

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… II. ①李…②张…③赵…④李… III. 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:朱光光
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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 10 月第 一 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,但国内还从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

第 1 章 绪论	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
第 2 章 光纤的光敏性	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 掺锗光纤的光敏性机理	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 掺锗光纤的光敏性模型	25
2.7.1 色心模型	25
2.7.2 密致模型	26
2.8 非掺锗光纤的光敏性	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
第 3 章 光纤光栅的写入法	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	变迹光纤光栅	72
	参考文献	72
第 4 章	光纤光栅的模式理论	79
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
第 5 章 光纤光栅传感器	105
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
第 6 章 光纤光栅传感器的集成和数据融合	151
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
第 7 章	光纤光栅的传感应用	199
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^[1,2]。

1978 年, K. O. Hill 等人^[3,4]发现了光纤的光敏性,从而导致了一种所谓光纤 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^[5~8]。

光纤光栅^[9~11]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^[12-14]。这种混合的光纤光栅半导体激光器与传统的 DFB (distributed feedback)^[15]或 DBR (distributed Bragg reflect)^[16]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^[17,18]。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^[19]和 WDM 通信系统^[20]。同样的结构可应用于铒镱共掺光纤激光器^[21,22]、包层泵浦光纤激光器^[23,24]、Raman 光纤激光器^[25,26]和 Brillouin 光纤激光器^[27]。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^[25,26],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^[28]和 Sagnac 型^[29]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^[29],波长调谐范围可达 41 nm^[30]。

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^[31]。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^[32]。

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^[33]、闪耀光纤光栅^[34]或长周期光纤光栅^[35],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^[36]。

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^[37]。

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^[38-43]。

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^[44]。

(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^[45]。

(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^[46]。

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^[47]。

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)^[48]、光栅受抑耦合器(grating-frustrated coupler, GFC)^[49]、双 Bragg 反射耦合器(two bragg reflecting coupler, TBRC)^[50]和熔锥光纤 Bragg 光栅耦合器(fused fiber bragg grating coupler, FFBRC)^[51]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^[52-55]。

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^[56-59],其中可调谐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)^[31,60]、光学 Fourier 变换器(optics fourier convertor)^[61]和相位阵列天线(phased-array antenna)^[62]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^[63-68]。

(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)^[69]引起的弹性形变(elastic distortion)和弹光效应(strain-optic effect),温度(temperature)^[69]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)^[70]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^[71~73]、应变^[74~76]、温度^[77~79]、压力^[80~82]、振动^[83~85]、磁场^[86~88]和电流^[89~91]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^[92~97]、舰船^[98~100]及武器系统^[101~103]等军事应用外,还扩展到诸如建筑^[104~106]、桥梁^[107~109]、隧道^[110~112]、电力工业^[113~115]、生物医学工程^[116~118]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 and 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 Solyman 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, Elmighani 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 PDFA 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 4×10 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 Kringelbotn 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 μm , *Electronics Letters*, 1999, 35(22): 1951~ 1952
- 27 Lecoecue 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 μm 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 MMIM1 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

- Add-Drop Multiplexer for DWDM Networks, *Optics Communications*, 1999, 169(1): 245~ 262
- 46 Shu X, Jiang S, Huang D. Fiber Grating Sagnac Loop and its Multiwavelength-Laser Application, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(8): 980~ 982
- 47 Johlen D, Klose P, Renner H, Brinkmeyer E. Fiber Fabry-Perot Interferometer with Mode-Converting Bragg Gratings, *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(11): 1575~ 1582
- 48 Dong L et al. Novel Add/Drop Filters for Wavelength-Division-Multiplexing Optical Fiber Systems Using a Bragg Grating Assisted Mismatched Coupler, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1656~ 1658
- 49 Archambault J L et al. Novel Channel-Dropping Filter by Grating-Frustrated Coupling in Single-Mode Optical Fiber, *Conference on Optical Fiber Communication*, 1994, 4: 51
- 50 Orlov S S, Yariv A, Van Essen S. Coupled Mode Analysis of Fiber Optic Add-Drop Filters for Dense Wavelength Division Multiplexing, *Optics Letters*, 1997, 22(10): 688~ 690
- 51 Bakhti F, Daxhelet X, Sansonetti P, Lacroix S. Influence of Bragg Grating Location in Fused 100% Coupler for Add and Drop Multiplexer Realization, *Conference on Optical Fiber Communication*, 1998: 333~ 334
- 52 Song J H, Taguchi Y, Sasaki M, Hane K. Tunable Wavelength Filter Using Fiber Bragg Gratings Combined with a Surface Micro-Machining Technology, *SPIE*, 2001, 4416: 478~ 481
- 53 Barozzi G et al. Configurable OADM Based on Novel Tunable Bragg Grating, *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS*, 2000, 549~ 550
- 54 Liu B, Shakouri A, Abraham P, Bowers J E. Optical Add/Drop Multiplexer Based on X-Crossing Vertical Coupler Filters, *Conference on Optical Fiber Communication*, 2000, 266~ 268
- 55 Sansonetti P. Novel Passive Fibre Grating Based Devices, *European Conference on Optical Communication*, 1998, 1: 187~ 188
- 56 Das M, Thyagarajan K. Wavelength-Division Multiplexing Isolation Filter Using Concatenated Chirped Long Period Gratings, *Optics Communications*, 2001, 197(1): 67~ 71
- 57 Chen Z, Lu C, Ng J H, Cheng T H. Electrically Tunable Chirped Fiber Bragg Gratings by a Bulk Distributed Heater, *SPIE*, 2001, 4289: 119~ 121
- 58 Simova E, Berini P, Grover C P. Characterization of Wavelength-Selective Fiber-Optic Devices Using a Modified Phase-Shift Method, *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(5): 717~ 731
- 59 Lima M J N, Teixeira A L J, da Rocha J R F. Simultaneous Filtering and Dispersion Compensation in WDM Systems Using Apodized Fibre Gratings, *Electronics Letters*, 2000, 36(16): 1412~ 1414
- 60 Kawanishi T et al. Reciprocating Optical Modulation for Harmonic Generation, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(8): 854~ 856
- 61 Iida M, Asakura H. Computer Controlled Narrow Bandpass Optical Tunable Filter Using a Fourier Diffraction Grating in the Range of 1.3~ 1.55 μm , *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(12): 2343~ 2348
- 62 Wang X, Chan K T. Tunable All-Optical Incoherent Bipolar Delay-Line Filter Using Injection-Locked Fabry-Perot Laser and Fibre Bragg Gratings, *Electronics Letters*, 2000, 36(24): 2001~ 2003
- 63 Kersey A D et al. Fiber Grating Sensors, *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442~ 1463
- 64 Dakin J P, Volanthen M. Distributed and Multiplexed Fibre Grating Sensors, Including Discussion of Problem Areas, *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, E83-C(3): 391~ 399

- 65 Breidne M. Fibre Bragg Gratings—A Versatile Photonics Component, SPIE, 2000, 4016: 104~ 111
- 66 Zhang L, Shu X, Bennion I. Advances in UV-Inscribed Fiber Grating Optic Sensor Technologies, Proceedings of IEEE Sensors, 2002, 1(1): 31~ 35
- 67 Caucheteur C et al. Fiber Bragg Grating Sensor Demodulation Technique By synthesis of Grating Parameters from its Reflection Spectrum, Optics Communications, 2004, 240(4): 329~ 336
- 68 Zhao Y, Liao Y B. Discrimination Methods and Demodulation Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors, Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(1): 1~ 18
- 69 Meltz G, Morey W W. Bragg Grating Formation and Germanosilicate Fiber Photosensitivity, SPIE, 1991, 1516: 185~ 199
- 70 Kersey A D, Marrone M J. Fiber Bragg Grating High-Magnetic-Field Probe, 10 th Optical Fibre Sensors Conference, 1994: 53~ 56
- 71 Wu Z J et al. Measurement of Process-Induced Stresses in Composite Laminates by FBG Sensors, International SAMPE Technical Conference, 2004, 3217~ 3224
- 72 Baker L K et al. Fiber Bragg Gratings for Stress Field Characterization Inside a Connector, SPIE, 1999, 3848: 207~ 211
- 73 Maier R R J et al. Temperature Dependence of the Stress Response of Fibre Bragg Gratings Source: Measurement Science and Technology, 2004, 15(8): 1601~ 1606
- 74 Cusano A et al. Dynamic Strain Measurements by Fibre Bragg Grating Sensor Source: Sensors and Actuators, A: Physical, 2004, 110(1): 276~ 281
- 75 Song C, Lee S K, Jeong S H, Lee B H. Absolute Strain Measurements Made with Fiber Bragg Grating Sensors, Applied Optics, 2004, 43(6): 1337~ 1341
- 76 Prabhugoud M, Peters K. Modified Transfer Matrix Formulation for Bragg Grating Strain Sensors Source: Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(10): 2302~ 2309
- 77 Mandal J et al. Bragg Grating-Based Fiber-Optic Laser Probe for Temperature Sensing, IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(1): 218~ 220
- 78 Zhan Y G et al. Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with Enhanced Sensitivity, SPIE, 2004, 5279: 661~ 667
- 79 Nishi H, Nishii J. Temperature Sensor Using a Long-Period Fiber Grating, SPIE, 2001, 4416: 166~ 169
- 80 Sheng H J et al. A Lateral Pressure Sensor Using a Fiber Bragg Grating, IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 1146~ 1148
- 81 Sheng H J et al. High-Sensitivity Pressure Sensor Based on a Fiber Bragg Grating, SPIE, 2004, 5272: 248~ 254
- 82 Tjin S C et al. A Pressure Sensor Using Fiber Bragg Grating, Fiber and Integrated Optics, 2001, 20(1): 59~ 69
- 83 Gangopadhyay T K. Prospects for Fibre Bragg Gratings and Fabry-Perot Interferometers in Fibre-Optic Vibration Sensing, Sensors and Actuators, A: Physical, 2004, 113(1): 20~ 38
- 84 Yoon Y et al. Vibration Detection for a Composite Smart Structure Embedded with a Fiber Grating Sensor, SPIE, 2003, 5050: 350~ 357
- 85 Lee K O, Chiang K S, Chen Z. Temperature-Insensitive Fiber-Bragg-Grating-Based Vibration Sensor, SPIE, 2001, 4317: 585~ 590
- 86 Gramotnev D K, Goodman S J, Pile D F P. Grazing Angle Scattering of Electromagnetic Waves in

- Gratings with Varying Mean Parameters, *Journal of Modern Optics*, 2004, 51(1): 13~ 29
- 87 Liu Y Q, Chiang K S, Chu P L. Multiplexing of Temperature-Compensated Fiber-Bragg-Grating Magnetostrictive Sensors with a Dual-Wavelength Pulse Laser, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 572~ 574
- 88 Yi B, Chu B C B, Chiang K S. Temperature Compensation for a Fiber-Bragg-Grating-Based Magnetostrictive Sensor, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 36(3): 211~ 213
- 89 Lee Y W, Yoon I, Lee B. A Simple Fiber-Optic Current Sensor Using a Long-Period Fiber Grating Inscribed on a Polarization-Maintaining Fiber as a Sensor Demodulator, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2004, 112(2): 308~ 312
- 90 Gong J M et al. Fiber Bragg Grating Current Sensor Using Linear Magnetic Actuator, *Optical Engineering*, 2002, 41(3): 557~ 558
- 91 Anon. Hybrid Bragg Grating Enables Optical Current Sensor, *Photonics Spectra*, 2003, 37(10): 24~ 27
- 92 Wood K et al. Fiber Optic Sensors for Health Monitoring of Morphing Airframes: I. Bragg Grating Strain and Temperature Sensor, *Smart Materials and Structures*, 2000, 9(2): 163~ 169
- 93 Wood K et al. Fiber Optic Sensors for Health Monitoring of Morphing Airframes: II. Chemical Sensing Using Optical Fibers with Bragg Gratings, *Smart Materials and Structures*, 2000, 9(2): 170~ 174
- 94 Botsev Y et al. Fiber Bragg Grating Sensing in Smart Composite Patch Repairs for Aging Aircraft, *SPIE*, 2004, 5502: 100~ 103
- 95 Crossley S et al. Smart Patches: Self-Monitoring Composite Patches for the Repair of Aircraft, *SPIE*, 2004, 5272: 304~ 315
- 96 Sjogren A, Lindstrom B. Connection of Optical Fibers Embedded in Aircraft Composite Components, *SPIE*, 2000, 3985: 533~ 542
- 97 Brown T et al. Fiber Optic Sensors for Health Monitoring of Morphing Aircraft, *SPIE*, 1999, 3674: 60~ 71
- 98 Li H C H et al. Sensitivity of Embedded Fibre Optic Bragg Grating Sensors to Disbonds in Bonded Composite Ship Joints, *Composite Structures*, 2004, 66(1): 239~ 248
- 99 Wang G et al. Ship Hull Structure Monitoring Using Fibre Optic Sensors, *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(3): 472~ 478
- 100 Johnson G A et al. Surface Effect Ship Vibro-Impact Monitoring with Distributed Arrays of Fiber Bragg Gratings, *SPIE*, 2000, 4062: 1406~ 1411
- 101 Zhang S Z et al. MicroElectroMechanical System (MEMS)-Based Fiber Optic Grating Sensor for Improving Weapon Stabilization and Fire Control, *SPIE*, 2000, 3990: 185~ 193
- 102 Moore K. Military, an Early User of Fiber, Keeps Finding New Applications, *Photonics Spectra*, 1994, 28(6): 84~ 90
- 103 Taylor E W. Optical Waveguide Diffraction Grating Sensor, *Instrumentation in the Aerospace Industry*, 1987, 33: 143~ 147
- 104 Meissner K E et al. Enhanced Resolution Folded Architecture Spectral Detector for Fiber Optic Sensors, *SPIE*, 2004, 5502: 418~ 422
- 105 Peng P C, Tseng H Y, Chi S. A Hybrid Star-Ring Architecture for Fiber Bragg Grating Sensor System, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(9): 1270~ 1272
- 106 Peng P C, Chi S. A Reliable Architecture for FBG Sensor Systems, *Microwave and Optical Technology*

Letters, 2003, 39(6): 479~ 482

107 Eden R et al. First Application of Second-Generation Steel-Free Deck Slabs for Bridge Rehabilitation, SPIE, 2004, 5393: 86~ 94

108 Caponero M A et al. Use of FBG Sensors for Bridge Structural Monitoring and Traffic Control, SPIE, 2004, 5502: 480~ 483

109 Mufti A A, Labossiere P, Neale K W. Recent Bridge Applications of FRPs in Canada, Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2002, 12(2): 96~ 98

110 Nellen P M et al. Optical Fiber Bragg Gratings for Tunnel Surveillance, SPIE, 2000, 3986: 263~ 270

111 Ferdinand P et al. Mine Operating Accurate STABILity Control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology: the European BRITE/EURAM STABILOS Project, Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1303~ 1313

112 Frank A, Nellen P M, Bronnimann R, Sennhauser U. Fiber Optical Bragg Grating Sensors Embedded in GFRP Rockbolts, SPIE, 1999, 3670: 497~ 504

113 Theune N M et al. Investigation of Stator Coil and Lead Temperatures on High Voltage Inside Large Power Generators Via Use of Fiber Bragg Gratings, Proceedings of IEEE Sensors, 2002, 1603~ 1607

114 Teunissen J, Helmig C, Merte R, Peier D. Fiber Optical On-Line Monitoring for High-Voltage Transformers, SPIE, 2001, 4204: 198~ 205

115 Bjerkan L. Application of Fiber-Optic Bragg Grating Sensors in Monitoring Environmental Loads of Overhead Power Transmission Lines, Applied Optics, 2000, 39(4): 554~ 560

116 Escudero Z, Mai M, SantaFe A. Temperature Sensor for Medical Applications Based on Erbium Doped Optical Fiber, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 2003, 4: 3444~ 3445

117 Tsao S L, Chiou S C. Implementation of a 1280 ~ 1380 nm Light Source for Reflective Spectrum Measurement of Biomedical Fiber Sensors, SPIE, 2000, 4082: 286~ 297

118 Tsao S L, Lee S G. Characteristics Analysis of SOI Waveguide Michelson Interferometers for Developing Biomedical Fiber Temperature Sensing Head, SPIE, 2000, 4082: 278~ 285

附表 1.1 光纤光栅的传感原理

测量参量	传感原理	参 数
温度	热膨胀引起光栅栅隔的变化;热光效应引起光纤光栅折射率的变化	热光系数: $\alpha_n \sim 0.68 \times 10^{-5} n_{eff}/^\circ\text{C}$ 热膨胀系数: $\alpha_L \sim 0.55 \times 10^{-6} n_{eff}/^\circ\text{C}$
应力、应变	弹性形变导致光栅栅隔的变化;弹性光效应引起光纤光栅折射率的变化	弹光张量: $p_{11} \sim 0.113, p_{22} \sim 0.252$ Poisson 比: $\nu \sim 0.16$
磁场	磁场引起左、右旋光的偏振折射率的变化	Verdet 常数: $V \sim 810 \text{ rad/Gm} (1300 \text{ nm})$

第 2 章 光纤的光敏性

2.1 引 言

1978 年,加拿大渥太华通信研究中心的 K. O. Hill 等人探测到了光纤的光敏性^[1,2]。在实验中,当一束 488 nm 的氩离子激光注入掺锗光纤的纤芯时,激光输出功率大大降低。这是由于光纤中相对传输的两束光相干涉形成了周期分布的驻波图案,从而在光纤中诱发了周期性的折射率分布,即形成了所谓 Hill 光栅的缘故。这种现象与双光子过程^[3]联系在一起,从此产生了一种内纤相位结构的新类型,其中最重要的就是光纤 Bragg 光栅^[4]。

1989 年,美国联合技术研究中心的 G. Meltz 等人^[5]以倍频氩离子激光器输出的 244 nm 紫外光为光源,用分振幅干涉的方法在掺锗石英光纤上写出第一支波长位于通信窗口的 Bragg 光纤光栅。吸收带被认为与缺陷中心有关^[6,7],该波段的辐射可用 Kramers-Kronig 关系式来描述^[8]。从此,利用紫外光从光纤侧面直接在光纤材料芯区写入轴向 Bragg 光栅的技术一直受到人们的广泛关注。

后来发现,在光栅写入之前进行载氢,光纤在 240 nm 吸收带的光敏性可提高两个数量级^[9]。以后的实验表明,在小于 240 nm 和 193 nm 的激励下,非载氢、低掺锗光纤也可产生相当于纤芯-包层折射率差的高折射率变化^[10]。193 nm 的光致折射率生长说明,高掺锗光纤的光敏性服从单光子动力学,低掺锗光纤的光敏性服从双光子动力学。随后,又观察到锗硅玻璃中不同紫外波长的双光子过程^[11]。当前对光敏性的看法正从色心模型^[12]发展到紫外辐射玻璃的压缩^[13,14]。

几十年来,对光纤材料的紫外光敏特性以及在紫外光照射下光纤光栅的生长动力都进行了深入而广泛的研究,并取得了很大进展。随着紫外写入光纤光栅制作技术日趋成熟,人们逐渐认识到从光纤通信、光纤传感到光计算和光学信息处理的整个光纤领域都将由于光纤材料这种感光特性的发现而发生革命性变化^[15,16]。

光纤光栅的基本特征是一个反射式光学滤波器。根据需要,既可以将它制成带宽小于 0.1 nm 的窄带型,也可以制成几十纳米的宽带型。此外,它还具有体积小、插入损耗低,以及与普通通信光纤良好匹配的优点。光纤光栅将影响从光发送、光放大、光纤色散补偿到光接收的几乎每个方面^[17~21]。利用光纤光栅对波长的良好选择性和基于光纤光栅的各种器件和技术可以很方便地在光纤线路上实现超高速数据的波分复用和全光解复用。因此,光纤光栅将是下一代高速光纤通信系统中不

可缺少的重要光纤器件。在未来的整个光纤领域中,没有光纤光栅就如同在几何光学中没有反射镜一样不可思议。

光纤光栅的 Bragg 波长与其温度及施加在其上的应力呈良好的线性关系^[22]。光纤光栅的这一特性使它成为一种具有优良性能的光纤传感元件。用光纤光栅可以方便地实现物理量的分布式传感。这种光纤光栅传感器在桥梁、隧道等建筑物及航空航天技术等方面具有广阔的应用前景和巨大的市场潜力^[23~28]。

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光栅的方法,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。

虽然光纤材料光敏效应的发现距今已有 20 余年,但是关于光纤材料这种感光特性的物理起因和微观机理目前还不是十分清楚。这一方面是由于这一过程本身的复杂性,另一方面是因为缺乏足够充分和详细的实验资料。因此,对光纤材料光敏性及光纤光栅紫外写入技术的研究不仅具有巨大的经济意义,而且具有重要的科学价值。

2.2 光纤材料的光敏性

光纤材料光敏性的微观机理是一个非常活跃的研究领域。从已有的实验结果来看,光纤材料的光敏效应在微观上可能与众多的物理因素有关,是一个非常复杂的物理过程,目前还不能给出完全定量化的描述。

从广义上讲,光敏性是指物质的物理或化学性质在外部光的作用下发生暂时或永久性改变的材料属性。对光纤材料的光敏性而言,则是指折射率、吸收谱、内部应力、密度和非线性极化率等多方面的特性发生的永久性改变^[4]。

石英材料的分子结构通常为四面体结构,每个 Si 原子通过形成共价键与四个氧原子相连。虽然 Ge 原子与 Si 原子同为四价元素,可以代替 Si 原子在石英玻璃四面体结构中的位置,但是 Ge 的掺入仍将对石英玻璃的分子结构产生干扰并不可避免地形成缺陷中心。由于纯石英玻璃的吸收带位于 160 nm 处,对波长在 190 nm 以上一直到红外区的光具有大于 90% 的透过率。这些波长的光不会对石英材料的性质产生任何形式的影响,因此,光纤的光敏性与掺杂有关^[29],参见附图 2.1~ 图 2.3。

一般认为掺锗石英光纤材料的光敏现象源于缺陷中心^[4,30,34,36]。起初,曾认为光敏性仅能从掺锗光纤中出现,光栅不能从纯硅纤芯生长,OH 基对光纤的光敏性不是必要的^[30]。但后来的实验表明,光敏性存在于众多种类的光纤。比如,基于硅基光纤的掺铈光纤^[31],掺铈光纤^[32],掺铈铈光纤^[33],掺铈硼光纤^[34],以及基于掺氟锆酸盐光纤的掺铈铈光纤^[35]等。

然而,从实用的观点来看,最引人注目的光敏光纤是广泛应用于通信产业和光传感器领域的纤芯掺锗光纤。在光纤材料中掺入 Ge 以后将产生位于 180 nm、195 nm、213 nm、240 nm、281 nm、325 nm 和 517 nm 等多个附加的吸收带^[8,37~41],其中,240 nm (5.1 eV)和 195 nm (6.35 eV)为强吸收带。240 nm 吸收带的宽度约为 30 nm,325 nm 吸收带的强度仅为 240 nm 吸收带的 1/1000。通常,对光纤材料光敏性的研究主要集中在 240 nm 和 193 nm 的紫外光波段上^[3,6,7,9~14,38]。实验中,351 nm、334 nm 和 157 nm 的激光波长也产生了光纤的光敏性^[42~44]。

根据在掺锗石英玻璃、光纤预制棒及光纤上所进行的光敏性实验,在 240 nm 波段的紫外光照射下,掺锗石英材料的光敏性主要表现在以下几个方面^[36]。

(1) 折射率的永久性改变,这种光致折射率改变是可饱和的,是用 240 nm 波段的紫外光在光纤中形成 Bragg 光栅的基础。

(2) 240 nm 吸收带永久性降低或消失,同时造成 193 nm 吸收带永久性增加。

(3) 对样品的电子自旋共振测量表明,石英玻璃中的 Ge(1)、Ge(2)和 GeE'缺陷浓度显著增加。

(4) 样品的密度增加。

(5) 掺锗石英材料光纤的光敏性与光纤的制作过程有关。

(6) 光纤材料的光敏性与光纤材料中的掺锗浓度基本上成正比,并与所使用的紫外光源的类型,以及照射到光纤材料上的能量密度有关(在相同的曝光量下,使用脉冲型光源可以在光纤中获得比 CW 光源更大的光敏变化,使用较高的能量密度也具有相似的效果)。

(7) 光敏性与光纤材料有很大关系。例如,对光纤材料进行高压低温 H₂ 扩散可以极大地提高光纤材料的光敏性。

(8) 采用多种掺杂使光纤材料的芯区和包层具有尽可能大的熔点和热膨胀系数,可以获得具有高光敏性的光纤材料。

(9) B/Ge 双掺光纤材料具有较高的光敏性。

(10) 在采用高能量密度对高掺锗光纤材料进行长时间曝光的过程中,开始时,折射率随曝光量逐渐增加,并达到某一最大值;然后,折射率随曝光量逐渐减小。

2.3 光纤光栅的光敏类型

光纤的光敏性来自紫外光照射下的光栅生长动力学。这是一个与光纤类型、紫外辐射波段和激光功率有关的复杂性问题,参见附表 2.1。尽管如此,光纤光栅还是可分为明显的三种类型^[45],即 I 型、IIA 型和 III 型。

2.3.1 I 型光栅

I 型光栅是一种最常见的光纤光栅,可采用内写入和外写入的方式成栅于标准通信锗硅光纤,其成栅机制与局部电子态的缺陷(local electronic defect)有关^[46~49]。在图 2.1 给出的 I 型光栅的光谱响应中,导波模的反射谱与透射谱互补,这意味着其包层的吸收或反射是可忽略的。

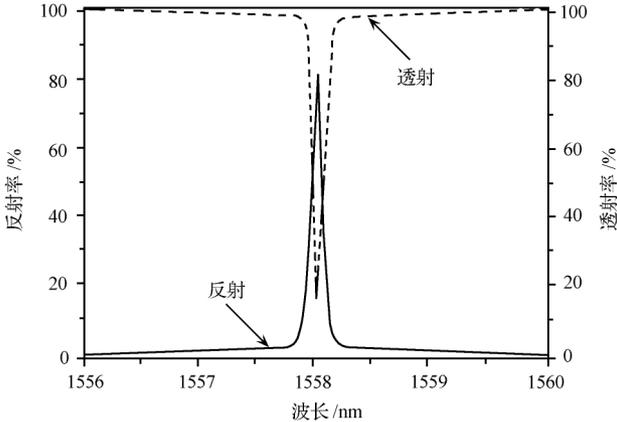


图 2.1 典型的 I 型光纤 Bragg 光栅的光谱响应

I 型光栅是一种正折射率调制光栅($\Delta n > 0$),在光栅写入的过程中,折射率调制深度与平均折射率均呈单调增长。中等强度的脉冲或连续激光,比如,能量密度大于 $100 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$,均可在任何类型的光敏光纤上写出 I 型光栅,累积能量密度大于 500 J/cm^2 。此类光栅的温度稳定性较差,擦除温度小于 200°C 。实际上, I 型光栅的有效工作温度是 $-40 \sim +80^\circ\text{C}$,该温度范围可满足大多数通信和传感的应用。

2.3.2 IIA 型光栅

不考虑微观折射率变化的细微区别,IIA 型光纤光栅的宏观波长响应类似于 I 型光栅的谱特征,参见图 2.1,即不引入基质吸收或包层耦合损耗。IIA 型光栅与光纤基质材料的稠密(compaction)效应有关^[50~52]。在成栅过程中,IIA 型光栅的折射率调制深度呈非单调增长行为。照射的初始阶段,折射率调制深度随曝光量增加,形成 I 型光栅;随着曝光时间的进一步增加,第一只光栅被部分或全部擦除;最后,当累积能量密度超过 500 J/cm^2 时,伴随着负调制折射率深度的产生,新的光谱和反射波长就出现了,即形成了 IIA 型光栅。通常,IIA 型光栅成栅于高掺锗光纤($> 25 \text{ mol}\%$ 高数值孔径光纤)。

尽管 IIA 型光栅不易写作,然而,IIA 型光栅极大地提高了光栅的温度稳定性,其擦除温度高达 500°C 。因此,IIA 型光栅可应用于高温环境中的传感应用。

2.3.3 II型光栅

II 型光栅与玻璃基体的熔化有关^[53]。当单个高能脉冲能量密度 $> 1000 \text{ mJ/cm}^2$ 时,高能紫外脉冲将以纤芯-包层边界为范围诱导出可用相衬显微镜观察的大折射率变化,如 10^{-2} ,结果熔化石英基质导致光纤纤芯的物理性损伤,从而形成 II 型光栅。II 型光栅在光谱响应上与 I 型和 IIA 型光栅中透射谱与反射谱的互补截然不同,参见图 2.2。

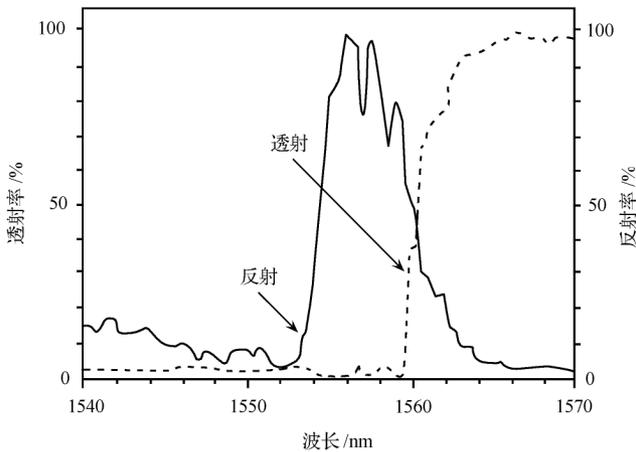


图 2.2 典型的 II 型光纤 Bragg 光栅的光谱响应

在图 2.2 中,II 型光栅的反射谱与 I 型和 IIA 型光栅相近,只是反射峰较宽,整个光谱剖面的某些特征被认为与纤芯的非线性响应有关;在透射谱中,只有波长大于其 Bragg 波长的光透射,而波长小于其 Bragg 波长的光却被其耦合入包层损耗掉了。

II 型光栅具有较高的温度稳定性,擦除温度大于 800°C ,可满足恶劣环境中的传感应用。

值得注意的是,II 型光栅可在几个纳秒的时间内写成,这正是准分子单脉冲激光器的持续时间。因此,可以在保护层涂敷之前的光纤拉丝的过程中写入,从而实现该类强光栅的大规模生产。

从制作光纤光栅的角度讲,光纤材料光敏性的核心问题是如何在光纤材料内获得光致折射率较大的变化。光纤光敏性的测量是研究光纤光敏性特性与机理的重要手段^[55,56]。在实验上可以通过多种途径获得光纤材料芯区中光致折射率改变的具体数值。如采用光纤 Mach-Zehnder 干涉仪^[57,58]或光纤 Michelson 干涉仪^[59]

可较为精确地得到光纤材料中光致折射率改变的数值,通过测量光纤材料在紫外光照射前后折射率剖面或光纤远场图案的变化情况也可以估算出光纤材料芯区折射率的变化,但目前使用较多的方法是直接通过紫外光照射获得光纤光栅的反射率和反射带宽^[60],依此计算出光纤材料中光致折射率改变的数值。

2.4 光纤光敏性的各向异性

在光栅写入的过程中,氩离子和紫外激光诱导的折射率变化通常是各向异性的^[61],在一定程度上,各向异性强烈依赖于光纤的类型和写入条件^[62]。

在锗硅光纤中,由内写入法^[63]产生的光致折射率表现出的双折射为 10^{-6} 量级;而通过外写入产生的光纤的光致双折射可比前者提高两个数量级^[5,22,64]。

平行于写入光束方向上测到的折射率变化略大于垂直于写入光束方向所得的值^[6,7,64~68],这是由于色心对紫外光的吸收是二向异性的,单个色心对紫外光的吸收概率与其在玻璃晶格中相对于紫外光偏振的局部微观方位有关。假设色心在整个光纤中自由排列,局部排列平行于偏振方向的色心将被偏振光漂白。所以含有色心的物质的吸收系数在色吸收谱区是偏振相关的,即折射率的变化是光束偏振的函数。

利用光纤光敏性的双折射可制作出许多重要的光纤器件。比如,掺铒光纤光栅激光器的单模运转^[69],偏振模转换器和振荡滤波器^[70,71]和内纤同轴波延迟器^[64]。

2.5 锗硅光纤的光敏性机理

缺陷的吸收带是导致光纤传输损耗的重要原因,被称之为色心。致电离辐射^[72]和光纤在拉丝过程中^[73]会产生缺陷。色心也是造成非线性光纤传输的原因^[74~76]。在 240 nm,单光子过程所激发的光致折射率变化明显低于 146 nm 的带隙^[77~81],这就暗示了点缺陷是造成理想玻璃晶体光敏性的原因。在许多现象中,光纤的点缺陷都是重要的,但缺陷的起源、化学结构和作用并不确定。

利用 ESR(电子自旋共振),硅材料中的三种本质缺陷已得到确认^[82],参见图 2.3,即 E'中心^[83]、非键合氧空穴中心(NBOHC, $\equiv O\cdot$)和过氧激发($\equiv O-O\cdot$)。第四种重要的抗磁效应是硅材料中 630 nm 吸收带的拉丝诱导缺陷(DID)^[74]。

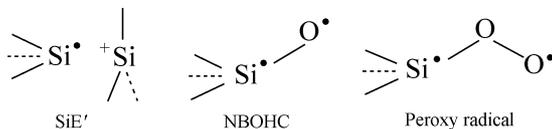


图 2.3 硅材料中的点缺陷结构

E'中心被认为是 SiO₂ 中基本的缺陷中心^[84-86],与老化效应和辐射退化有关。最常见和热稳定的是 SiE'中心。在缺氧硅中,Si-Si 是起支配作用的缺陷源。

在硅材料中,160 nm、173 nm、215 nm、245 nm、260nm 和 630 nm 等处的吸收是最显著的^[82]。但不是所有的吸收带都有明确的指派:SiE'的吸收带在 215 nm,过氧激发在 160 nm,NBOHC 在 260 nm,Si-Si 不合理的配位键在 245 nm,只有 DID 吸收带^[73]在 630 nm。

2.5.1 掺锗石英光纤材料光敏性的缺陷和紫外吸收谱

锗硅光纤是最重要的光敏光纤。不像 Si、Ge 有两个稳定的氧化态:+ 2 和+ 4,因此,锗在玻璃中将以 GeO₂ 和 GeO 的形式存在。从热力学考虑,GeO₂ 的密集是与玻璃中的锗氧缺陷中心(germanium oxygen deficient centers,GODC)的密集成比例的。在高温下,低值氧化物 GeO 比 GeO₂ 更稳定^[87,88]。光纤预制棒在高温生产期间,GeO 也随之产生,MCVD(改进的化学气相沉积法)的气相氧化导致了缺氧基体。尽管 GeO 有时被认为是以不连续的分子状态存在于锗硅基体的^[37],但 GeO 将可能以 Ge-Si 错配位的缺陷源的形式出现。另外,从高温(~ 1600 °C)快速冷却至室温将产生大量的缺陷^[88]。因此,除光纤材料的不一致或预应力分布之外,光纤中的缺陷分布还与将光纤预制棒拉制成光纤的过程有关。

在 ESR 谱线中,从 γ 照射下的掺锗浓度为 10 mol% 的锗硅光纤中可识别出四种相互交叠的缺陷谱^[38,89-91],如 Ge(0)、Ge(1)和 Ge(3)及硅 E'中心。在光纤材料中掺入 Ge 以后将产生分别位于 195 nm、240 nm、325 nm 的三个附加的吸收带^[8,37-41]。大量的实验结果表明^[37,38],这些吸收带的强度与石英材料中的 Ge 掺杂浓度近似呈线性关系,并且与光纤预制棒的制作过程有关,在换原性气体中制作的光纤预制棒具有较强的吸收峰。这些实验事实进一步证实了上述吸收带起源于掺锗石英光纤中的缺氧锗缺陷^[92],参见表 2.1。

表 2.1 引起锗硅光纤光敏性的部分点缺陷

缺陷类型	吸收能/eV	名称
锗氧缺陷中心 (GODC)	5.08	中性氧单空位缺陷(NOMV)
	5.16	中性氧双空位缺陷(NODV)或锗孤对电子中心缺陷(GLPC)
锗电子中心 (GEC)	4.6	Ge(1)缺陷
	5.8	Ge(2)缺陷
	6.4	GeE'缺陷

图 2.4 为已得到广泛认可的存在于掺锗石英玻璃中的两种主要缺氧锗缺陷^[36,92,93]。

(1) 中性氧空位(neutral oxygen vacancy, NOV)缺陷,Ge 原子与三个 O 原子形成共价键并与另一个 Si 或 Ge 原子相连,参见图 2.4(a)。目前认为掺锗石英光纤材料的光敏性主要是由这种缺陷中心引起的。

(2) 还原态的 GeO 分子结构,Ge 原子仅与两个 O 原子键合并,留下一对未成键的电子,参见图 2.4(b)。

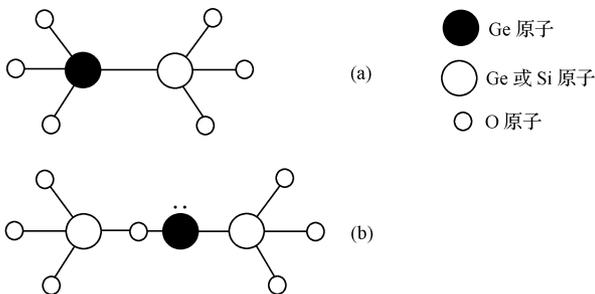


图 2.4 掺锗石英光纤中两种主要的缺氧锗缺陷

这两种缺陷的吸收带非常接近,Ge-Si 缺陷的吸收峰位于 5.06 eV 处,Ge²⁺ 离子的吸收峰位于 5.16 eV 处,即锗硅光纤在 248 nm 和 216 nm 附近的紫外吸收被认为是源于 NOV 和 Ge²⁺ 缺陷。在紫外光照射下,Si-Ge 键断裂,NOV 缺陷消失,电子从成键位释放出来,形成锗电子中心(germanium electron centers, GEC)。

根据锗原子与四面体结构形成的连接情况,GEC 缺陷可分为 3 种^[88~90,94,95],即 GeE'、Ge(1)和 Ge(2)缺陷。

(1) GeE'缺陷是指 Ge 原子在 p 轨道有一未成对单电子,它是一个顺磁性缺陷,将引起 200 nm 附近的紫外吸收。

(2) Ge(1)缺陷是指电子被捕获在 Ge 原子上,该原子通过桥氧与 4 个硅氧四面体连接,它是引起 281 nm 紫外吸收的原因。

(3) Ge(2)缺陷也是电子被捕获在 Ge 原子上,但该原子与 3 个硅氧四面体、1 个锗氧四面体连接,它主要引起 213 nm 附近的紫外吸收。

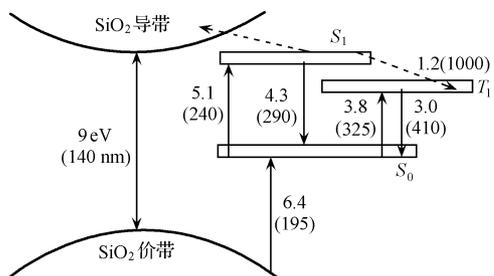


图 2.5 掺锗石英材料中缺氧锗缺陷的能级

其他引起紫外吸收的缺陷还有无桥氧空穴缺陷,其对应应在 260 nm 和 600 nm 的紫外吸收。

图 2.5 为基于大量实验结果提出的一种可能的缺氧锗缺陷能级图^[36]。它是一个由位于石英带隙中部的单态基态 S₀、上能级单态 S₁ 和一个三重态 T₁ 构成的三能级系统。

在图 2.5 中,详细给出了与各吸收带相关能级之间的跃迁吸收及辐射跃迁和热弛豫过程。 S_0 到 S_1 的跃迁给出 240 nm 吸收带^[38], 195 nm 吸收带来自于 SiO_2 价带到杂质态 S_0 的跃迁^[7]。由于 S_0 单态到 T_1 三重态的跃迁概率非常小,因此在 325 nm 处只有很低的吸收峰^[8,39~41]。此外,图中给出的各荧光波长在实验中(用 240 nm 波长紫外光照射)也均已观察到。图中的虚线表示热弛豫过程。

2.5.2 掺锗石英光纤材料光敏性的微观机理

由于目前对掺锗石英玻璃的内部微观结构的了解尚不十分完全,而且有关光纤材料光敏性方面的实验数据也由于各自实验条件的差异而显示出较大的分散性和不一致性,因此目前关于光纤材料光敏性的微观机理还没有彻底解决。但是根据已有的实验结果,人们已经对掺锗石英光纤材料光敏性的微观机理提出了多种不同的解释模型。其中得到大量实验事实支持并被普遍接受的主要有色心模型和结构模型两种,但正确性还有待进一步用实验检验。而对于非掺锗光纤材料光敏性问题的了解则更为有限,目前还处在实验资料的积累阶段。

根据紫外光照射前后对掺锗石英光纤材料紫外吸收谱及各种缺陷浓度进行测量的结果,几乎可以肯定紫外光照射下光纤材料中缺氧锗缺陷的光电离是掺锗石英光纤材料光敏性的主要来源之一。

掺锗石英光纤材料中缺氧锗缺陷的光电离过程可以用图 2.5 缺氧锗缺陷的能级图说明。根据图 2.5,在 240 nm 波段的紫外光照射下,上述缺陷中心在吸收 5.1 eV 的能量后从基态 S_0 跃迁到 S_1 激发态,处于缺陷中心上能级激发态的电子的一部分通过发出紫外或蓝色荧光返回到基态,另一部分则通过热弛豫过程进入 SiO_2 导带并陷落到附近一新的位置上形成其他锗缺陷中心。

GODC 包括 242 nm 的(S_0-S_1)跃迁带和 330 nm 的(S_0-T_1)跃迁的弱吸收带^[101]。在掺锗光纤中,脉冲中紫外光和连续近紫外光诱导的可能路径原理^[43]参见图 2.6。以上方式被认为是产生 Bragg 光栅的光致折射率变化。

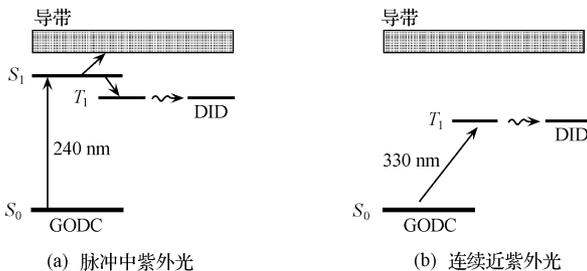
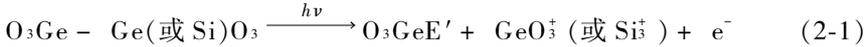


图 2.6 缺氧锗缺陷的能级图(两种可能的受激过程)

根据 ~ 240 nm 的紫外光照射前后, 240 nm 吸收带的降低或消失, 以及

Ge(1)、Ge(2)和 GeE'缺陷浓度增加等实验事实,Ge-Si 缺陷的光电离过程可以归结为下述光化学反应^[27,36,93],即



式(2-1)中,Ge-Si 缺陷在~ 240 nm 的紫外光照射下发生电离形成 GeE'缺陷,同时被激发到 SiO₂ 导带的电子由其他位置上的 Ge 原子俘获形成 Ge(1)或 Ge(2)缺陷。

GEC 和 STH(自捕获空穴中心, self-trapped hole center)的形成^[11,27]

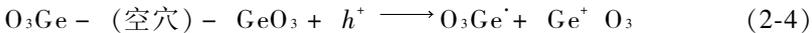


式(2-2)中,桥氧上的孤电子对通过双光子吸收过程受激成为导带。

GEC 向 GeE'中心的转换可由下述反应式描述^[27],即



从 ODC 向 GeE'中心转换的反应式为^[27]



实验给出了大量紫外光照射产生不同缺陷源的证据^[8,98,99]。Raman 谱暗示^[100]:在光栅写入光纤时, Δn 可表示为 GeE'和 GeH 的单位浓度折射率变化的总和。有氢存在时的退火将导致 GeE'中心被 GeH 代替^[101],即

$$\Delta n = K_{\text{GeH}} [[\text{GeE}']_0 + [\text{GeH}]_0] + K_X [X] + (K_{\text{GeE}'} - K_{\text{GeH}}) [\text{GeE}'] \quad (2-5)$$

式中 X ——与光栅有关的除 GeE'和 GeH 之外的任意光敏结构;

K_I —— I 浓缩时单位折射率的变化;

$[I]_0$ —— I 的初始浓度,其中 $I = \text{GeE}'$ 、GeH 和 X 。

2.6 光纤材料的紫外增敏技术

自光敏性的发现和第一次证实锗硅光纤中的光栅以来,增加光纤中的光敏性就成为了一个重要的考虑因素。标准单模通信光纤中掺有 3% 的锗,典型的光致折射率变化为~ 3×10^{-5} 。由于光纤材料的光敏性与光纤中的锗掺杂浓度基本成正比关系,因此提高光纤材料感光性能最直接的方法是提高光纤芯区的锗掺杂浓度。一般地,增加掺锗浓度可导致~ 5×10^{-4} 的光致折射率变化(非典型情况下^[102]可高达 1.2×10^{-3})。但是用这种方法提高光纤材料的光敏性有一个很大的不利因素,即增加光纤芯区含锗量将增大光纤芯区和包层的折射率之差。为保证光纤中只能进行单模传输,必须减小光纤的芯径。当芯区的锗含量很高时,光纤的芯径将要非常小,这将影响光敏光纤与普通单模光纤的匹配性能。

因此,寻求更为有效的光纤材料增敏方法具有非常重要的意义。根据前面对光