪的非接触式写入法	61
3.7	光纤光栅的制作	64
3.7.1	光纤 Bragg 光栅	64
3.7.2	闪耀光纤光栅	65
3.7.3	啁啾光纤光栅	66
3.7.4	长周期光纤光栅	68
3.7.5	超结构光纤光栅	69
3.7.6	多重写入光纤光栅	70
3.7.7	相移光纤光栅	71
3.7.8	Moiré 光纤光栅	71
3.7.9	变速光纤光栅	72
	参考文献	72
<b>第4章</b>	<b>光纤光栅的模式理论</b>	<b>79</b>
4.1	引言	79
4.2	光纤光栅的理论模型	80
4.3	耦合模理论	83
4.3.1	纵向耦合的特点	84
4.3.2	光纤 Bragg 光栅	85
4.3.3	啁啾光纤光栅	90
4.3.4	闪耀光纤光栅	92
4.3.5	包层模耦合	93
4.3.6	辐射模耦合	94
4.3.7	长周期光纤光栅	95
4.3.8	光栅的非线性效应	97
4.4	转移矩阵法	99

4.5 Fourier 变换法 .....	101
参考文献 .....	102
<b>第 5 章 光纤光栅传感器</b> .....	<b>105</b>
5.1 引言 .....	105
5.2 光纤 Bragg 光栅传感器 .....	106
5.2.1 应变传感模型 .....	108
5.2.2 温度传感模型 .....	114
5.2.3 动态磁场的传感模型 .....	116
5.3 光纤 Bragg 光栅传感信号的检测 .....	116
5.3.1 光谱仪和多波长计 .....	117
5.3.2 边缘滤波器 .....	119
5.3.3 可调谐滤波器 .....	121
5.3.4 波长可调谐光源 .....	127
5.3.5 CCD 分光仪 .....	129
5.3.6 光纤 Fourier 变换光谱法 .....	130
5.3.7 干涉仪 .....	131
5.4 啁啾光纤光栅传感器 .....	133
5.4.1 宽带啁啾光栅传感器 .....	133
5.4.2 锥形啁啾光栅传感器 .....	134
5.4.3 非对称啁啾光栅传感器 .....	134
5.4.4 内光栅传感 .....	134
5.5 长周期光纤光栅传感器 .....	136
5.6 光纤 Bragg 光栅激光传感器 .....	138
5.6.1 单点和多点 Bragg 光栅激光传感器 .....	139
5.6.2 Bragg 光栅激光传感器的超高分辨率解调 .....	141
5.7 其他传感类型 .....	142
5.8 检测方案的偏振稳定性 .....	142
参考文献 .....	142
<b>第 6 章 光纤光栅传感器的集成和数据融合</b> .....	<b>151</b>
6.1 引言 .....	151
6.2 光纤光栅传感器的集成和数据融合模型 .....	151
6.3 复用技术 .....	153
6.3.1 波分复用 .....	154
6.3.2 时分复用 .....	157
6.3.3 空分复用 .....	159
6.4 Bragg 光栅和干涉传感器的同时检测 .....	161



6.5	温度和应变的同时测量 .....	161
6.5.1	光纤 Bragg 光栅的热机方程 .....	162
6.5.2	表观热应变 .....	163
6.5.3	热补偿的工作原理 .....	164
6.5.4	外温度补偿 .....	165
6.5.5	内温度补偿 .....	166
6.5.6	应变和温度的交叉敏感 .....	174
6.6	Bragg 光栅干涉传感器 .....	174
6.6.1	作为 Bragg 反射器的反射传感阵列 .....	174
6.6.2	使用 Bragg 反射器的嵌套式光纤干涉仪 .....	175
6.6.3	基于 Bragg 光栅的 Fabry-Perot 传感器 .....	176
6.6.4	基于啁啾光栅的多波长 Fabry-Perot 传感器 .....	177
6.7	光纤智能结构 .....	178
6.7.1	光纤光栅结构传感器的安装 .....	179
6.7.2	光纤埋入对结构的影响 .....	184
6.7.3	传感器的规格 .....	186
	参考文献 .....	187
<b>第 7 章</b>	<b>光纤光栅的传感应用</b> .....	<b>199</b>
7.1	航空航天 .....	200
7.2	舰船 .....	201
7.3	土木工程 .....	202
7.4	石化工业 .....	207
7.5	电力工业 .....	208
7.6	核工业 .....	209
7.7	医学 .....	211
7.8	其他应用 .....	212
7.9	现状与展望 .....	212
	参考文献 .....	213

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着低损耗光波导在 20 世纪 60 年代的实现,光纤已经发展成为现代通信和光传感网络的代名词。对当时基于光纤的网络而言,其中的一个主要缺陷是必须依靠体积光学来调整和控制导波光束<sup>[1,2]</sup>。

1978 年, K. O. Hill 等人<sup>[3,4]</sup>发现了光纤的光敏性,从而导致了—种所谓光纤 Bragg 光栅(fiber Bragg grating)的新型光纤内纤型无源器件的出现,其中,在光纤 Bragg 光栅中衍射的光满足 Bragg 衍射条件。并且,随着光纤光栅写入技术的不断完善,应用成果的日益增多,光纤光栅成为目前最有发展前途、最具有代表性的光纤无源器件之一<sup>[5~8]</sup>。

光纤光栅<sup>[9~11]</sup>是利用光纤材料的光敏性(如外界入射光子和纤芯内锗离子相互作用引起折射率的永久性变化),在纤芯内形成空间相位光栅,其作用实质是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜。利用这一特性可构成许多性能独特的光纤无源器件,再加之光纤本身具有低耗传输、抗电磁干扰、轻质、径细、柔韧、化学稳定及电绝缘等优点,因此,光纤光栅在光纤通信、光纤传感和光信息处理等领域均有着广阔的应用前景。

## 1.2 光纤光栅的重要性

利用光纤在紫外光照射下产生的光致折射率变化的效应,在纤芯上形成周期性的折射率调制分布,从而对入射光波中相位匹配的频率产生相干反射,可以在典型的  $10^{-1} \sim 10^2$  nm 的带宽内产生反射,反射率可达 100%。光纤光栅的这一重要的波长选择特性使之成为光纤器件中一种重要的无源器件,其在光纤系统中的作用类似于传统光学系统中的镜片,光纤光栅的出现导致了必须重新考虑光纤系统设计的每一个细节。

光纤光栅易于同光纤系统集成,已在光纤通信、光纤传感和光信息处理等领域得到了广泛应用,主要内容如下。

### 1. 半导体激光器

在半导体激光器的尾纤上靠近输出端写入窄带光纤 Bragg 光栅,只要光纤

Bragg 光栅的反射波长在半导体的增益带宽范围内,就可得到相应 Bragg 波长的单模激光输出<sup>[12~14]</sup>。这种混合的光纤光栅半导体激光器与传统的 DFB (distributed feedback)<sup>[15]</sup>或 DBR (distributed Bragg reflect)<sup>[16]</sup>激光器相比,具有两个明显的优点:

(1) 对温度和电流变化的敏感度大大降低。

(2) 成本低。

因此,光纤 Bragg 光栅在半导体激光器的稳频中得到了广泛应用,特别是在大功率激光器,如 980 nm 和 1480 nm 的泵浦激光器上应用较多。

## 2. 光纤激光器

利用光纤光栅的窄带滤波可实现稳定的、高功率的线性腔和环形腔激光输出,无论在连续激光器还是脉冲激光器(如锁模光纤激光器)中都有应用。

### 1) 线性腔光纤激光器

Bragg 波长相同的光纤 Bragg 光栅对可以作为线性腔激光器的腔镜,提供波长选择反馈,以掺铒光纤为增益介质可得到单模激光输出<sup>[17,18]</sup>。这种光纤 Fabry-Perot 激光器具有结构简单、与光纤兼容、噪声低、线宽窄(千赫量级)和输出功率可控制等优点,可应用于光学有线电视(community antenna television, CATV)网络<sup>[19]</sup>和 WDM 通信系统<sup>[20]</sup>。同样的结构可应用于铒镱共掺光纤激光器<sup>[21,22]</sup>、包层泵浦光纤激光器<sup>[23,24]</sup>、Raman 光纤激光器<sup>[25,26]</sup>和 Brillouin 光纤激光器<sup>[27]</sup>。在 Raman 光纤激光器中,利用多对光纤 Bragg 光栅并使相邻 Bragg 波长的差值在 Raman 增益频移范围内,可在一段光纤上形成 Raman 梯<sup>[25,26]</sup>,从而将激光能量移到需要的波长。

### 2) 非线性腔光纤激光器

非线性腔,如环形腔<sup>[28]</sup>和 Sagnac 型<sup>[29]</sup>等行波腔能够避免光谱烧孔效应,腔内允许使用的光纤长度也大大增加,因此可使用低掺杂浓度的铒光纤。光纤 Bragg 光栅可提供反射型滤波,有利于波长调谐和控制。用这种方法得到的激光线宽窄为 1530 nm 的单频输出线宽只有 35 kHz<sup>[29]</sup>,波长调谐范围可达 41 nm<sup>[30]</sup>。

## 3. 光纤放大器

光纤 Bragg 光栅与掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)配合使用可提高 EDFA 的性能,具体体现在以下三个方面。

### 1) 反射泵浦

光纤 Bragg 光栅插入 EDFA 光路,用于反射泵浦残余光时,既可提高泵浦效率,又可有效地阻止残余泵浦光在系统中继续传输<sup>[31]</sup>。用于此目的的光纤 Bragg 光栅一般要求宽带、高反射率。在光纤 Raman 放大器中对光纤 Bragg 光栅也有同

样的要求<sup>[32]</sup>。

### 2) 增益平坦

在通信系统中,为了补偿能量的衰减,一定要引入 EDFA,但 EDFA 的波长增益曲线不平坦会引起误码率的提高。利用 Bragg 光栅<sup>[33]</sup>、闪耀光纤光栅<sup>[34]</sup>或长周期光纤光栅<sup>[35]</sup>,均可实现增益平坦。比如,采用长周期光纤光栅,可分别在 30 nm 和 40 nm 的范围内将 EDFA 的增益起伏控制在 0.2 dB 和 1 dB 的水平<sup>[36]</sup>。

### 3) 增益锁定

用两个波长相同的光纤 Bragg 光栅或一只光纤 Bragg 光栅的环形腔结构在 EDFA 内形成激光,可自动调节 Er 离子上能级粒子数分布,在信号功率突变时保持相对稳定的增益,从而实现 EDFA 的增益控制和锁定<sup>[37]</sup>。

## 4. 光纤滤波器

### 1) 基本的滤波器

不同类型的光纤光栅具有不同的透射或反射特性,可直接作为带通滤波器,若与光纤耦合器或环形器结合可得到相反滤波特性的带反滤波器<sup>[38~43]</sup>。

### 2) 干涉带通滤波器

基于光纤光栅的干涉带通滤波器有以下三种基本形式。

(1) 3 dB 耦合器同侧的两个端口各接一个 Bragg 波长相同的光纤 Bragg 光栅,可构成 Michelson 干涉结构<sup>[44]</sup>。

(2) 一只 3 dB 耦合器同侧的两个端口与另一只 3 dB 耦合器同侧的两端口中间用相同波长的两只光纤 Bragg 光栅串接,可构成 Mach-Zehnder 型干涉滤波器<sup>[45]</sup>。

(3) 一只 3 dB 耦合器同侧的两个端口各与一根光纤的两端相接,另一侧的一端接一只光纤 Bragg 光栅,可构成 Saganac 型干涉滤波器<sup>[46]</sup>。

### 3) Fabry-Perot 滤波器

相同中心波长的光纤 Bragg 光栅或啁啾光纤光栅对串接入光纤,可构成 Fabry-Perot 滤波器。这种滤波器具有高达数千的精细度,可用于短脉冲激光器和宽带光通信系统<sup>[47]</sup>。

### 4) 内耦合器 Bragg 光栅滤波器

这种滤波器将光栅写入光纤耦合器的耦合区,可构成多种内耦合器型光分插复用器(optical add and drop multiplexer, OADM),如光栅辅助耦合器(grating-assisted coupler, GAC)<sup>[48]</sup>、光栅受抑耦合器(grating-frustrated coupler, GFC)<sup>[49]</sup>、双 Bragg 反射耦合器(two bragg reflecting coupler, TBRC)<sup>[50]</sup>和熔锥光纤 Bragg 光栅耦合器(fused fiber bragg grating coupler, FFBRC)<sup>[51]</sup>等。

### 5. 波分复用/解复用器

光纤 WDM 系统在一路光纤中传输多个波长的信号,要进行不同波长信道的分插复用,因此需要波分复用/解复用器。插入损耗低、集成度高和波长稳定性好是系统对此类器件的要求。光纤光栅与光纤耦合器、环形器、光开关等有机结合,可制成波分复用/解复用器<sup>[52~55]</sup>。

### 6. 色散补偿

制约高速光通信的一个主要因素是色散,色散导致了在光纤中传输的脉冲信号中的不同波长成分以不同的群速度传播,从而引起数据脉冲的展宽,增加了误码率。利用啁啾光纤光栅的大色散特性可有效地补偿脉冲信号产生的色散<sup>[56~59]</sup>,其中可调节啁啾光纤光栅还可调节色散补偿的大小。

### 7. 光学信息补偿

在光学信息处理领域,光纤光栅可用于光纤相位调节器(optical fiber phase conjugator)<sup>[31,60]</sup>、光学 Fourier 变换器(optics fourier convertor)<sup>[61]</sup>和相位阵列天线(phased-array antenna)<sup>[62]</sup>等。

### 8. 光纤传感器

基于光纤光栅的传感过程是通过外界参量对其 Bragg 波长的调制来获取传感信息,这是一种波长(或光栅)调制型光纤传感器。作为传感单元,光纤光栅具有以下优点<sup>[63~68]</sup>。

(1) 波长编码是一种绝对测量方式,具有自校正功能。在对光纤进行定标后,光纤光栅的波长信息就提供了一种绝对变化值,即无需知道前一时刻的测量值。其特点是系统重新启动后,传感系统获得的传感信息不会丢失。与此相比,相对测量方法就必须知道前一时刻的测量值;若重新启动传感系统后,传感信息会丢失,即关闭系统前后获得的两段传感信息没有关系。

(2) 抗干扰能力强。一方面,若忽略光纤中的非线性效应,普通的传输光纤不会影响光的频率特性。另一方面,光纤光栅传感系统从本质上排除了各种光强起伏引起的干扰,因为光源强度的起伏、光纤微弯效应引起的随机起伏和耦合损耗等都不可能影响传感信号的波长特性。

(3) 传感探头结构简单,尺寸小(其外径和光纤本身相同)。

(4) 测量结果具有良好的重复性。

(5) 便于构成各种形式的光纤传感网络。

(6) 光纤光栅的写入工艺日渐成熟,便于规模生产。

光纤光栅的传感机制包括应变(strain)<sup>[69]</sup>引起的弹性形变(elastic distortion)和弹光效应(strain-optic effect),温度(temperature)<sup>[69]</sup>引起的热膨胀效应(thermal expansion effect)和热光效应(thermo-optic effect),以及磁场(magnetic field)<sup>[70]</sup>引起的 Faraday 效应,如附表 1.1 所示。

利用上述基本效应,光纤光栅可制成用于检测应力<sup>[71~73]</sup>、应变<sup>[74~76]</sup>、温度<sup>[77~79]</sup>、压力<sup>[80~82]</sup>、振动<sup>[83~85]</sup>、磁场<sup>[86~88]</sup>和电流<sup>[89~91]</sup>等多种参量的光纤传感器和光纤传感网。目前,除在航空航天飞行器<sup>[92~97]</sup>、舰船<sup>[98~100]</sup>及武器系统<sup>[101~103]</sup>等军事应用外,还扩展到诸如建筑<sup>[104~106]</sup>、桥梁<sup>[107~109]</sup>、隧道<sup>[110~112]</sup>、电力工业<sup>[113~115]</sup>、生物医学工程<sup>[116~118]</sup>等民用领域。

光纤光栅传感器的通用性被认为是优于传统机电式传感器的主要原因,因为传感器的通用性使得只用一套测量设备就可以检测出多种测量参量,从而促使检测仪器的通用化。因此,光纤光栅传感器具有推动光纤传感器进入前沿发展的潜力。

### 1.3 本书的主要内容

光纤光栅的基本技术和理论散见于众多文献,但目前我国未有专门论著对之进行全面的介绍。为了能够根据应用对象,依据理论设计出稳定可靠、价格低廉的光栅传感器件;指导光纤光栅传感器的设计和应用;反映光纤光栅传感器的最新进展,特别是反映我国光纤光栅传感技术的进步;本书将围绕光纤光栅的原理、技术和传感应用等三个方面展开讨论。

光纤光敏性的发现,提供了在纤芯中直接写入稳定折射率周期分布的方法,为光纤技术开辟了新的研究领域。研究光纤光敏性对寻找光敏性光纤,提高光栅特性,以及寻找制作光栅的最佳光源具有重要作用。第 2 章通过实验现象(包括光纤材料的光敏性、光纤光栅的光敏类型、光纤光敏性的各向异性等)引入了光纤的光敏性,并对掺锗光纤的缺陷、紫外吸收谱和其微观机理等方面进行了介绍。但必须指出,光纤材料光敏效应的发现距今已有 20 多年,其物理起因和微观机理目前还不是十分清楚,一方面是光致折射率变化的复杂性,另一方面是缺乏足够充分和详细的实验资料。特别是当光纤材料的载氢、换原性、多掺杂等紫外增敏技术提出以后,各种新的实验现象导致了各种经验和半经典模型的出现,但所有的实验结果都暗示了锗硅光纤光敏性的两种主要机理,即色心模型和密致模型。但问题并未完全解决,随着非锗硅光纤光敏性的发现,研究又进入了实验现象的积累阶段。因此,对光纤材料的光敏性及光栅写入技术的研究不仅具有现实的经济意义,而且具有重要的科学价值。

光纤光栅的写入技术推动了光栅技术的进步。第 3 章全面介绍了光栅的重要

写入技术,包括:1978年,K.O.Hill等人发现了光纤的光敏性时所采用的具有里程碑意义的内写入法;1989年,G.Meltz等人发明的紫外侧写的分振幅干涉法,该技术的出现使得光纤光栅技术得到了迅速发展;1993年,K.O.Hill等人采用的相位掩模衍射法,使光纤光栅的批量生产成为可能等。最后,介绍了常见的基本光纤光栅(如光纤 Bragg 光栅、闪耀光纤光栅、啁啾光纤光栅、长周期光纤光栅)和衍生光纤光栅(如超结构光纤光栅、多重写入光纤光栅、相移光纤光栅、Moiré 光纤光栅和变迹光纤光栅等)及其写入。

从光学的层面描述光栅-电场交互作用的物理机理,第4章介绍了目前常见的分析光纤光栅的模式理论。最早发展起来的分析技术是光在光栅中传播的耦合模理论,这一方法是分析光在波导介质中传播的基础,尤其适用于光纤 Bragg 光栅传感器。但耦合模理论对啁啾、相移等非均匀周期光栅的分析过于烦琐。因此,转移矩阵分析法和 Fourier 变换法也被用于分析光纤光栅。

在研究的早期,光纤 Bragg 光栅就被认为是理想的传感单元。第5章详细介绍了目前工程中得到了广泛应用的光纤 Bragg 光栅的传感原理,包括应变、热和磁场等;以及对 Bragg 波长移位的检测,包括光谱仪和多波长计、边缘滤波器、可调谐滤波器、波长可调谐光源、CCD 分光计、光纤 Fourier 变换光谱法和干涉仪等。后来,随着其他光纤光栅的出现,光纤光栅传感器的种类也日益丰富。第5章还介绍了啁啾光纤光栅传感器、长周期光纤光栅传感器及光纤 Bragg 光栅激光传感器等。

由于光波和光纤光栅的基本性质和易于进行多路传输和调制的特点,可在多种不同应用场合下采用多传感器方式配置阵列,以满足多种不同的测量要求。为充分发挥光纤 Bragg 光栅的传感特点和适应未来的应用趋势。第6章给出了多光纤光栅传感器的集成和数据融合模型,主要内容有复用技术(波分复用、时分复用、空分复用及其混合复用)、Bragg 光栅和干涉传感器的同时检测、光纤 Bragg 光栅的热机方程、热表现应变、热补偿、温度和应变的同时测量、应变和温度的交叉敏感、Bragg 光栅干涉传感器和光纤智能结构等。

作为传感单元,光纤光栅的主要优势是检测信息为波长编码的具有从  $10^{-6}$ ~ $10^{-2}$  四个数量级线性响应的绝对测量,以及质轻、径细、柔韧、化学性能稳定、耐高温和抗电磁干扰(EMI)等物性优势。第7章介绍了光纤光栅目前的主要应用领域,如航空航天、航海和土木工程、石化工业、电力工业、核工业和医学等。

### 参考文献

- 1 Born M, Wolf E. Principle of Optics, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7 th, 1999
- 2 Solymar L, Cooke D J. Volume Holography and Volume Gratings, Academic Press, London, UK, 1981
- 3 Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, Kawasaki B S. Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication, Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647~649
- 4 Kawasaki B S, Hill K O, Johnson D C, Fujii Y. Narrow-Band Bragg Reflectors in Optical Fibers, Optics

- Letters, 1978, 3; 66~68
- 5 Bogue R W. Seminar Report: Sensor Innovation and Technology Transfer Event 2003, *Sensor Review*, 2004, 24(2); 129~136
  - 6 Kirkendall C K, Dandridge A. Anthony, Overview of High Performance Fibre-Optic Sensing, *Journal of Physics D, Applied Physics*, 2004, 37(18); R197~R216
  - 7 Fuhr P L. Measuring with Light. Part 4; Sensor and Communications Component Compatibilities, *Sensors*, 2000, 17(7); 68~72
  - 8 Webb D J. Optical-Fiber Sensors; An Overview, Source; *MRS Bulletin*, 2002, 27(5); 365~369
  - 9 Vasiliev S A. Photoinduced Fiber Gratings, *SPIE*, 2001, 4357; 1~12
  - 10 Canning J. Grating Confinement in a Photonic Crystal Fibre, *Optics Communications*, 2000, 176(1); 121~124
  - 11 Bhatia V. Properties and Applications of Fiber Gratings, *SPIE*, 2001, 4417; 154~160
  - 12 Brinkmayer E, Brennecke W, Zürn M, Ulrich R. Fiber Bragg Reflector for Mode Selection and Line-Narrowing of Injection Laser, *Electronics Letters*, 1986, 22; 134~135
  - 13 Mahgerefteh D et al. Improving the Performance of All-Optical Wavelength Converters Using Fiber Gratings, *Fiber and Integrated Optics*, 1999, 18(3); 155~166
  - 14 Zervas M et al. Fiber Distributed-Feedback Lasers and Dispersion Compensators, *SPIE*, 1999, 3896; 762~768
  - 15 Bissessur H et al. WDM Operation of a Hybrid Emitter Integrating a Wide-Bandwidth On-Chip Mirror, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(3); 476~479
  - 16 Ohno T et al. Application of DBR Mode-Locked Lasers in Millimeter-Wave Fiber-Radio System, *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(1); 44~49
  - 17 Ball G A, Glenn W H. Design of a Single-Mode Linear-Cavity Erbium Fiber laser Utilizing Bragg reflectors, *Journal Lightwave Technique*, 1992, 10; 1338~1343
  - 18 Shamoon D M, Elmizghani J M H, Cryan R A. Erbium Doped Fiber Amplifier Systems with Fiber Bragg Grating Optical Filters, *Journal of Optical Communications*, 1999, 20(5); 188~193
  - 19 Temmyo J et al. Low Noise Characteristics of an AM-VSB Video Signal Transmission Using a PDPA Pumped by InGaAs Semiconductor Lasers Through Fibre Bragg gratings, *Electronics Letters*, 1996, 32(20); 1910~1912
  - 20 Ibsen M, Fu A, Geiger H, Laming R I. All-Fibre  $4 \times 10$  Gbit/s WDM Link with DFB Fibre Laser Transmitters and Single Sinc-Sampled Fibre Grating Dispersion Compensator, *Electronics Letters*, 1999, 35(12); 982~983
  - 21 Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, Payne D N.  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  Co-Doped Fiber DFB laser, *Optics Letters*, 1994, 19; 2101~2103
  - 22 Xu Y Z, Tam H Y, Liu S H, Demokan M S. Pump Induced Lasing Wavelength Uncertainty in Er/Yb Co-Doped Fiber Grating Lasers, *SPIE*, 1999, 3847; 206~212
  - 23 Zentano L A. High-Power Double-Clad Fiber Laser, *Journal Lightwave Technique*, 1993, 11; 1435~1446
  - 24 Hewlett S J et al. Cladding-Mode Coupling Characteristics of Bragg Gratings in Depressed-Cladding Fibre, *Electronics Letters*, 1995, 31(10); 820~822
  - 25 Kim N S et al. 1239/1484 nm Cascaded Phosphosilicate Raman Fiber Laser with CW Output Power of



- 1.36 W at 1484 nm Pumped by CW Yb-Doped Double-Clad Fiber Laser at 1064 nm and Spectral Continuum Generation, *Optics Communications*, 2000, 176(1): 219~222
- 26 Chang D L, Lee H K, Kim K H. Cascaded Raman Fibre Laser Operating at 1.48 $\mu$ m, *Electronics Letters*, 1999, 35(22): 1951~1952
- 27 Lecoecuche V et al. Bragg Grating Based Brillouin Fibre Laser, *Optics Communications*, 2000, 177(1): 303~306
- 28 Liaw S K, Ho K P, Chi S. Externally-Modulated High-Power Fiber Grating Ring Laser For Digital Transmission, *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, 30(5): 403~408
- 29 Gloag A J, Langford N, Bennion I, Zhang L. Single-Frequency Travelling-Wave Erbium Doped Fibre Laser Incorporating a Fibre Bragg Grating, *Optics Communications*, 1996, 123: 553~557
- 30 Guan B O et al. Temperature-Tuned Erbium-Doped Fiber Ring Laser with Polymer-Coated Fiber Grating, *Optics Communications*, 2002, 202: 331~334
- 31 Giles C R. Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings, *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15: 1391~1404
- 32 Dianov E M et al. Demonstration of 1.3  $\mu$ m Raman Fiber Amplifier Gain of 25 dB at a Pumping Power of 300 mW, *Optical Fiber Technology*, 1995, 1: 236~238
- 33 Rochette M et al. Gain Equalization of EDFA's with Bragg Gratings, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(5): 536~538
- 34 Kashyap P, Wyatt R, Campbell R J. Wideband Gain Flattened Erbium Fiber Amplifier Using a Photosensitive Fiber Blazed Grating, *Electronics Letters*, 1993, 29: 154~156
- 35 Archambault J L, Grubb S G. Fiber Gratings in Lasers and Amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1378~1390
- 36 Mahdi M A et al. Gain-Clamped Fibre Amplifier Using an ASE end Reflector, *Optics Communications*, 2000, 177(1): 195~199
- 37 Bryce J, Yoffe G, Zhao Y, Minasian R. Tunable, Gain-Clamped EDFA Incorporating Chirped Fibre Bragg Grating, *Electronics Letters*, 1998, 34(17): 1680~1681
- 38 Zengerle R, Leminger O. Phase-Shifted Bragg-Grating Filters with Improved Transmission Characteristics, *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(2): 2354~2358
- 39 Legoubin S et al. Formation of Moiré Gratings in Core of Germanosilicate Fiber by Transverse Holographic Double Exposure, *Electronics Letters*, 1991, 27(21): 1945
- 40 Jayaraman V, Cohen D A, Coldren L A. Demonstration of Broadband Tenability of a Semiconductor Laser Using Sampled Gratings, *Applied Physics Letters*, 1992, 60(19): 2321~2323
- 41 Othonos A, Lee X, Measures R M. Superimposed Multiple Bragg Gratings, *Electronics Letters*, 1994, 30: 1620~1621
- 42 Eggleton B J, Krug P A, Poladian L, Ouellette F. Long Periodic Superstructure Bragg Gratings in Optical Fibers, *Electronics Letters*, 1994, 30: 1620~1621
- 43 Vengsarkar A M et al. Long-Period Fiber Grating as Band-Rejection Filters, *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14: 58~65
- 44 Augustsson T. Proposal of a DMUX with a Fabry-Perot All-Reflection Filter-Based MMIMI Configuration, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(3): 215~217
- 45 Chen Y K et al. Mach-Zehnder Fiber-Grating-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical