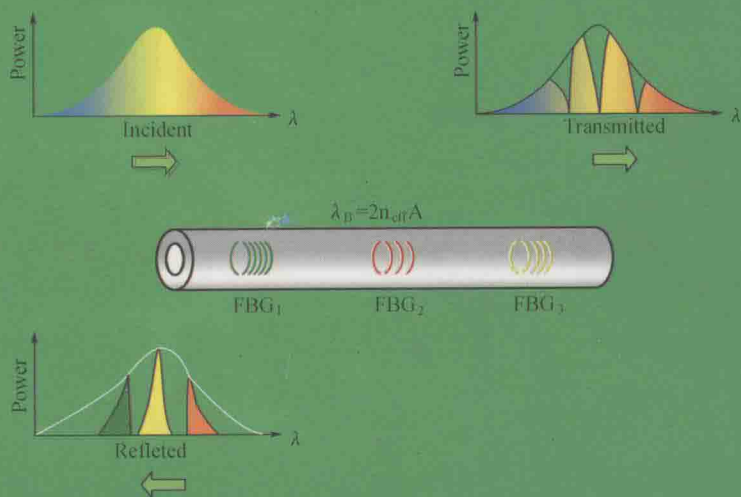


光纤光栅传感器及其 网络化技术

余有龙 著 王 骥 审



黑龙江科学技术出版社

光纤光栅传感器及其网络化技术

余有龙 著 王 骐 审

黑龙江科学技术出版社
中国·哈尔滨

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅传感网络技术/余有龙著. —哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 2003

ISBN 7-5388-4309-4

I. 光... II. 余... III. 光纤通信—传感器—网络—技术 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007924 号

责任编辑 刘秉谦

封面设计 洪 冰

光纤光栅传感器及其网络化技术

GUANGXIAN GUANGSHAN CHUANGANQI JIQI WANGLUOHUA JISHU

余有龙 著 王 骐 审

出 版 黑龙江科学技术出版社

(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)

电话(0451)53642106 传真 53642143(发行部)

印 刷 东北农业大学印刷厂

发 行 黑龙江科学技术出版社

开 本 850×1168 1/32

印 张 7.625

字 数 190 000

版 次 2003 年 1 月第 1 版·2003 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1-1 000

书 号 ISBN 7-5388-4309-4/TP·94

定 价 16.00 元

内 容 简 介

本书详细介绍了光纤光栅传感器以及网络化技术。全书共分七章,首先介绍光纤光栅的耦合模方程,导出布喇格公式,并在第五章中介绍了光纤光栅传感器的工作原理,这些构成该类传感器的理论依据。第三章介绍了光纤光栅的制作和调谐技术;第四章则介绍几种基于光纤光栅并在光纤光栅传感等领域有应用前景的宽带和窄带光源;第五章主要介绍光纤光栅应用于几种常见物理量(温度、磁场、电流、机械震动等)的感测以及基于悬臂梁的无源温漂补偿技术;第六章主要介绍时域解调和干涉解调技术;第七章着重阐述光纤光栅传感器的网络化技术。

本书可供从事光纤技术、信号处理、智能材料、土木工程、道桥等领域的研究人员阅读,也可供相关领域的工程技术人员参考。

前 言

光纤光栅传感技术是近年来光电子领域研究的一个热点,而其网络化技术翻开了传感学的新篇章,它借用通信领域内的 WDM 和 TDM 等技术去解决传感领域的技术问题,使得材料智能化和对建筑工程的健康监测成为可能,并使这门学问成为多学科的交叉。

光纤光栅传感器的明显优势和独到之处,以及在国防和民用工业中广阔的应用前景,吸引着研究人员的极大兴趣。本人在过去近七年的时间内在成栅、调谐、传感元的研制以及网络化方面倾注了一定的心力,这里将自己的一点体会稍加总结,奉献给大家,希望对读者的工作有所裨益。

鉴于本领域的研究进展迅速,相关的技术回顾的全面性难以得到保证,有些合适的文献未能引用,谨表歉意。

本人要感谢香港理工大学电机工程系的谭华耀教授和鍾永康博士两整年的通力合作,感谢校领导和同事对本人工作的一贯支持和密切配合。

本书的部分工作得到国家自然科学基金委员会与中国节能投资公司联合研究基金(批准号:60177029)、教育部科学技术研究重点项目(项目号:01038)、黑龙江省 2001 年杰出青年基金、中国博士后科学基金以及黑龙江省教育厅科学技术研究重大项目(批准号:10531Z010)等联合资助,在此一并表示谢意。

本人才疏学浅,加之脱稿仓促,拙作中一定有欠妥甚至错误之处,恳请指正。

余有龙

2002 年 12 月 2 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概论	1
1.2 光纤光栅的分类	5
1.3 光纤光栅的应用	8
1.4 本书的主要内容	12
参考文献	12
第 2 章 光纤光栅的耦合模理论	17
2.1 光纤光栅的耦合模理论	17
2.2 布喇格公式	26
2.3 本章小结	29
参考文献	29
第 3 章 光纤光栅的制作与调谐	31
3.1 成栅技术的回顾	31
3.2 掩模法成栅	35
3.3 光纤光栅调谐技术的回顾	49

3.4 基于悬臂梁的光纤光栅调谐技术·····	55
3.5 光纤光栅无啁啾线性调谐·····	67
3.6 光纤光栅变啁啾线性调谐技术·····	73
3.7 本章小结·····	80
参考文献·····	80
第 4 章 光栅与光源 ·····	87
4.1 高功率宽带光源·····	87
4.2 线性腔可调光纤激光器·····	92
4.3 环形腔光纤激光器波长选择技术·····	101
4.4 本章小结·····	108
参考文献·····	109
第 5 章 光纤光栅传感器及其温漂补偿技术 ·····	112
5.1 光纤光栅传感器的工作原理·····	113
5.2 光纤光栅传感器·····	117
5.3 光纤光栅传感器无源温漂补偿技术·····	130
5.4 光纤光栅传感器无源温漂补偿技术的改进·····	139
5.5 本章小结·····	145
参考文献·····	146

第 6 章 光纤光栅传感器的信号解调技术·····	151
6.1 解调技术的回顾·····	151
6.2 光纤光栅传感器时域解调技术·····	161
6.3 干涉解调技术·····	171
6.4 本章小结·····	180
参考文献·····	180
第 7 章 光纤光栅传感器网络化技术·····	184
7.1 光纤光栅传感器的复用技术·····	184
7.2 复用技术的回顾·····	187
7.3 查询技术的回顾·····	193
7.4 无源查询传感网络·····	200
7.5 有源查询传感网络·····	219
7.6 本章小节·····	229
参考文献·····	230

第 1 章 绪 论

1.1 概论

早在 19 世纪人们就已经认识到光波在光导纤维中传播遵从的基本原理是全内反射¹，它仍然是现代光学研究领域多模光纤研究的基础理论之一。虽然 1930 年前后就已经研制成功了无包层的玻璃纤维^{2,3}，直到几十年后人们才注意到在光纤外附着折射率稍小一点（5%左右）的材料不仅可以对光纤中传播的光束起约束作用，而且对光导纤维有保护作用。这样的结构显著地改善光纤的光学性能^{4,5}，称这种附着材料为包层，被包层覆盖的光纤现称之为纤芯，包层和纤芯一般为同种材料，折射率的差别是通过掺杂浓度的不同来实现的。为增加光纤的机械性能，通常包层外还有层被称作涂覆层的支撑结构。这便是今日所见到的普通光纤的结构了。

伴随着光纤结构的完善以及对其光学性能的进一步研究，在传统的光学领域中也开辟了光纤光学新分支，并且其发展十分迅速。20 世纪 70 年代以前的光纤按现在的标准应该是早期的光纤，当时由于工艺水平的低下，石英材料的纯度难以得到保证，以至当时的光纤具有非常高的损耗，典型的值为 1000 dB/km 左右，这样高的损耗决定了其用途有限，因此也就制约了其发展，所以早期研究光纤的主要

目的是用来传输图像(现今的传像光纤仍用于此目的)。随着工业技术的不断发展,石英提纯工艺水平的不断提高,光纤的传输损耗逐渐减小,1970年人们已经能够将光纤的损耗控制在 20 dB/km ⁶,而到1979年通信光纤在 1550 nm 附近的传输损耗已经降低至 0.2 dB/km ⁷的水平,目前制约损耗进一步下降的主要因素是瑞利散射。

从传输模数情况可将光纤分为单模光纤和多模光纤,这是最常见的分类方法。单模光纤芯径一般为几个微米,而多模光纤则为 25 至 $40 \mu\text{m}$ 。早期的光纤研究主要针对多模光纤,随着光纤技术的发展,单模光纤逐渐成为主流,以致目前多模光纤仅限于一些特别用途。

也可从材质上对光纤进行分类,如:石英光纤、塑料光纤以及空心光纤等,前者最为常见,其纤芯为高纯度二氧化硅,塑料光纤的纤芯主要为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚苯乙烯(PS),后者纤芯为空心或注入液体。当然还有许多其他分法,比如从功能上对其分类:保偏光纤、色散补偿光纤、光敏光纤等,从结构上分:双包层光纤、双芯光纤、晶纤;从横截面折射率分布将之分为阶跃型光纤、渐变型光纤等。

随着传输损耗水平的不断降低,光纤的应用已由原来的传像功用逐步过渡到侧重于通信⁸和传感网络^{9,10},基于光纤本身的有源¹¹⁻¹³和无源器件^{9,10,14-18}器件也不断问世。

Hill 于 1978 年首次在掺锗二氧化硅光纤中成功地写入光纤光栅(FBG)¹⁸,该技术已引起光纤光学领域的一场革命,

使光纤光通信成为现实，而且在光纤传感领域另辟新的主要分支——光纤光栅传感¹⁹⁻²⁴。

光纤这种优良的光波导介质，当它受到应变、压力或温度等作用时，其中传输的光波将受到明显地影响，因此它可用作传感元件^{25,26}。

光纤传感器的研究工作开展已经至少有 30 年历史了，为什么人们一直对该话题感兴趣呢？首先，该类传感器与电磁场没有任何作用，这在电力工业中几乎是不可替代的；第二，对弱信号可以长距离传输并进行处理；第三，光波导介质的连续性决定了该类传感器便于进行分布式传感，这是其他类传感器所不具备的；第四，该类传感器的信息载体是光，无论以波长还是位相为监测对象都具有几乎是极限的传感精度，即便监测其振幅(强度)，具有极高分辨能力的光电仪器使得其对某物理量的监测也具有非常高的精度；第五，它可以用在特殊场合对某些物理量进行安全地监测，如煤气旁、矿井下，油田以及油罐周围；最后，由于光纤相对来说比较柔软，因此传感回路易于植入、或附着在结构表面，能够实时提供应变、温度以及结构完整性方面的信息，且布置比较灵活，大量该类传感器一起对某一物理量传感时可以协同工作，使得“皮蒙”(Smart structures)(又称“灵巧结构”或“智能皮肤”)技术能够变为现实。因此人们有趣于该领域的研究，并且它已成为传感领域重要组成部分。

皮蒙技术是项复杂的技术，目前要解决的关键是系统问

题而不是简单的传感器件。传感器与材料、数据的提取与处理系统以及结构查询的需求将决定传感技术的具体选择, 光纤传感器尤其是其中的 FBG 传感器在该领域无疑将起到关键性的作用。

光纤光栅传感器用于窃听时可能要数性能最稳定、最隐蔽的装置了。同一根光纤上可以制作多个光栅, 不同根光纤之间通过耦合器等连接成网络, FBG 间的这种通过串接或并接方式组成的网络结合地址查询技术便形成了传感网络。用埋植有 FBG 传感网络的复合材料制成航天器的外衣(一种新的“皮蒙”技术^{27,28}), 可用来实时地监控机体温度和内应力的分布状况, 同时还可以监测该飞行物遭受其他物体打击的程度, 起到防患于未然的作用。当然也可用作潜艇或其他舰船的皮蒙, 其网络制成声纳, 哪怕“风吹草动”绝不会逃不过它的“视线”, 所以发展这种技术对提高国防能力具有重要的战略意义。

这种网络轻巧柔软, 植成衣服可以用来实时监视人体体温的变化和心脏、脉搏跳动情况; 它还可以用来监测水库大坝、桥梁和房屋等建筑物受压力以及内应力的分布情况; 也可用于对核存储设施的健康状况进行监测; 在光缆中的某一根光纤上写入成串的 FBG, 作为传感节点, 进行准分布式传感可以用来实时窥测远距离光缆(尤其是越洋光缆)的运营情况, 这显然比现时的 OTDR 或将单根光纤用作分布式传感的方法更可靠, 可见在民用方面它有着广阔的应用前景。

无论 FBG 传感器元件, 还是“庞大”复杂的 FBG 分布式传感器阵列的光纤网络均可以非常方便地植入除微观物体以外的任何宏观物体, 并且对物体的结构和物理性能几乎不造成任何影响, 正因如此, FBG 自问世以来, 有关其研究便一直受世界各国科学家的广泛关注, 已经并且在未来相当长的一段时间内还将是光学领域研究的热点课题! 随着写入方法不断改进, 写入技术的日趋完善, FBG 制作成本不断降低并将会进一步大幅下降, 并将具有与通常电子传感器一争高低的可能²⁹; 随着基于 FBG 的各种功用的智能材料、灵巧结构的装置被研制出来, FBG 传感器的全面实用化和商用化即将成为可能。

1.2 光纤光栅的分类

光纤光栅是光纤导波介质中物理结构呈周期性分布, 用来改变光在其中传播的行径的一种光子器件, 根据成栅手段的不同, 它可分为蚀刻光栅和折射率调制的位相光栅两类。前者在光纤结构中形成明显的物理刻痕, 后者主要体现在纤芯的折射率受到调制, 呈周期性分布。无论用于研究还是实际投入使用, 后者均占主导地位, 以至光纤光栅这个名词几乎专门指代后者了。

根据成栅物理机制的差别, 光栅可以分为三种, 分别称之为 I 型、II 型和 III 型光纤光栅, 也有学者称 III 型光栅为 II A 型光栅(图 1-1 所示)。

连续或者能量较弱的多个脉冲光波在光敏光纤中形成

的传统意义上的光折变光栅被称之为 I 型光栅。它有较理想的透射谱，满足布喇格条件时短波一侧没有明显的耦合损耗，热稳定性差。

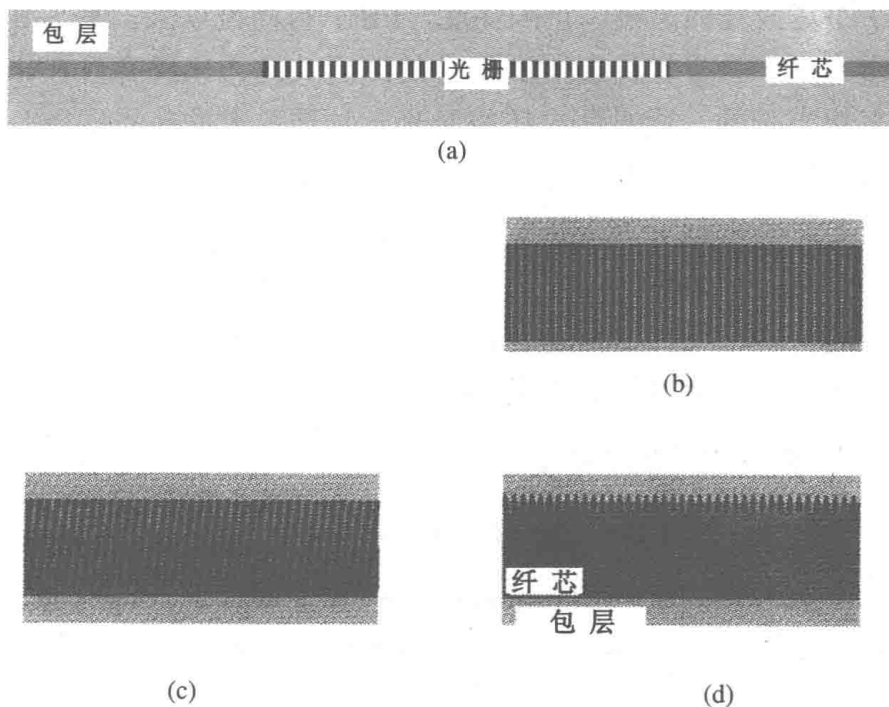


图 1-1 不同类型光栅草图

(a). 写有光栅的光纤, (b). 完美的 I 型光栅, (c). 不完美的 I 型光栅, (d). II 型光栅

其后的研究证实用准分子激光器或氩离子激光倍频后的 244 nm 波长用于成栅时，其单脉冲光波也可以用来写 I 型光栅³⁰。该种光栅既可写在高掺锗的光敏光纤中，也可写在载氢光纤上。其折射率变化一般在 10^{-5} ，反射率可以达到百分之几十。成栅既可采用传统的干涉方式(亦称全息方

式)也可采用掩模方式。

用单脉冲成栅时,不断提高脉冲能量,发现存在一个取决于光纤中锗浓度的阈值(约 1 J/cm^2), 低于该阈值时形成的光栅均为 I 型光栅, 而高于该阈值时写入光栅的调制度变得非常大, 反射率接近 100%, 称此时的光栅为 II 型光栅。它与 I 型光栅不同主要体现在: 折射率变化量达 10^{-3} 数量级; 具有很强的将光能耦合到包层或辐射模中的能力以至插入损耗大; 很高的热稳定性; 对蓝、绿光不敏感; 布喇格反射波长短波长一侧有很强的耦合损耗; 带宽大(可达 1 至 5 nm)。研究表明, 光纤中即便锗离子浓度再高, 上述阈值一旦高于足以损伤光纤表面能量值时也就不能再增加多少了。

II 型光栅被认为是由于紫外脉冲与导带中电子相互作用瞬间释放超过玻璃熔点的热量造成纤芯和包层界面损伤而形成的³¹。进一步的研究证实, 多脉冲成栅时, 只要第一个脉冲高于阈值, 以后脉冲能流低于阈值很多也能够形成 II 型光栅, 受此启发 Dyer 先用 193 nm 单脉冲先写一个较弱的 II 型光栅(象种种籽一样), 然后用均匀光束曝光去放大它³²。

对 I 型光栅进行过量曝光发现了 III 型光栅³³。曝光伊始, 出现 I 型光栅, 随着曝光的继续进行, 光栅变得越来越弱, 以至消失或只剩下一部分。接着出现第二个光栅, 其反射率可达 100%。区别于 I 型光栅的是: 随着曝光量的增加折射率呈负增长趋势, 显然它不属于 II 型光栅, 因此称之为 III 型光栅。有意思的是用 248 nm 波长的光波曝光时,

折射率出现负增长现象所需时间较 193 nm 光波曝光所需时间长得多,前者需要 1 个小时前后,后者只要几分钟。III 型光栅的温度稳定性虽赶不上 II 型光栅但优于 I 型光栅。

称格栅间光程相等的光栅为均匀周期的光纤光栅,即常提到的布喇格光栅,否则称之为啁啾光栅(CFBG)。当然啁啾光栅也属布喇格光栅,为区别于均匀周期光纤光栅,往往只称它为啁啾光栅,而光栅常数很大(几十至几百微米)的光栅被称为长周期光栅(LPG)。

1.3 光纤光栅的应用

作为用于波长选择的起带阻滤波作用具反馈功能的光子器件,FBG 被广泛地应用于激光器、光通信、以及传感等领域。

1.3.1 用于改善激光器的性能

一、用于稳定激光二极管的输出

FBG 与激光二极管(LD)间的有机结合可以改善 LD 的工作性能,概括为以下几个方面:

1. 在有抗反射涂层 LD 尾纤上靠近输出端写入窄带光栅,可使激光器进行单频操作³⁴。FBG 与 LD 的这种结合甚至可以实现分布反馈或分布布喇格反射式激光输出。

2. 对激光器进行锁模

上述同样的装置满足适当条件时还可以进行激光锁模³⁵。

3. 相干崩溃(Coherence collapse)处理

若 FBG 远离 LD,则它提供非相干反馈,使得激光器工

作在完全不同的模式,该技术便被称为相干崩溃技术³⁶。

二、光纤激光器

借助 FBG 可以实现稳定的、高功率的环形腔和线性腔激光输出。

1. 用于实现单频激光输出

用泵源对 EDFA 提供能量借助 FBG 提供反馈,很容易实现不同要求的环形腔或线性腔激光输出。施加应力于 FBG 上还可以调节输出波长³⁷。

2. 用于大功率激光器

用强光源进行包层泵浦结合掺 Yb 的高增益特点实现高功率激光输出³⁸。借助两组各由六个光栅组成的光栅对(叫“喇曼梯”(Raman ladder))构成线性谐振腔,利用光纤中的喇曼效应以及斯托克斯现象,能得到 1 W 以上的激光输出。各光栅的工作波长分别对应喇曼谱的峰值间隔³⁹,并呈递增关系。

1.3.2 用于光纤通信

一、用于改善光纤放大器性能

FBG 与 EDFA 配合使用可以提高 EDFA 的性能,主要体现在以下两个方面:

1. 反射泵浦残余

FBG 插入 EDFA 光路中用来反射泵浦残余光时,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⁴⁰。此用途的 FBG 一般要求宽带、高反射率。

2. 增益平坦