

光纤光栅 理论基础与传感技术

张自嘉 著



科学出版社

www.sciencep.com

光纤光栅理论基础与传感技术

张自嘉 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了光纤光栅的发展、基本理论、特性和应用。从内容上分为光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅两部分。前者主要包括光纤布拉格光栅的发展、耦合模方程、谱宽度、传输矩阵、多层模方法等,以及相移、啁啾、取样光纤布拉格光栅的特性和应用、光栅的级联、法布里-珀罗光纤光栅滤波器等,同时还介绍了群速度、群时延、色散等概念,并给出了分析非均匀光纤布拉格光栅的 Riccati 方程,介绍了光纤布拉格光栅的轴向应变、温度传感特性、波长解调方法及应用等。后者详细介绍了耦合模方程、谱特性、传输矩阵等,以及相移、级联长周期光纤光栅,分析了长周期光纤光栅对轴向应变、温度、折射率、扭转、弯曲等外界微扰的敏感特性,以及金属包层长周期光纤光栅的特性。最后介绍了光纤光栅的制作方法,附录中详细给出了单轴晶体光纤的本征方程和场方程。

本书侧重于从理论方面详细分析光纤光栅的各种特性,可供从事光纤光栅、光通信、传感应用专业的科研人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅理论基础与传感技术/张自嘉著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-023670-8

I. 光… II. 张… 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(2008)第 196573 号

责任编辑:孙芳 王志欣 王向珍 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵博 / 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>

竣工印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年8月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—2 000 字数:334 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

1978年,世界上诞生了第一根光纤布拉格光栅,1996年,出现了长周期光纤光栅。这些年来,很多学者为此付出了劳动和努力,人们对光纤光栅有了较深入的了解,光纤光栅在实际中获得了应用。目前,国内外大量文献对光纤光栅进行了研究介绍,虽然对平面光波导中的同向模间的耦合和反向模间的耦合有较早的研究,但对光纤光栅中的同向模间和反向模间的耦合研究却较晚,大量文献主要出现在20世纪90年代以后。国内外有几部著作介绍了光纤光栅,但都局限于介绍光纤光栅的特性、应用、制作方法,在理论方面通常都是直接引用文献上的结果,较少从理论上系统和全面地介绍分析光纤光栅,而且不同文献在理论上给出的结果存在一定的差异。本书旨在将分布在这些文献上有关光纤光栅的资料,特别是理论方面的内容整理在一起,并给出完整和系统的推理过程,给读者尤其是初学者提供一个能够快速了解和系统掌握光纤光栅的发展、研究方法、特性和应用的捷径。

作者希望给出有关光纤光栅的基本理论,特别是给出较详细而且容易理解的推理过程,对一些主要和基本公式,不是简单地引用文献上的结果,而是给出较详细的推导过程,以使读者能够更深刻地了解光纤光栅的特性,掌握研究方法,为从事有关方面的研究提供参考。例如,从一般的耦合模方程得到光纤布拉格光栅的耦合模方程,一般文献上都是直接给出结果,或引用其他文献上的结果。实际上,在这一过程中,忽略一些次要项,保留主要作用的项,便可以得到严格求解的耦合模方程。但若按严格的数学推理,却无法得到此方程,这对其他方面的研究有一定的参考意义。

在编写本书的过程中,出现了一些问题或困难,主要是有些公式在不同文献中互不相同,较为典型的有光纤布拉格光栅耦合模方程、传输矩阵、啁啾光栅的Riccati方程和长周期光纤光栅的应变与温度灵敏度公式等。光纤布拉格光栅的耦合模方程的差别在于两个方程的右边,有些文献上为一正一负,有些文献皆为正,在用解析法求解时,实际上前者得到的是光纤布拉格光栅的解,后者得到的是长周期光纤光栅的解。有些文献中给出的传输矩阵虽然得到的结果和实验所得基本符合,但在一些细节上有差别,从数学上严格推导时无法合理地给出。还有坐标原点的选取问题,有些文献中对相移光纤光栅的传输矩阵都是直接给出一个相移矩阵,而实际上是将折射率的相移直接反映在电场振幅的相移上,这显然是不合理的。选取一个非常特殊的点作为坐标原点,相当于将各段光栅之间的关系分开。因此,对于传输矩阵,结合作者近年来的研究成果,在本书给出了详细的推导过程。对于

长周期光纤光栅的应变和温度灵敏度公式,不少文献中也不相同,本书给出了详细的推导过程,这里不细说其中的差别,读者可以自行加以对比。由于本书希望能够系统并符合数学逻辑地给出各种结果,而且要保持前后的连贯性,因此,有些表达方法与其他文献中的方法有些差别。

本书若能对读者认识和掌握光纤光栅有一些帮助,作者则深感宽慰,在光纤的制作和应用方面,本书只是做了简单的介绍,希望能起到抛砖引玉的作用。

本书的部分工作是作者在上海交通大学攻读博士学位期间完成的,感谢导师施文康教授的精心指导。在本书的编写过程中,作者和中国科学院上海光学精密机械研究所的高侃博士进行了深入的讨论和交流,受益颇深,在此深表谢意。另外,作者还和上海交通大学光纤技术研究所的叶爱伦教授、王义平博士进行了广泛交流,在此感谢他们的帮助。还要特别感谢中国科学院上海光学精密机械研究所的方祖捷研究员,作者和他进行了多方面的讨论,而且他还对全书进行了两次详细的审阅,提出了很多宝贵意见和建议。本书参考了国内外相关文献,在此一并表示衷心感谢。感谢南京信息工程大学的鼎力支持,在他们的支持和资助下,本书才得以顺利出版。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2009年5月

常 数 表

真空中光速	$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
真空磁导率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}$
真空介电常数(电容率)	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$

Coning SMF-28 单模光纤基本参数:

(1) 纤芯直径 $2r_1 = 8.3\mu\text{m}$, 包层直径 $2r_2 = 125\mu\text{m}$, 对波长为 1550nm 的光, 纤芯折射率 $n^{\text{co}} = 1.4681$, 纤芯和包层折射率差 0.36%, 即包层折射率 $n^{\text{cl}} = 1.4628$ 。

(2) 纤芯直径 $2r_1 = 8.2\mu\text{m}$, 包层直径 $2r_2 = 125\mu\text{m}$, 对波长为 1550nm 的光, 纤芯折射率 $n^{\text{co}} = 1.4682$, 纤芯和包层折射率差 0.36%, 即包层折射率 $n^{\text{cl}} = 1.4629$ 。

本书主要取第(1)组光纤基本参数进行有关计算。

目 录

前言	
常数表	
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 光纤光栅的发展	3
1.3 光纤光栅的主要应用	5
参考文献	6
第 2 章 光纤光栅基础	10
2.1 光纤的基本结构与模式	10
2.1.1 光纤的基本结构	10
2.1.2 纤芯模和包层模	11
2.1.3 模的传播常数与有效折射率	12
2.2 光纤光栅概述	15
2.2.1 平面光栅	15
2.2.2 光纤光栅	18
2.2.3 光纤光栅谱	20
2.2.4 非均匀光纤光栅	21
2.3 光纤光栅的应用	23
2.4 光纤的光敏性和载氢	30
参考文献	34
第 3 章 耦合模理论与光纤布拉格光栅	41
3.1 规则光波导的本征模及模的正交性	41
3.2 耦合模理论	43
3.3 均匀光纤布拉格光栅的耦合模方程及其求解	46
3.4 光纤布拉格光栅的带宽	50
习题	51
参考文献	52
第 4 章 相移、切趾和啁啾光纤布拉格光栅	53
4.1 相移光纤布拉格光栅及其传输矩阵	53
4.2 模自耦合的影响	60

4.3	切趾光纤布拉格光栅	63
4.4	啁啾光纤布拉格光栅及 Riccati 方程	65
4.5	啁啾光纤布拉格光栅的传输矩阵法分析	68
4.6	光在光纤中传输时的色散和时延	69
4.6.1	光的色散、相速、群速和时延	69
4.6.2	光纤的色散和时延	71
4.7	光纤布拉格光栅的色散	72
4.8	啁啾光纤布拉格光栅的色散特性及其应用	75
4.9	切趾对啁啾光纤布拉格光栅色散特性的影响	78
	习题	80
	参考文献	81
第 5 章	取样光纤布拉格光栅及光纤光栅的多层模法分析	85
5.1	取样光纤布拉格光栅的谐振条件及谱间隔	86
5.2	取样光纤布拉格光栅的传输矩阵	88
5.3	取样光纤布拉格光栅反射谱中的缺级现象	92
5.4	切趾取样光纤布拉格光栅	94
5.5	光纤布拉格光栅的级联	97
5.6	法布里-珀罗光纤布拉格光栅滤波器	98
5.7	光纤布拉格光栅的多层模法分析	100
5.7.1	多层模的矩阵法	101
5.7.2	多层模的迭代法	104
	习题	105
	参考文献	106
第 6 章	光纤布拉格光栅传感器及其应用	109
6.1	概述	109
6.2	光纤布拉格光栅的轴向应变传感特性	111
6.2.1	弹光效应	112
6.2.2	光纤布拉格光栅的轴向应变灵敏度	114
6.2.3	光纤布拉格光栅轴向应变灵敏度的数值计算	116
6.3	光纤布拉格光栅的温度传感特性	118
6.4	光纤布拉格光栅的温度与应变交叉敏感问题	119
6.5	光纤布拉格光栅传感器的波长解调	121
6.6	光纤光栅传感的复用技术和传感网络	127
6.6.1	复用技术	127

6.6.2 传感网络	129
6.7 光纤布拉格光栅传感器应用	130
6.7.1 光纤布拉格光栅传感器的主要应用	130
6.7.2 光纤布拉格光栅传感器的安装、稳定性和耐久性问题	131
参考文献	131
第7章 长周期光纤光栅的基本特性	137
7.1 概述	137
7.2 长周期光纤光栅的耦合模理论分析	139
7.3 长周期光纤光栅的耦合模方程求解	141
7.4 谐振波长与耦合深度	143
7.5 长周期光纤光栅的带宽	146
7.6 长周期光纤光栅的传输矩阵	149
7.7 相移长周期光纤光栅	150
7.8 长周期光纤光栅的级联	151
7.9 长周期光纤光栅的谱结构分析	156
参考文献	160
第8章 长周期光纤光栅的耦合常数	163
8.1 长周期光纤光栅的模耦合常数	163
8.1.1 模耦合常数	164
8.1.2 2-2 层介质模型长周期光纤光栅的纤芯模和包层模	165
8.2 2-2 层介质模型长周期光纤光栅的模耦合常数	167
8.3 2-3 层介质模型长周期光纤光栅的模耦合常数	169
8.3.1 三层介质模型光纤的包层模	169
8.3.2 三层介质光纤包层模本征方程的求解及包层 HE/EH 模	172
8.3.3 2-3 层介质模型长周期光纤光栅的模耦合	173
8.3.4 纤芯模的弱导近似	174
习题	175
参考文献	176
第9章 长周期光纤光栅传感特性	177
9.1 长周期光纤光栅的轴向应变特性的简化分析	177
9.2 轴向应变光纤的特点	181
9.3 单轴晶体光纤的纤芯模和包层模本征方程	181
9.3.1 两层介质模型单轴晶体光纤的纤芯模本征方程	181
9.3.2 三层介质模型单轴晶体光纤的包层模本征方程	182

9.4	轴向应变长周期光纤光栅的应变灵敏度分析	183
9.5	长周期光纤光栅的温度传感特性	186
9.5.1	温度对光纤纤芯模和包层模有效折射率的影响	186
9.5.2	长周期光纤光栅的温度灵敏度	188
9.6	长周期光纤光栅的折射率传感特性	191
9.6.1	长周期光纤光栅折射率传感特性概述	191
9.6.2	长周期光纤光栅的折射率灵敏度	193
9.6.3	薄包层长周期光纤光栅的折射率灵敏度	194
9.7	长周期光纤光栅的扭转	196
9.7.1	ULPFG 的扭转实验	197
9.7.2	ULPFG 的扭转特性分析	198
9.7.3	CLPFG 的扭转特性	199
9.8	长周期光纤光栅的弯曲	201
	参考文献	203
第 10 章	金属包层长周期光纤光栅	207
10.1	金属的光学特性	207
10.2	金属包层长周期光纤光栅的特点及包层模本征方程	208
10.3	复本征方程的求解	210
10.4	金属包层对长周期光纤光栅谐振波长的影响	212
10.5	金属包层长周期光纤光栅谐振峰的电调谐	214
	参考文献	215
第 11 章	光纤光栅的制作	216
11.1	光纤光栅制作方法简介	216
11.2	啁啾光纤布拉格光栅的制作	224
11.3	取样光纤布拉格光栅的制作	227
11.4	切趾光纤布拉格光栅的制作	228
11.5	长周期光纤光栅制作中的若干问题	229
	参考文献	234
附录 A	两个包层模本征方程的等价性证明	239
附录 B	长周期光纤光栅纤芯模到包层模耦合常数	241
附录 C	单轴晶体光纤本征方程	243
C.1	三层介质模型单轴晶体光纤中的电磁场方程	243
C.2	三层介质模型单轴晶体光纤的包层 HE/EH 模本征方程	243
C.3	三层介质模型单轴晶体光纤的纤芯 HE/EH 模本征方程	249

附录 D 单轴晶体光纤场方程	251
D.1 单轴晶体光纤的 HE/EH 包层模场方程	251
D.2 对易关系及单轴晶体光纤的 HE/EH 纤芯模场方程	258
附录 E 贝塞尔函数公式	262

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

光电子器件的进步推动了光纤通信的发展,期间出现了包括光纤光栅在内的各种光纤器件。1966年,英国标准电信研究所的华裔科学家高锟博士等提出了用介质光波导或光导纤维(光纤)来取代传统的电缆,用导波中的光来传递信息,论证了光纤可用于长距离信息传输,从而奠定了光纤通信的理论基础。虽然当时的光纤损耗高达1000dB/km,实用价值不大,却有划时代的意义。1970年,美国康宁玻璃公司研制成功了衰减为20dB/km的光纤,同年,美国贝尔实验室制作出了可在室温下连续工作的半导体激光器,这两项成就为光通信的发展奠定了基础。之后,世界上许多国家竞相开展光纤通信的研究,揭开了发展光纤通信的序幕。到1976年,光纤在850nm窗口的损耗已降到1.6dB/km,后来在1310nm窗口降到0.5dB/km左右,这些都远远低于同轴电缆的5~10dB/km的损耗,1987年,已实现50km以上的无中继传输。1983年后,许多国家先后宣布在长途干线通信中不再铺设电缆,而改为光缆。近年来,光纤在1550nm窗口的损耗已降到0.2dB/km以下。随着光纤的制作技术和相关器件的发展,光纤通信经历了传输介质从多模光纤传输到单模光纤传输、传输波长从850nm波段到1310nm波段和1550nm波段、系统从单波长传输到波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)和密集波分复用的演变。在这个过程中,出现了许多与光纤通信有关的重要器件,如半导体激光器、光纤激光器、光纤放大器、光纤光栅等。半导体激光器和光纤激光器都是光纤通信中的光源(或调制器),是必不可少的。1978年出现了光纤光栅,其意义在于改变了很多光通信器件的结构。1986年,英国南安普顿大学制作出了掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA),被誉为光纤通信发展史上一个重要的里程碑,它可以直接放大光信号,使光—电—光中继变成了全光中继,极大降低了设备的成本,提高了传输质量,是一次极为重要的飞跃。

由于具有低损耗、大带宽和不受电磁干扰等特点,光纤已成为现代通信网络中的重要传输媒介。另外,光纤对很多物理量具有敏感性,因此,也已成为传感领域的重要器件。光纤传感器以其灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、可绕曲、体积小、可埋入工程材料及进行分布式测量等优点受到了广泛重视。

光纤光栅是最近几年发展非常迅速的光纤无源器件。1978年,加拿大通信研

究中心的 Hill 等首先发现掺铒光纤的光敏性,并制作出世界上第一根光纤光栅^[1],被用作窄带滤波器^[2,3]。由于它具有许多独特的优点,尤其是随着掺铒光纤放大器和波分复用技术的发展,在光纤通信和光纤传感等领域受到重视并得到广泛应用。

光纤光栅是通过一定的方法在光纤纤芯形成永久性折射率周期性变化的光纤器件,实质上是纤芯折射率发生周期性变化的一段光纤。一般是利用某些光纤(如纤芯掺铒的光纤)的光致折射率变化特性,通过采用紫外激光曝光的方法使纤芯的折射率发生改变^[1]。也有用将光纤侧面抛光并和平面光栅相结合的方法制作光纤光栅。实际上,只要在光纤纤芯或包层中沿轴向形成永久的折射率周期或准周期性变化,都能够形成光纤光栅。在光纤中写入光纤光栅,其基本作用是使某些波长的光的传输受到损耗或反射。

由于出现时间先后的不同和原理的差别,光纤光栅大致可以分为两大类,即光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)和长周期光纤光栅(long-period fiber grating, LPFG)。但这两类光纤光栅无论是制作方法还是理论处理上都有很多类似之处,都可用于传感和通信等领域,并且都有为改进性能和用于不同目的多种类似结构变化,因此,两者有着不可分割的联系。

早期的光纤光栅主要是光纤布拉格光栅(短周期光纤光栅),1996年出现了长周期光纤光栅,并迅速得到发展。一般,前者的周期在微米量级(光波长量级),后者的周期分布较宽,在几十微米到几百微米之间。光纤光栅在光纤通信、光纤传感及集成光学等领域有着现实的和潜在的应用价值,因而备受关注。根据特定的光栅结构,光纤光栅可以做成滤波器、模式转换器、分插复用器、掺铒光纤放大器的增益均衡器、色散控制与补偿器、光分插复用器和光纤传感器等,可以制成满足各种光纤通信要求的有源和无源器件。由于光纤光栅器件易于与光纤连接,对偏振不敏感,在光纤通信中与其他光波导器件(如平面光波导等)相比有着明显的优势,近年来得到迅速发展。

按纤芯折射率沿轴向分布的形式,可将光纤光栅分为均匀光纤光栅和非均匀光纤光栅。均匀光纤光栅是指光栅折射率变化幅度和周期沿轴向保持不变的光纤光栅,包括均匀光纤布拉格光栅和均匀长周期光纤光栅。均匀光纤光栅是最基本的一类光栅,是研究其他光栅的基础。非均匀光纤光栅是指光栅折射率变化幅度和周期沿轴向按一定规律变化的光纤光栅。在光纤光栅中,折射率的分布规律反映了光纤光栅的周期、折射率调制深度等结构参量,这些参量又决定了光纤光栅的反射光波长或透射光波长、带宽和反射率等特性,它们可用于改善光纤光栅的特性,形成种类繁多、用途广泛的光纤光栅器件,常见的有切趾/变迹光纤光栅(apodized fiber grating)^[4,5]、啁啾光纤光栅(chirped fiber grating)^[6~8]、相移光纤光栅(phase shifted fiber grating)^[9~12]、取样光纤光栅(sampled fiber grating)或超结构

光纤光栅(super structure fiber grating)^[13~17]、倾斜光纤光栅(tilted fiber grating)^[18~20]、摩尔光纤光栅(Moiré fiber grating)^[21~25]等,它们可用于改善光纤光栅光谱的某些特性。

1.2 光纤光栅的发展

光纤光栅是近十多年来得到迅速发展的光纤器件,其应用是随着写入技术的不断改进而发展起来的,逐渐在实际中得到应用。

1978年,加拿大通信研究中心的 Hill 等发现纤芯掺铊的光纤具有光敏性,并利用驻波干涉法制成了世界上第一根光纤光栅^[1]。光纤的光敏性主要是指光纤的折射率在受到某些波长的激光照射后,会发生永久改变的特性。通常情况需要紫外光照射,折射率会向着增大的方向改变。具有光敏性的光纤主要是纤芯掺铊的光纤,受到紫外光照射后,纤芯折射率会增加,而包层折射率不变。

驻波干涉法是利用纤芯掺铊的光敏光纤,使 488nm 的氩离子激光在光纤中沿相反的两个方向传播,在光纤中形成一个稳定的驻波干涉条纹,由于这一波长的激光会使纤芯的折射率发生永久的改变,纤芯的折射率就会按照驻波的分布而形成周期性的永久变化,在驻波的波峰处折射率会增加,而波谷处则几乎不变。折射率的这种周期性改变会对某一极窄带宽内的光具有极强的反射作用,而其他波长的光则可以几乎不受影响地通过,其反射特性和光栅的周期有关,这种反射在机理上服从布拉格衍射的原理,因此称为光纤布拉格光栅。布拉格父子是英国物理学家,因研究 X 射线晶体学而著名,他们认为晶体中整齐排列相互平行的原子可以看成衍射光栅,并推导出了晶体衍射中著名的布拉格公式。1915年,布拉格父子共同获得诺贝尔物理学奖。层状介质或薄膜的反射与 X 射线在晶体上的反射类似,因此称为布拉格反射。早在光纤光栅以前,就把在平面光波导中沿光传播方向制作的多层介质结构(这种结构称为光栅)的反射称为布拉格反射,相应的光栅称为布拉格光栅。光纤中光栅的反射事实上也是一种层状介质的反射,因此把光纤中沿轴向分布的多层介质结构称为光纤布拉格光栅。通常,把利用这种方法制作的光纤光栅称为“Hill gratings”^[26],其特指反射波长与写入波长相同的光栅。当时制作光栅的反射率可以达到接近 100% 的饱和值,反射带宽可小于 200MHz。这种方法虽然结构简单,但存在许多不足,只能制成反射波长为写入激光波长的光栅,还需要高掺铊量的光纤,在制作过程中要求光源非常稳定,也就是形成的驻波条纹在写入过程中保持不变,这在当时是比较高的要求。另外,写入的光栅也较长,当时为 1m 左右,对温度较为敏感,因此限制了它的应用,这种方法目前已很少采用,但对光纤光栅的发展具有重要意义。

在制成“Hill gratings”后的 10 余年里,光纤光栅的应用与制作均发展十分缓

慢,由于这种制作方法及光栅本身存在的不足,限制了光栅在实际中的应用。直到1989年,美国东哈特福德联合技术研究中心的 Meltz 等利用 244nm 的紫外光双光束全息曝光法成功地制成了光纤光栅^[27],用两束相干光相遇时所产生的干涉条纹使光敏光纤曝光,形成折射率的周期性永久改变,从而制成光栅。与纵向驻波干涉法相比,这种方法的写入效率大大提高,并且可以通过改变两干涉光的波长和两光束之间的夹角来调整光栅的周期,易于获得所希望的布拉格反射波长,这种光栅已达到实用阶段。但这种方法也有其缺点:一是对光源的相干性要求较高;二是对系统的稳定性要求较高。

在光纤光栅的发展过程中,掺锗光纤的载氢技术具有重要意义。掺锗光纤本身具有光敏性,但当要求折射率改变较大时,相应就要提高纤芯的掺锗浓度,这会影响到光纤自身的特性。1993年,贝尔实验室的 Lemaire 等用光纤载氢技术增强了光纤的光敏性^[28],这种方法适用于任何掺锗的光纤。通过光纤的载氢能够在不增加掺锗浓度情况下,使光纤的光敏性大大提高。

1993年,又提出了制作光纤布拉格光栅的相位掩模(phase mask)法^[29,30],是目前为止最为实用化的一种方法,仍被普遍采用。这种方法的关键是相位掩模板。利用紫外激光照射掩模板,通过掩模板的衍射形成的条纹使光纤曝光而制成光栅。用相位掩模法制作光纤光栅的优点是工艺简单,重复性好,成品率高,便于大批量生产,光栅周期与曝光用的光源波长无关,这些优点使制作光纤光栅变得简单和实用,大大推动了光纤光栅技术的应用和发展。缺点是相位板制作成本较高,一块相位板只能制作一种固定周期的光纤光栅,但用光学系统放大或拉伸光纤的办法也可制作周期稍有不同的光栅。

1996年,出现了长周期光纤光栅^[31~33],这种光栅的周期较长,可以在数十微米到几百微米之间。光纤布拉格光栅具有选择性反射作用,而长周期光纤光栅则是将纤芯模(或导模)耦合到包层模,包层模在传播不远后会损耗掉,从而在透射光中形成损耗峰。长周期光纤光栅的损耗作用也具有选择性,但其光谱要宽得多,其最早的制作方法是振幅掩模(amplitude mask)法。1996年,Vengarsker 等借用光纤布拉格光栅的相位掩模写入法,利用 248nm 的紫外激光,通过一块振幅掩模板照射载氢后的掺锗光纤,从而在纤芯中形成永久折射率改变,首次制成了长周期光纤光栅。1998年,报道了采用 10.6 μm 的 CO₂ 激光脉冲逐点写入长周期光栅的方法^[34],这种方法的优点是灵活性高,使用普通的通信光纤,而且不必载氢,不用掩模板,周期容易控制,可以制作切趾光纤光栅,对光源的相干性没有要求;缺点是需控制光栅周期,需要精确的运动控制机构,周期小时难度较大,而且受光点尺寸限制,光栅周期不能太小。目前,主要用高频 CO₂ 激光逐点写入长周期光纤光栅^[35]。另外,还可以用微透镜阵列^[36,37]、普通紫外光源等方法写入长周期光纤光栅^[38],或电弧放电法^[39~43]、刻槽法^[44~46]、离子束写入法^[47,48]等,但目前主要的写

人方法仍是利用紫外激光的振幅掩模法和 CO₂ 激光逐点写入法。

1.3 光纤光栅的主要应用

在平面介质光波导中,布拉格光栅的应用较早,主要应用于半导体激光器中,而后出现了光纤布拉格光栅,随着光纤光栅写入技术的成熟,光纤光栅在光通信和传感中得到广泛应用,特别是在光通信领域。光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的特性和应用有许多不同之处,也有类似的地方,都可用于通信和传感等领域。

光纤布拉格光栅的周期一般在微米以下,根据模式耦合理论,这样的周期表现为使前向传播的纤芯模与后向传播的纤芯模之间发生耦合,结果在输出端表现为很窄的带阻滤波特性。作为一种反射型的光纤无源器件,光纤布拉格光栅对温度、应变都有相当程度的敏感特性,其在光纤激光器、波分复用、可调谐光纤滤波器、高速光纤通信系统的色散补偿及光纤传感器等方面有许多重要应用。

光纤布拉格光栅在刚出现时就被用于光纤窄带滤波器^[2,3,20],这也是光纤布拉格光栅的最基本应用,很多应用都是基于其窄带滤波作用。

光纤布拉格光栅的选择性反射特性被广泛应用于光纤激光器中^[49~51]。利用一对谐振波长相同的光纤布拉格光栅,可以构成光纤激光器的镜腔,这样的激光器具有成本低、便于和光纤耦合、可以准确地控制波长且线宽窄、稳定性高、波长易于调谐等优点。

光纤布拉格光栅的另一个重要应用是光纤的色散补偿。光纤的色散是影响光纤传输能力的主要因素之一,利用啁啾光纤布拉格光栅,可以方便地消除光纤的色散效应。随着光纤布拉格光栅的出现与写入方法的成熟,啁啾光纤布拉格光栅被广泛用于对光纤的色散补偿。早在 1987 年,加拿大的 Ouellette 就提出了用啁啾光纤布拉格光栅对光纤的色散进行补偿^[6],接下来的几年,很多学者对利用啁啾光纤布拉格光栅进行色散补偿进行了大量研究^[7~9,52~55],在 10Gbit/s 情况下,利用光纤光栅相继达到对 160km、220km、400km 长度光纤上产生的色散进行补偿。1996 年报道用 10cm 长的啁啾光纤布拉格光栅可以补偿 700km 长的光纤产生的色散^[53~55],近些年正在研究通过色散斜率补偿及调节来进一步提高比特率^[56~58],以及多通道高比特率同时补偿^[59~65]。

此外,光纤布拉格光栅还可用于波分复用/解复用器、半导体激光波长稳定器、光纤放大器、光纤隔离器等。光纤布拉格光栅传感器是除了在通信领域中应用之外的另一个重要的应用,已用于多种电量或非电量测量,如应变、位移、温度、电流、磁场等,还可用于应变、温度的同时测量,以及分布式测量^[66,67]。

由于长周期光纤光栅的周期比较长,根据光波导的模式耦合理论,表现为前向传播的纤芯模和同向传播的包层模的耦合。特定长度和耦合系数的长周期光纤光

栅可以将纤芯模耦合到包层中而损耗掉。一般来说,与光纤布拉格光栅相比,长周期光纤光栅的光谱带宽较大,其最典型的应用是掺铒光纤放大器增益平坦、带阻滤波器和传感。

掺铒光纤放大器增益平坦是目前长周期光纤光栅最典型的应用,其实,长周期光纤光栅最早也正是用于掺铒光纤放大器的增益平坦而提出的^[31~33]。在波分复用系统中,要求掺铒光纤放大器增益分布是平坦的,但是未加处理的掺铒光纤放大器在整个谱范围内存在增益尖峰,需要进行增益平坦处理。若掺铒光纤放大器的增益不平坦,则各个信道增益不同,一方面限制了无中继跨接距离,另一方面也会造成接收端误码率的增大。应用长周期光纤光栅进行掺铒光纤放大器的增益平坦,具有良好的效果。

长周期光纤光栅的耦合机理决定其对特定的波长具有损耗的能力,在谱特征曲线上表现为一个损耗波峰。特殊设计的长周期光纤光栅的周期及长度可以使谐振波长强烈衰减,而其他波长基本没有损耗的通过,从而实现了基于光纤的光学带阻滤波。

长周期光纤光栅传感器利用长周期光纤光栅可以进行温度、应变、扭转角等的测量。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photo-sensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 1978, 32: 647~649
- [2] Lam D K, Garside B K. Characterization of single-mode optical fiber filters. *Applied Optics*, 1981, 20 (3): 440~445
- [3] Kawasaki B B, Hill K O, Johnson D C, et al. Narrow-band Bragg gratings in optical fibers. *Optics Letters*, 1978, 3: 66~68
- [4] Malo B, Th'eriault S, Johnson D C, et al. Apodised in-fiber Bragg grating reflectors photoimprinted using a phase mask. *Electronics Letters*, 1995, 31:223,224
- [5] Albert J, Hill K O, Malo B, et al. Apodization of the spectral response of fiber Bragg gratings using a phase mask with variable diffraction efficiency. *Electronics Letters*, 1995, 31:222,223
- [6] Ouellette F. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating fibers in optical waveguides. *Optics Letters*, 1987, 12(10): 847~849
- [7] Atkinson D, Loh W H, Reilly O J J, et al. Numerical study of 10cm chirped-fiber grating pairs for dispersion compensation at 10Gbit/s over 600km of non-dispersion shifted fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(8):1085~1087
- [8] Eggleton B J, Stephens T, Krug P A, et al. Dispersion compression using a fiber grating in transmission. *Electronics Letters*, 1996, 32(17):1610,1611
- [9] Agrawal G P, Radic S. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(8):965~967
- [10] Melloni A, Chinello M, Martinelli M. All-optical switching in phase-shifted fiber Bragg grating.