

光纤光栅 及其传感技术

Optical Fiber Gratings and Sensing Technology



赵勇 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书围绕光纤光栅的基本原理、制作技术、传感系统及应用等几个方面展开介绍和讨论。主要内容有:光纤光栅的模式耦合理论及加工工艺,光纤光栅器件,光纤光栅传感系统的组成,各类光纤光栅传感器原理及应用,光纤光栅传感网络的解调与复用技术等,最后介绍了最新发展起来的由特殊结构、特殊材料构成的新型光纤光栅器件及原理。

本书可供从事光纤传感、光纤通信、光电子技术、精密仪器与光学工程、检测技术等教学、科研、工程技术人员及高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅及其传感技术/赵勇编著. —北京:国防工业出版社,2007.1

ISBN 7-118-04871-2

I. 光... II. 赵... III. 光纤器件—光电传感器
IV. TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 137685 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 368 千字

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

光纤光栅是最近几年发展最为迅速的光纤无源器件之一。自从1978年K. O. Hill等人首先在掺锗光纤中采用驻波写入法制成世界上第一只光纤光栅以来,由于它具有许多独特的优点,因而在光纤通信,光纤传感等领域均有广阔的应用前景。随着光纤光栅制造技术的不断完善,应用成果的日益增多,使得光纤光栅成为目前最有发展前途,最具代表性的光纤无源器件之一。由于光纤光栅的出现,使许多复杂全光纤通信和传感网成为可能,极大地拓宽了光纤技术的应用范围。

光纤光栅传感器可拓展的应用领域有许多,在重大工程设施健康和安全管理监测领域的光纤传感技术与系统方面,主要包括:用于桥梁/大坝等大型建筑健康安全监测的光纤光栅传感技术与系统,用于高速公路/高架路车辆超载超限监测的光纤智能交通监测系统,用于防空洞/隧道/地铁等大型地下空间的温度/火灾报警的光纤分布式传感系统,用于输油气管道/城市地下管线安全监测的分布式光纤传感系统,用于变压器等大型电力设施监测的多参数光纤传感技术与系统等。在有毒、有害气体和生物化学物质探测的光纤传感技术与监测系统方面,主要包括:用于煤矿瓦斯监测的光纤瓦斯气体传感技术与系统,用于工业废气/汽车尾气等环保监测的光纤气体传感技术与系统,用于生化反恐的光纤生物化学传感技术与系统等。还包括应用于军事或政府机构等敏感区域和设施的光纤分布式安防预警技术与系统,应用于飞船、飞机等航空航天器以及潜艇、舰船的结构健康检测的光纤传感技术与系统等。

由于光纤光栅传感技术涉及光纤光学、光电子学、材料学、精密机械学、电子学、化学等多学科,因此是一门多学科交叉的科学与技术。本书力图在有限的篇幅内较为详细全面地介绍相关的基础理论和方法,以便令读者对光纤光栅的相关原理、方法和技术有个全面深入的了解。

希望本书能给从事光纤传感技术领域的科研和工程技术人员、高校的研究教学人员有所帮助。鉴于作者水平有限,最后成书的时间也比较仓促,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者指正和赐教。

本书在编写过程中,得到了很多老师和研究生的大力支持,杨剑、孟庆尧、陈坤、倪行洁、杨慧等为本书的编写、整理、校对等付出了大量的时间和工作,在此一并表示深深感谢!

赵 勇

2006年8月于清华园

目 录

第一章 光纤及光纤光栅的基本概念	1
1.1 光纤的基本概念	1
1.1.1 光纤的结构	1
1.1.2 光纤的材料	2
1.1.3 光纤的类型	3
1.1.4 光纤的特性	3
1.2 光纤光栅器件的基本概念	4
1.2.1 光纤光栅模式耦合理论	5
1.2.2 光纤光栅的加工工艺	6
1.2.3 光纤光栅的类型	11
1.3 光纤光栅器件在通信中的应用简介	15
1.3.1 光纤光栅激光器	15
1.3.2 光纤光栅放大器	18
1.3.3 色散补偿器	19
1.3.4 光分插复用器	19
1.3.5 光纤光栅波分复用器	20
1.3.6 光纤光栅波长转换器	20
1.3.7 光纤光栅滤波器	21
1.4 光纤光栅传感器基础	23
1.4.1 光纤光栅传感器基本原理	24
1.4.2 光纤光栅传感器术语及性能指标	24
参考文献	28
第二章 光纤光栅传感系统	30
2.1 光纤光栅系统的组成	30
2.1.1 光纤光栅传感系统的基本组成	30
2.1.2 光纤耦合器	30
2.1.3 光纤隔离器及环形器	34
2.1.4 光开关	35
2.1.5 波分复用器	43
2.2 光纤光栅传感系统中的光源	45
2.2.1 半导体激光器 LD	46

2.2.2	发光二极管 LED	47
2.2.3	放大自发辐射 ASE 光源	48
2.2.4	可调谐分布反馈 DFB 激光器	49
2.3	光纤光栅传感器的增敏与封装	51
2.3.1	光纤光栅应变增敏	51
2.3.2	光纤光栅温度增敏	51
2.3.3	光纤光栅温度减敏	52
2.3.4	嵌入式敏化与封装	52
2.3.5	粘敷式敏化与封装	53
2.4	光纤光栅传感器交叉敏感问题及其解决方法	54
2.4.1	温度测量	54
2.4.2	应变测量	54
2.4.3	应变与温度的分离测量	54
2.4.4	利用一只光纤光栅实现温度与力的分离测量	57
2.4.5	利用一只光纤光栅实现温度与位移的分离测量	58
2.4.6	压力与温度的分离测量方法	58
	参考文献	60
第三章	光纤光栅传感器	63
3.1	光纤光栅温度传感器	63
3.1.1	用裸光纤光栅传感器对温度进行测量	63
3.1.2	对裸光纤光栅封装制成的温度传感器	64
3.1.3	带有机机械结构的光纤光栅温度传感器	68
3.2	光纤光栅应变与位移传感器以及振动与加速度传感器	71
3.2.1	光纤光栅应变测量的基本公式	71
3.2.2	悬臂梁和简支梁	71
3.2.3	光纤光栅位移应变传感器	75
3.2.4	光纤光栅振动与加速度传感器	86
3.3	光纤光栅压力传感器	93
3.3.1	裸光纤光栅的压力测量	93
3.3.2	改进的光纤光栅压力传感器	94
3.4	光纤光栅电磁传感器	110
3.5	光纤光栅水声以及液体变化传感器	116
3.5.1	光纤光栅水声传感器	116
3.5.2	光纤光栅液体参数传感器	118
3.6	用于氢以及碳氢化合物检测的光纤光栅传感器	123
3.6.1	光纤光栅氢浓度传感器	123
3.6.2	光纤光栅碳氢传感器	127

3.7	光纤光栅折射率传感器	131
3.8	光纤光栅扭矩传感器	135
3.8.1	扭矩传感原理	135
3.8.2	光纤光栅扭矩传感器结构	136
3.9	基于双折射效应的光纤光栅称重传感器	142
	参考文献	145
第四章	光纤光栅传感网络与复用技术	150
4.1	光纤光栅传感网络的概念	150
4.1.1	传感器网络	150
4.1.2	光纤光栅传感网络	150
4.2	光纤光栅传感网络常见的复用技术	151
4.2.1	光纤光栅传感网络的波分复用技术	151
4.2.2	光纤光栅传感网络的空分复用技术	157
4.2.3	光纤光栅传感网络的时分复用技术	158
4.2.4	光纤光栅传感网络的副载波频分复用技术	159
4.2.5	光纤光栅传感网络的相干域复用技术	160
4.2.6	混合复用 FBG 传感网络	161
	参考文献	166
第五章	光纤光栅传感信号的解调方法	168
5.1	单光纤光栅传感信号的解调技术	168
5.1.1	复合干涉解调法	168
5.1.2	被动式波长比率解调法	169
5.1.3	波分复用(WDM)光纤耦合器解调法	171
5.1.4	非平衡 Mach-Zehnder 干涉解调法	172
5.1.5	锁模解调法	173
5.1.6	基于光纤 Fabry-Perot 滤波器解调法	174
5.1.7	非平衡扫描迈克耳逊干涉仪解调法	175
5.1.8	斜光纤光栅(TFBG)解调法	176
5.1.9	基于波长选择性探测器的解调法	176
5.1.10	傅里叶变换谱法	178
5.1.11	FBG 自解调法	178
5.1.12	匹配光纤光栅滤波法	179
5.1.13	波长扫描极值法	180
5.1.14	高折射环形镜边缘滤波法	181
5.1.15	保偏光纤环路调谐法	181
5.2	多光纤光栅分布式传感信号的解调技术	182
5.2.1	CCD 分光计法	183

5.2.2	匹配 FBG 可调滤波检测法	183
5.2.3	可调谐光纤 F-P 滤波器检测法	184
5.2.4	非平衡 M-Z 干涉仪检测法	185
5.2.5	结合时域地址查询技术的非平衡 Michelson 干涉解调检测法	186
5.2.6	可调窄带光源检测法	189
5.2.7	连续波调频技术	190
5.2.8	宽带光源/副载波检测法	191
5.2.9	可调制激光器解调系统	192
	参考文献	194
第六章	光纤光栅传感器的应用	196
6.1	光纤光栅传感器在结构健康监测方面的应用	196
6.1.1	光纤传感器在混凝土结构中的适应性研究	198
6.1.2	光纤传感器用于结构应变监测	199
6.2	光纤光栅传感器在石油工业中的应用	199
6.2.1	温度和压力的测量	200
6.2.2	流量及多相流测量	205
6.2.3	测井技术	207
6.2.4	地震波检测	207
6.2.5	长距离石油管线监测	208
6.3	光纤光栅传感器在航天器及船舶中的应用	208
6.4	光纤光栅传感器在船舶航运业中的应用	210
6.5	光纤光栅传感器在电力工业中的应用	212
6.6	光纤光栅传感器在医学中的应用	213
6.7	光纤光栅传感器在化学领域中的应用	214
6.8	光纤光栅传感器在核工业中的应用	214
	参考文献	215
第七章	新结构新材料光纤光栅器件	219
7.1	啁啾莫尔(重叠写入)型光纤光栅	219
7.2	双轴(保偏)光纤光栅	221
7.2.1	双轴光纤光栅的概念	222
7.2.2	边孔光纤光栅的特性	223
7.3	双包层光纤光栅	226
7.4	变包层光纤光栅	227
7.5	多模光纤光栅	230
7.6	少模光纤光栅	231
7.7	光纤光栅耦合器	233
7.7.1	分离式光纤光栅耦合器	233

7.7.2	融和式光纤光栅耦合器	234
7.8	光子晶体光纤光栅器件	235
7.8.1	掺锗光敏纤芯光子晶体光纤光栅	236
7.8.2	聚合物填充金属镀层的大尺寸空气孔包层长周期光子晶体光纤 光栅	237
7.8.3	无掺杂光子晶体光纤布喇格光栅	239
7.8.4	无掺杂纯硅大模面积长周期光子晶体光纤光栅	240
7.9	聚合物光纤光栅器件	241
7.9.1	聚合物光纤光栅的基本光学性质	241
7.9.2	聚合物光纤光栅的制作方法	242
7.9.3	聚合物光纤光栅的性能	243
7.10	阶跃变化折射率长周期光纤光栅	244
7.11	传感用光纤光栅	244
	参考文献	246

第一章 光纤及光纤光栅的基本概念

1.1 光纤的基本概念

1.1.1 光纤的结构

光纤的基本结构十分简单。光纤的纤芯是由折射率比周围包层略高的光学材料制作而成的,折射率的差异引起全内反射,引导光线在纤芯内传播,如图 1-1 所示。纤芯和包层的折射率差并不需要很大,实际上,只要大约 1% 就可以了。在光纤包层的外围,还有一些用于保护光纤的层面和结构,如图 1-2 所示。不同类型的光纤的纤芯和包层的几何尺寸差别很大。用于高清晰度传像光纤的芯径小、包层薄,传输高功率的照明光纤则一般有更粗的纤芯和细薄的包层。相比较而言,用于通信的光纤则是厚包层和小芯径。通信光纤的标准包层直径是 $125\mu\text{m}$ 。塑料涂覆层的直径约 $250\mu\text{m}$,其作用是保护光纤内部的玻璃表面,防止刮痕或其他机械损伤。图 1-2 中,如果只有 1~3,就是常被称作“裸光纤”的部分;1~4 一般构成外径是 $900\mu\text{m}$ 的光纤形式,外观的颜色以白色为主,也有黑色、蓝色、红色等颜色;而 1~6 一般构成外径是 2mm 或者 3mm 的光纤形式,外观的颜色一般有黄色和橙色两种。多根光纤以一定的结构形式就构成了光纤光缆,其结构如图 1-3 所示。

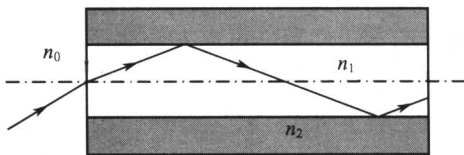


图 1-1 光纤纤芯结构及导光原理

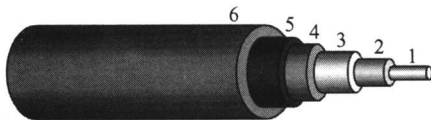


图 1-2 普通单根光纤结构

- 1—光纤纤芯; 2—光纤包层; 3—塑料涂覆层;
- 4—松套管; 5—Kevlar 绳(质地牢固质量轻的纤维);
- 6—聚乙烯护套。

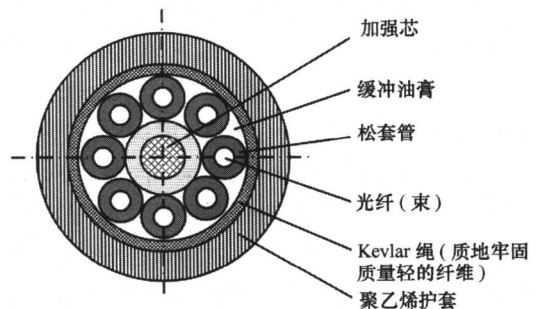


图 1-3 普通光纤光缆结构

1.1.2 光纤的材料

多数光纤是用高纯玻璃制造的,极小的掺杂用于调整光纤的折射率。从化学的角度讲,通信用最纯的光纤材料是纯二氧化硅,即 SiO_2 。医用传像光纤和照明光纤则使用低纯度玻璃制造。还有些光纤是用塑料做成的,虽然没有玻璃光纤那样透明,但是在一些场合显得更灵活易用。少数光纤使用塑料做包层材料,但一般情况下塑料都是作为用于机械保护的外部涂覆层。

以 SiO_2 材料为主的光纤,工作在 $0.8\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ 的近红外波段,目前所能达到的最低理论损耗在 1550nm 波长处为 0.16dB/km ,已接近石英光纤理论上的最低损耗极限。如果再将工作波长加大,由于受到红外线吸收的影响,衰减常数反而增大。因此,许多科学工作者一直在寻找超长波长($2\mu\text{m}$ 以上)窗口的光纤材料。这种材料主要有两种,即非石英的玻璃材料和结晶材料,晶体光纤材料主要有 AgCl 、 AgBr 、 KBr 、 CsBr 以及 KRS-5 等,目前 AgCl 单晶光纤的最低损耗在 $10.6\mu\text{m}$ 波长处为 0.1dB/km 。因此,需要寻求新型基体材料的光纤,以满足超宽带宽、超低损耗、高码速通信的需要。

氟化物玻璃光纤是当前研究最多的超低损耗远红外光纤,它是以 $\text{ZrF}_4 - \text{BaF}_2$ 、 $\text{HfF}_4 - \text{BaF}_2$ 两系统为基体材料的多组分玻璃光纤,其最低损耗在 $2.5\mu\text{m}$ 附近为 $1 \times 10^{-3}\text{dB/km}$,无中继距离可达到 $1 \times 10^5\text{km}$ 以上。1989年,日本 NTT 公司研制成功的 $2.5\mu\text{m}$ 氟化物玻璃光纤损耗只有 0.01dB/km 。目前 ZrF_4 玻璃光纤在 $2.3\mu\text{m}$ 处的损耗达到 0.7dB/km ,这离氟化物玻璃光纤的理论最低损耗 $1 \times 10^{-3}\text{dB/km}$ 相距很远,仍然有相当大的潜力可挖。能否在该领域研制出更好的光纤,对于开辟超长波长的通信窗口具有深远的意义。

硫化物玻璃光纤具有较宽的红外透明区域($1.2\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$),有利于多信道的复用,而且硫化物玻璃光纤具有较宽的光学间隙,自由电子跃迁造成的能量吸收较少,而且温度对损耗的影响较小,其损耗水平在 $6\mu\text{m}$ 波长处为 0.2dB/km ,是非常有前途的光纤。而且,硫化物玻璃光纤具有很大的非线性系数,用它制作的非线性器件可以有效地提高光开关的速率,开关速率可以达到数百 Gb/s 以上。

重金属氧化物玻璃光纤具有优良的化学稳定性和机械物理性能,但红外性质不如卤化物玻璃好,区域可透性差,散射也大,但若把卤化物玻璃与重金属氧化物玻璃的优点结合起来,制造成性能优良的卤-重金属氧化物玻璃光纤具有重要的意义。日本 Furukawa 电子公司,用 VAD 工艺制得的 $\text{GeO}_2 - \text{Sb}_2\text{O}_3$ 系统光纤,损耗在 $2.05\mu\text{m}$ 波长处达到了 13dB/km ,如果经过进一步脱 OH^- 的工艺处理,可以达到 0.1dB/km 。

聚合物光纤自 20 世纪 60 年代美国杜邦公司首次发明以来,取得了很大的发展。1968 年杜邦公司研制的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 阶跃型塑料光纤 (SI POF),其损耗为 1000dB/km 。1983 年,NTT 公司的全氟化 PMMA 塑料光纤在 650nm 波长处的损耗降低到 20dB/km 。由于 C-F 键谐波吸收在可见光区域基本不存在,即使延伸到 1500nm 波长的范围内其强度也小于 1dB/km 。全氟化渐变型 PMMA 光纤损耗的理论极限在 1300nm 处为 0.25dB/km ,在 1500nm 处为 0.1dB/km ,有很大的潜力可挖。近年来,Y. KOIKE 等以 MMA 单体与 TFPMA (四氟丙基丙烯酸甲酯) 为主要原材料,采用离心技术制成了渐变折射率聚合物预制棒,然后拉制成 GI POF (渐变折射率聚合物光纤),具有极宽的带宽

($>1\text{GHz}\cdot\text{km}$), 衰减在 688nm 波长处为 56dB/km , 适合短距离通信。国内有人以 MMA 及 BB(溴苯)、BP(联苯)为主要原材料, 采用 IGP 技术成功地制备了渐变型塑料光纤。日本 NTT 公司最近开发出氟化聚酰亚胺材料(FULPI)在近红外光内有较高的透射性, 同时还具有折射率可调、耐热及耐湿的优点, 解决了聚酰亚胺透光性差的问题, 现已经用于光的传输。聚碳酸酯、聚苯乙烯的研究也在不断进行中, 相信在不久的将来更好性能的聚合物光纤材料将得到开发和利用。

特殊的环境对光纤有特殊的要求, 石英光纤的纤芯和包层材料具有很好的耐热性, 耐热温度达到 $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$, 所以光纤的使用温度取决于光纤的涂覆材料。目前, 梯型硅氧烷聚合物(LSP)涂层的热固化温度达 400°C 以上, 在 600°C 的光传输性能和机械性能仍然很好。采用冷的有机体在热的光纤表面进行非均匀成核热化学反应(HNTD), 然后在光纤表面进行裂解生成碳黑, 即碳涂覆光纤。碳涂覆光纤的表面致密性好, 具有极低的扩散系数, 而且可以消除光纤表面的微裂纹, 解决了光纤的“疲劳”问题。

1.1.3 光纤的类型

光纤纤芯和包层的尺寸根据用途不同, 有多种类型。如传输图像的光纤要尽可能地收集到其端面上的光, 因此其包层相对于纤芯而言非常薄。在长距离传输过程中, 通信光纤的厚包层能避免光束泄漏出纤芯。各种类型的通信会有不同的特殊要求, 短距离通信光纤的纤芯较大, 能够尽可能地收集光, 一般成为多模光纤; 长距离通信光纤的纤芯直径一般很小, 一般只能传输一个模式, 因此称为单模光纤。常见的光纤纤芯/包层尺寸有 $100\mu\text{m}/140\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}/240\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}$, $62.5\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 和 $9\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 等。而这些光纤的外层一般都用直径为 $250\mu\text{m}$ 的塑料涂覆层加以保护。

此外, 还有一些用于特殊场合的光纤, 如折射率沿径向逐渐减小的自聚焦光纤棒。不同的长度, 这种自聚焦光纤棒具有各种不同的成像作用; 还可以用作准直物镜, 由于其一般具有较大的数值孔径, 还常用于光的耦合。塑料光纤是以光学塑料为材料的一类重要的光学纤维。它具有质量小、韧性好、对不可见光波透过性好等优点; 缺点是耐热性、抗化学腐蚀和表面磨损性能较差, 且易潮解。镀金属光纤是外保护层为金属膜的一种专用的传感光纤。这种金属膜保护层是在光纤拉丝过程中同时涂敷上去的, 金属膜的厚度一般在微米量级。其主要用途是改善增敏和去敏性能, 以满足不同的使用要求, 尤其是高性能光纤传感的要求。这种光纤最大的特点是可用于高温环境。此外还有用于远红外波段的氟化物光纤、具有光放大及产生激光性能的掺杂光纤、具有特殊光学性质的光纤光栅以及空心光纤等。

1.1.4 光纤的特性

一、机械特性

在机械特性方面, 光纤坚硬而又弯曲灵活, 机械强度极大。细光纤比粗光纤更容易弯曲。单根通信光纤可以弯成直径为 5cm 的环而不会有任何损伤。和电线不同, 光纤被弯曲后还能恢复到原来笔直的形状, 但光纤在受到外力牵引时不能一直延伸下去, 外力过大就会拉断光纤, 断裂前只能延伸到超过初始长度的 1% 左右。

玻璃纤维的机械强度大得惊人, 但是如果光纤布满了表面裂纹, 那光纤就很容易损伤

了。塑料涂覆层的作用就是防止光纤表面受到机械损伤。

二、光学特性

光纤的光学特性取决于它们的结构和成分。一般轴对称的单模光纤,可以同时传输两个线偏振正交模式或者两个圆偏振正交模式。若光纤是完全的轴对称形式(几何形状为理想圆,折射率分布均匀),这两个正交模式在光纤中将以相同的速度向前传播,因而在传播过程中偏振态不会变化。实际的光纤由于多少同时存在着非轴对称性和弯曲,因而两正交模式在传播过程中会发生耦合,其结果一是使得光波的偏振态在传播过程中发生变化,二是光波在传输过程中将发生“偏振(模)色散”,从而限制了单模光纤的信息传输速率。因此,一般的单模光纤不能用于传输偏振光。为此发展了能维持光波偏振态的偏振保持光纤,简称保偏光纤,其中包括高双折射(High Birefringence, HB)光纤和低双折射(Low Birefringence, LB)光纤。

一般单模光纤双折射定义为两正交模式传播常数之差,即 $\beta_x - \beta_y$,可用归一化双折射的数值 B 来区别高双折射光纤和低双折射光纤:

$$B = \frac{\beta_x - \beta_y}{\frac{1}{2}(\beta_x + \beta_y)} = \frac{n_x - n_y}{n} \quad (1-1)$$

式中: n_x 和 n_y 分别为两正交模式方向的折射率值。

普通的单模光纤当 B 值在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 之间,当 $B < 10^{-6}$ 时为低双折射光纤,当 $B > 10^{-5}$ 时为高双折射光纤。HB光纤又包括蝴蝶结型(Bow Tie),熊猫型(Panda),扁平包层型(Flat Cladding)。

光在光纤中传输,由于光纤内的吸收和散射,将引起光的损耗。任何材料都会吸收一定的光能量。吸收量与光波波长和材料本身有关。传统玻璃的吸收窗口较窄,几乎不吸收可见光,因此对人眼来说是透明的。然而即使是最干净的玻璃,对于波长为 $10\mu\text{m}$ 的红外光也是不透明的。吸收还和材料成分密切相关。光的散射与材料种类无关,但依赖于材料中粒子的大小:传输的光波长越接近粒子大小,散射越强。光纤中光的损耗一般以dB为单位计量。光的损耗或衰减度量的是输出光功率 P_o 与输入光功率 P_i 的比:

$$\text{光衰减量} = -10\lg\left(\frac{P_o}{P_i}\right) (\text{dB}) \quad (1-2)$$

在光纤光学中,还经常用dBm(相对于1mW功率的分贝值)来度量光功率的大小。因此,光功率可表示为

$$\text{光功率} = -10\lg\left(\frac{P_o}{1\text{mW}}\right) (\text{dBm}) \quad (1-3)$$

这样,大于1mW的功率为正值,小于1mW的功率为负值。如10mW就是10dBm,0.1mW就是-10dBm。

1.2 光纤光栅器件的基本概念

加拿大渥太华通信研究中心的K. O. Hill等人于1978年首次在掺锗石英光纤中发现

光纤的光敏效应,并采用驻波写入法制成世界上第一只光纤光栅^[1]。1989年,美国联合技术研究中心的 G. Meltz 等人^[2]利用掺锗光纤的紫外光敏特性,用 244nm 波长的紫外激光干涉条纹侧面照射纤芯掺锗的光纤,将任意工作波长的位相光栅写进了纤芯,形成光纤纤芯内布喇格光栅(光纤光栅),使光纤光栅的制作技术实现了突破性进展。之后, K. O. Hill 等人^[3]于 1993 年提出的相位掩膜制造法使光纤光栅的制造技术得到重大发展,使光纤光栅的灵活的大批量的制造成为可能,光纤光栅器件逐步走向实用化。光纤光栅是近几年发展最快的光纤无源器件之一,它的出现将可能在光纤技术以及众多相关领域中引起一场新的技术革命。由于它具有许多独特的优点,因而在光纤通信、光纤传感、光计算和光信息处理等领域均有广阔的应用前景。

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性(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,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波或反射镜。利用这一特性可构成许多性能独特的光纤无源器件,例如利用光纤光栅的窄带高反射率特性构成光纤反馈腔,依靠掺锗光纤等为增益介质可制成光纤激光器;用光纤光栅作为激光二极管的外腔反射器,可以构成可调谐激光二极管;利用光纤光栅可构成 Michelson 干涉仪型 Mach-Zehnder 干涉仪和 Febyr-Peort 干涉仪型的光纤滤波器。利用闪耀光纤光栅可以制成光纤平坦滤波器;利用非均匀光纤光栅可以制成光纤色散补偿器等。此外,利用光纤光栅还可以制成用于检测应力、应变、温度等诸多参量的光纤传感器和各种传感网。

1.2.1 光纤光栅模式耦合理论

光纤光栅的形成基于光纤的光敏性,不同的曝光条件、不同类型的光纤可产生多种不同折射率分布的光纤光栅^[4-6]。光纤芯区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。对于整个光纤曝光区域,可以由下列表达式给出折射率分布较为一般的描述:

$$n(r, \varphi, z) = \begin{cases} n_1 [1 + F(r, \varphi, z)] & |r| \leq a_1 \\ n_2 & a_1 \leq |r| \leq a_2 \\ n_3 & |r| > a_2 \end{cases} \quad (1-4)$$

式中: a_1 为光纤纤芯半径; a_2 为光纤包层半径; n_1 为纤芯初始折射率; n_2 为包层折射率; $F(r, \varphi, z)$ 为光致折射率变化函数,在光纤曝光区,其最大值为 $|F(r, \varphi, z)|_{\max} = \frac{\Delta n_{\max}}{n_1}$; Δn_{\max} 为折射率变化最大值。图 1-4 表示了光纤光栅区域的折射率分布情况,其中 Λ 为均匀光栅的周期。

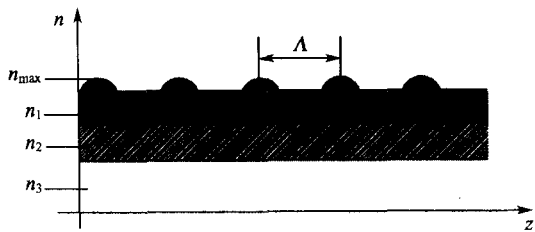


图 1-4 光纤光栅区域的折射率分布情况

光纤光栅区域的光场满足模式耦合方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA(z)}{dz} &= k(z)B(z)\exp\left[-i\int_0^z q(z)dz\right] \\ \frac{dB(z)}{dz} &= k(z)A(z)\exp\left[i\int_0^z q(z)dz\right] \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中: $A(z)$ 、 $B(z)$ 分别为光纤光栅区域中的前向波、后向波; $k(z)$ 为耦合系数; $q(z)$ 与光栅周期 Λ 和传播常数 β 有关。利用此方程和光纤光栅的折射率分布、结构参量及边界条件,并借助于四阶 Runge-Kutta 数值算法,可求出光纤光栅的光谱特性。光纤光栅的不同光谱特性呈现出不同的传输或调制特性,因而可构成不同功能的光纤器件。

1.2.2 光纤光栅的加工工艺

一、光敏光纤的制备

采用适当的光源和光纤增敏技术,可以在几乎所有种类的光纤上不同程度地写入光栅。所谓光纤中的光折变是指激光通过光敏光纤时,光纤的折射率将随光强的空间分布发生相应的变化,如这种折射率变化呈现周期性分布,并被保存下来,就成为光纤光栅。光纤中的折射率改变量与许多参数有关,如照射波长、光纤类型、掺杂水平等。如果不进行其他处理,直接用紫外光照射光纤,折射率增加仅为 10^{-4} 数量级便已经饱和,为了满足高速通信的需要,提高光纤的光敏性日益显得重要,目前光纤增敏方法主要有以下几种:① 掺入光敏性杂质,如:锗、锡、硼等。② 多种掺杂(主要是 B/Ge 共掺)。③ 载氢处理。所谓载氢光纤就是在刻写 FBG 前,将普通光纤浸泡在氢气中一段时间,使光纤中的氢达到饱和,提高芯区对 UV(紫外光)的吸收率。④ 刷火。

二、成栅的紫外光源

光纤的光致折射率变化的光敏性主要表现在 244nm 紫外光的吸收峰附近,因此除驻波法用 488nm 可见光外,成栅光源都是紫外光。大部分成栅方法是利用激光束的空间干涉条纹,所以成栅光源的空间相干性特别重要。目前,主要的成栅光源有准分子激光器、窄线宽准分子激光器、倍频 Ar 离子激光器、倍频染料激光器、倍频光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)激光器等,根据实验结果,窄线宽准分子激光器是目前用来制作光纤光栅最为适宜的光源。它可同时提供 193nm 和 244nm 两种有效的写入波长并有很高的单脉冲能量,可在光敏性较弱的光纤上写入光栅并实现光纤光栅在线制作。

三、成栅方法

1. 横向干涉法

利用双光束干涉所产生的干涉条纹对光纤曝光以形成光纤光栅。产生干涉条纹的方法有多种,全息相干法是最早用于横向写入制作 FBG 的一种方法,图 1-5 是其工作装置示意图,其结构类似于 M-Z 干涉仪,入射紫外光波长为 244nm,经分光镜分成两束,经全反射后相交于光纤上,产生干涉场,形成正弦分布明暗相间的干涉条纹。光纤经过一定的时间,在纤芯内部引起和干涉条纹同样分布的折射率分布的变化,从而在光纤上写入正弦分布的体光栅。

这种方法优点是:① 突破纵向驻波法对布拉格中心反射波长限制,使人们可以充分利用各波段。行之有效,操作简单。② 采用改变两束光的夹角或旋转光纤放置的方法都

可以方便改变中心波,如果将光纤以一定弧度放置于相干场,又可以得到 Chirped 型光纤光栅。缺点是:① 全息相干对光源的空间相干性和时间相干性都有很高要求。② 欲得到准确的布喇格中心反射波长,对光路调整有着极高精度要求。③ 全息相干法要有一定的曝光时间,这就要求在曝光时间内光路保持良好的防振,以避免波长量级的扰动造成光路错位,恶化相干效果。

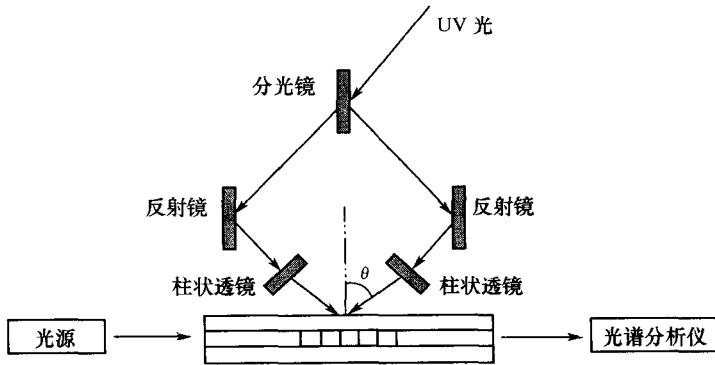


图 1-5 全息干涉法制作光纤光栅原理图

2. 相位掩膜成栅技术

相位掩膜成栅技术如图 1-6 所示。这种方法的关键是使用一个相位掩膜器(相位母板),该掩膜器是一个在石英硅衬底上刻制成周期为 Λ 的相位光栅,它可以用全息曝光或电子束蚀刻结合反应离子束刻蚀技术制作。相位掩膜器用来对衍射光束进行分离。理想的相位掩膜器应使相位光栅的零级衍射为零,正负一级衍射最大。这样,当紫外光垂直照射到相位掩膜器上时,在紧靠掩膜器的后面(微米数量级)即得到节距为 $\Lambda/2$ 的光栅衍射图样,从而在位于掩膜器之后的紫外光敏光纤上形成节距为 $\Lambda/2$ 的光纤布喇格光栅。

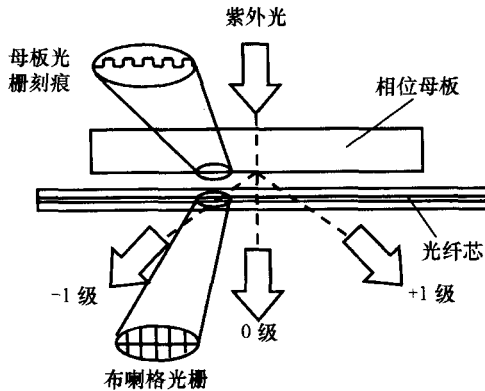


图 1-6 相位母板制作光纤光栅原理图

相位掩膜光栅衍射图样的周期不依赖于入射光波长,只与相位光栅的节距有关,因此这种方法对光源的相干性要求很低,从而提高了成栅的效率和光栅的质量。

这种方法的缺点是制作掩膜复杂。用低相干光源和相位掩膜版来制作光纤光栅的这种方法非常重要,并且相位掩膜与扫描曝光技术相结合还可以实现光栅耦合截面的控制,来制作特殊结构的光栅。该方法大大简化了光纤光栅的制作过程,是目前写入光栅极有

前途的一种方法。

3. 逐点写入法

这种方法是光束经柱面镜聚焦成细长条后在光纤侧面上曝光,写入光栅条纹。当一个光栅条纹写入后,光纤必须以纳米级的精度移动一个光栅节距。因此,这种方法是逐点写入光栅条纹的。它可用于在拉制光纤过程中,用激光脉冲一个个写入,实现规模化生产,但是这种方法的技术难度很大,对电机的精度和传动机构的精度要求很高。

4. 相位掩膜投影成栅法

相位掩膜投影成栅法是对相位掩膜成栅技术的改进,如图 1-7 所示。在传统的相位掩膜成栅法中,虽然可自动调整用来产生光栅的两束相干光的路径长度,但因条纹间距随相位掩膜器到光纤之间的距离显著地变化,所以记录下的光栅周期是不确定的。接近 1:1 的亚微米复制使相位掩膜光纤布喇格光栅的制造更加困难,紧靠光纤的掩膜器遭受到的激光辐射至少与射入到光纤上的一样强,所以容易使掩膜器产生损伤。为此,人们又对相位掩膜成栅技术进行了如图 1-7 的改进,在相位掩膜器和成栅光纤之间插入一个 10 倍的圆柱形透镜,从而使光纤成栅容易,同时又减少了对掩膜器损伤的危险。



图 1-7 掩膜投影成栅法原理图

5. 线性调制的啁啾光栅成栅法

上面介绍的几种写入光栅方法可以写入均匀光栅,也可以写入线性调制啁啾光栅(Chirp 光栅)。但由于 Chirp 光栅在色散补偿系统中所表现出的巨大潜力,所以各种专门制造 Chirp 光栅的方法,如两次曝光法、光纤弯曲法、锥形光纤法及应力梯度法等纷纷涌现。

(1) 两次曝光法 这种方法可采用较简单的制作均匀光纤光栅的曝光光路。第一次曝光在光纤上并不形成光栅,而是仅形成一个渐变的折射率梯度,第二次曝光过程则是在第一次曝光区域上继续写入周期均匀的光栅,两次效应叠加便构成了一个 Chirp 光栅。这种方法的优点是利用了制作均匀光栅的曝光光路,使得制作方法大大简化。

(2) 光纤弯曲法 这是在均匀光栅中引入光纤的机械变形,形成 Chirp 光栅的一种方法,由于光纤的弯曲角度渐变,造成光栅的周期渐变。这种方法引入的 Chirp 量不能过大,否则栅齿倾斜,会引起导模耦合成包层模而造成附加损耗。

(3) 锥形光纤法 这是利用锥形光纤形成 Chirp 光栅的一种方法。可以在锥形光纤两端施加应力发生形变,然后写入均匀周期的光栅,应力释放后,由于锥体各部分的伸长形变不同,造成光栅周期的轴向发生均匀变化,形成 Chirp 光栅。也可以先在锥形光纤上写入均匀光栅,然后再施加应力,可以得到相同的效果。

(4) 应力梯度法 与锥形光纤法原理相同,只是光纤中应力大小是通过将光纤粘在底座上的胶含量来调节。它的优点是可以分别调节中心波长和光栅的带宽,这对于制作高性能的色散补偿器具有重要的意义。

6. 长周期光栅成栅法

掩膜法是目前制做长周期光纤光栅最常用的一种方法,可制成周期 $60\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 范

围内变化的光栅,这种方法对紫外光的相干性没有要求。逐点写入法(见图 1-8)是利用精密机构控制光纤运动位移,每隔一个周期曝光一次,通过控制光纤移动速度可写入任意周期的光栅。这种方法在原理上具有最大的灵活性,对光栅的耦合截面可以任意进行设计制作。原则上,利用此方法可以制作出任意长度的光栅,也可以制作出极短的高反射率光纤光栅,但是写入光束必须聚焦到很密集的一点,因此这一技术主要适用于长周期光栅的写入。它的缺点是需要复杂的聚焦光学系统和精确的位移移动技术。目前,由于各种精密移动平台的研制,这种长周期光纤光栅写入方法正在越来越多地被采用。

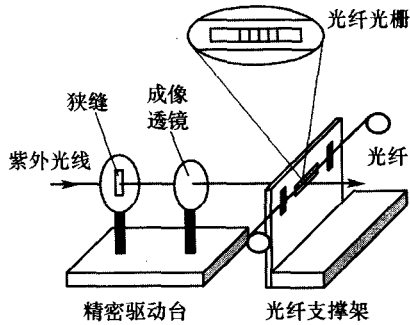


图 1-8 逐点写入成栅法原理图

7. 新的光纤光栅制作方法

(1) 直接写入法 直接写入法是指在制作光纤光栅时,无须剥去光纤的涂覆层而直接在纤芯上写入光纤光栅的方法。此法关键是采用对紫外光透明的材料作为光纤的涂覆层。目前报道的光纤涂覆层有采用丙烯酸酯或 General Electric RTV615 硅胶,通过加大紫外光强度、减小涂覆层厚度以及对光纤氢载等方法可以有效提高光纤光栅的写入时间。这种方法解决了以往传统方法中必须采用刻光纤的弊端,减少了对光纤光栅制作完后要立即进行涂覆的工艺复杂性,具有很好的应用前景。

(2) 在线成栅法 这是最新出现的一种成栅方法。南安普敦大学的 Ldong 等人采用脉冲单点激射的方法,首次实现了光纤拉制过程中写入光纤光栅的实验。它是在光纤拉制过程中在探光纤上直接写入光栅。通过对干涉系统中两束干涉光夹角的调节,可在线自动写入反射波长不同的一系列光纤光栅。使用这种方法,制造工艺简单,能连续大批量地制造光纤光栅,提高了光栅性能的稳定性,它的技术关键是要对所使用的准分子激光光束截面进行改进才能满足实用化的要求。

(3) 光纤刻槽拉伸法 用精密切割机对光纤进行周期性机械刻槽,用氢气火焰对 V 型槽区域的光泽进行拉伸退火,熔融玻璃表面应力的影响,以及 V 型槽一边的光纤的纤芯不平衡等因素,纤芯产生周期性的畸变,导致纤芯折射率的周期性变化。利用此方法已经成功研制成的长周期光纤光栅,具有很好的宽阻带特性(30nm),可应用于宽阻带滤波器的波分复用系统。这种方法的缺点是机械加工的精度要求较高,目前很少被采用。

(4) 微透镜阵列法 这种写入长周期光纤光栅方法的关键技术是采用一种微透镜阵列,将一平行的宽束准分子激光聚焦成平行等间距的光条纹,投影到单模光纤上,其中相邻微透镜之间无间隙,其中心间距决定了写入光栅的空间周期。这种方法写入一个长周期光纤光栅仅需 10s,大大提高了写入效率。通过控制写入时间和写入光栅的总长度,可