

吴朝霞 吴飞 著

光纤光栅传感 原理及应用

GUANGXIAN GUANGSHAN CHUANGAN
YUANLI JI YINGYONG



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光纤光栅传感 原理及应用

吴朝霞 吴飞 著

国防工业出版社

·北京·

序

光纤光栅具有不受电磁干扰及光路光强波动影响、波长绝对编码和易于实现分布式传感等突出优点,自出现以来已经得到了迅速发展,首先在光纤通信及光纤传感领域获得了广泛应用,并将随着全光通信网络和光纤传感技术的发展发挥越来越重要的作用。在光纤通信方面,由于光纤光栅自身结构决定,便于实现波分、时分、空分复用和容易与光纤及其他光学器件连接,可直接参与光谱分析、光学通信、光学编码,在此基础上可以构成大型通信传感网络。在光纤传感方面,光纤光栅为光纤传感技术开辟了一个新的应用研究领域,采用适当的封装技术可以实现温度、应变、压力、位移、加速度、电流、电压、磁场、浓度等多参量的测量。进一步研究表明,这种元件可用来埋入被测结构内部或粘贴其表面,对大型工程结构进行实时健康监测,及时识别结构损伤,对可能出现的灾害提前预警,对提高结构的安全性和可靠性具有重大的科学意义和显著的应用价值。

光纤光栅就其本身来说在技术上已趋成熟,国内外从事光纤光栅应用与研究的学者众多,在光纤光栅的理论、形成机理、写入技术、封装结构、不同物理量传感器设计、传感网络调制解调及工程应用等方面发表了大量论文,取得了许多研究成果,这些成果已分别报道在各种文献中。为了形成较为完整的光纤光栅传感原理及应用学科体系,更好地推动光纤光栅技术的发展,有必要对过去的研究成果及最新的有关光纤光栅传感技术进行一次全面系统总结。

吴朝霞和吴飞两位同志,长期从事光纤传感技术的研究工作,掌握了该领域的国内外大量近期技术资料和文献,在光纤光栅的理论与实验研究方面做出了突出贡献;对光纤光栅技术的应用做出了独到的探

索,尤其难能可贵的是他们从光波导理论出发,从波导材料的折射率的空间分布入手,对光纤光栅的理论模型进行了深刻的阐述和总结,这些创新性工作已经集中地体现在他们撰写的这部著作中。此书内容涉及光纤光栅传感特性分析、封装结构设计、传感网络调制解调技术、光栅谱型优化及工程应用等几个方面。特别是在传感特性分析中,翔实地讨论了光纤光栅的横向负载特性、高双折射光纤光栅扭转特性,并进行了相应的实验研究,对进一步开发新型光纤光栅传感器和新型光学器件具有指导意义。在光纤光栅谱型分析中引入启发式算法,有效解决了谱型重构问题。值得称道的是,书中大部分内容都是他们科研成果的总结和凝练,有些实验是他们自行设计并实现的,有些成果亦是第一次报道。应该肯定地说,本书的核心内容基本上反映了该领域的最新研究成果,它的出版必将对光纤光栅传感技术的研究与开发起到推动作用。我作为吴朝霞博士和吴飞博士的导师和同事,看到这本具有研究特色的论著即将问世,感到由衷的高兴并愿意作序于此。

李志全

2010年10月10日

前 言

自 20 世纪 70 年代初,第一根实用光纤问世以来,光纤领域的研究工作得到了飞速的发展,光纤技术在巨大的市场前景推动下迅速成熟,光纤已成为信息传输的理想介质,高速大容量光纤传输系统以及建立在此基础上的高速互联网已成为当今信息化社会的重要支柱和基础。与光纤通信始终并行发展的是光纤传感技术,光纤传感器具有重量轻、体积小、无源操作、低功率、抗电磁干扰、高灵敏度、宽带宽和环境耐受力强等优点,在多参量同时测量、分布式传感等方面具有显著优势。

光纤技术在许多领域的成功应用,有赖于能够满足不同需要的各种光纤制作技术的实现、各种光纤有源器件及无源器件的不断发展和完善、相应测试技术的进步以及各种新机理的研究和应用。目前,随着 Bragg 光纤光栅(FBG)制作技术的不断成熟及应用研究的日趋深入,近年来光纤光栅在传感领域中的应用引起了人们极大的兴趣。它不仅具有易于光纤连接、低损耗、光谱特性好、可靠性高等特点,而且作为传感元件,具有其他传统传感器无可比拟的优点,即感应的信息采用波长编码,而波长这个参量不受光源功率的波动及连接或耦合损耗的影响。由于很容易在一根光纤中连续制作多个光栅,所制得的光栅阵列轻巧柔软,与时分复用和波分复用技术相结合,很适于作为分布式传感元件埋入材料和结构内部或贴装在其表面,对它们的温度、压力、应变等实现多点检测。

光纤光栅传感技术是以光学、电子学、机械学、材料科学及信息处理技术为基础的一门新兴技术。目前现代传感器朝着微型化、数字化、智能化、网络化发展,光纤光栅传感器独有特性决定其与现代传感器发展方向一致,因此具有强大生命力和发展前途。

本书从光纤光栅传感特性出发,全面系统地介绍了测量各种物理量的光纤光栅传感器及其网络化技术,主要包括:光纤光栅的写入技术及封装工艺;基于模式耦合理论的光纤光栅特性分析及实验研究;新型光纤光栅传感器结构设计;光纤光栅传感网络复用技术;光纤光栅传感器网络解调技术;多种优化算法在光纤光栅谱型分析中的应用;光纤光栅传感网络工程实例及典型应用。

本书的目的是促进光纤光栅传感技术发展,促进光学、电子学、材料科学及工程力学等多学科交叉融合,形成较为完整的光纤光栅传感原理及应用学科体系。作者在总结多年从事光纤光栅传感技术工作成果的基础上,在国家自然科学基金(60877047)、中央高校基本科研业务费(N090223001)及河北省自然科学基金(F2010001309)的支持下完成本书的撰写工作。期望本书的出版能够帮助从事光纤通信及传感方面的科研及工程技术人员更好地研究和应用光纤光栅这一重要技术,以进一步拓展光纤光栅研究领域。尽管作者在取材和立意上做了许多工作,但也难免出现不妥和错误之处,请读者不吝赐教。

本书得到吕江涛、贺忠海、孔芝、王立夫、滕峰成等博士的支持和帮助,单泉博士参与了部分章节的绘图工作,宋爱娟实验师参与了部分实验工作及全书的校对工作,在此一并致以谢意。

作者

2010年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 光纤光栅的发展与分类	2
1.2.1 光纤光栅传感技术的发展	2
1.2.2 光纤光栅的分类	4
1.3 光纤光栅在传感领域中的应用	7
1.4 光纤光栅制作技术	8
1.4.1 干涉写入法	8
1.4.2 逐点写入法	9
1.4.3 组合写入法	9
1.5 光纤光栅退火及稳定性评价	11
1.5.1 光纤光栅衰变模型	11
1.5.2 光纤光栅退火实验	12
1.6 光纤光栅封装技术	14
1.6.1 保护性封装	14
1.6.2 敏化封装	16
1.6.3 补偿性封装	21
参考文献	23
第 2 章 光纤光栅传感特性分析	28
2.1 光纤光栅的理论模型	28
2.2 光纤光栅轴向应变特性分析	31
2.2.1 轴向均匀应变作用下光纤光栅特性分析	31

2.2.2	轴向非均匀应变作用下光纤光栅特性分析	34
2.2.3	光纤光栅轴向受力实验	38
2.3	光纤光栅温度特性分析	41
2.4	光纤光栅交叉敏感特性	42
2.5	光纤光栅横向受力特性分析	43
2.5.1	光纤光栅横向均匀受力特性分析	43
2.5.2	光纤光栅横向局部受力特性分析	49
2.5.3	光纤光栅横向不均匀受力特性分析	65
2.5.4	光纤光栅横向受力实验	73
2.6	光纤光栅扭转特性分析	80
2.6.1	高双折射光纤光栅扭转模型	80
2.6.2	光纤光栅扭转特性实验	84
	参考文献	88
第3章	新型光纤光栅传感器	91
3.1	光纤光栅埋入式应变传感器	91
3.1.1	应变传递分析	91
3.1.2	结构设计	96
3.1.3	性能测试	97
3.2	光纤光栅温度传感器	99
3.2.1	结构设计	99
3.2.2	性能测试	101
3.3	光纤光栅应变和温度同时测量传感器	102
3.3.1	基于预应变的FBG传感头设计	103
3.3.2	温度和应变特性标定实验	105
3.4	光纤光栅位移传感器	108
3.5	光纤光栅加速度传感器	111
3.6	基于悬臂梁的光纤光栅振动传感器	114
3.7	光纤光栅剪力传感器	116
3.7.1	理论分析	117
3.7.2	实验标定分析	119

3.8	光纤光栅流量传感器	120
3.8.1	涡街流量传感器测量原理	120
3.8.2	靶式FBG流量传感器	123
3.9	光纤光栅化学传感器	125
3.9.1	温湿度测量原理及结构设计	126
3.9.2	温湿度测量实验及结果	127
3.10	光纤光栅电磁传感器	128
3.10.1	测量系统结构	129
3.10.2	标定及结果分析	130
	参考文献	132
第4章	光纤光栅传感网络复用技术	135
4.1	光纤光栅传感网络组成	135
4.1.1	光纤光栅传感网络的一般形式	135
4.1.2	光纤无源器件	136
4.1.3	光纤有源器件	140
4.2	光纤光栅的复用技术	144
4.2.1	波分复用系统(WDM)	144
4.2.2	空分复用系统(SDM)	145
4.2.3	时分复用系统(TDM)	146
4.2.4	混合复用系统	147
4.2.5	连续波调频技术复用系统(FMCW)	149
	参考文献	154
第5章	光纤光栅解调技术	158
5.1	静态解调方法	158
5.1.1	匹配光纤光栅滤波解调	158
5.1.2	可调谐光纤F-P滤波器检测法	160
5.1.3	可调窄带光源检测法	161
5.2	动态解调法	162
5.2.1	干涉解调法	162

5.2.2	边沿滤波法	164
5.2.3	啁啾光纤光栅解调法	166
5.3	基于 F-P 滤波器技术的分布式 FBG 解调系统的设计	167
5.3.1	解调系统总体结构	167
5.3.2	解调系统技术分析	167
5.3.3	系统复用原理	168
5.3.4	系统复用特性分析	170
5.4	光纤光栅传感网络解调实验	173
5.4.1	基于 F-P 滤波技术的应变解调实验	173
5.4.2	基于 FMCW 技术的振动解调实验	176
	参考文献	177
第 6 章	优化算法在光纤光栅谱型分析中的应用	180
6.1	遗传算法在光纤光栅中的应用	180
6.1.1	遗传算法的基本原理	180
6.1.2	基于遗传算法光纤光栅轴向均匀 受力反射谱寻优	182
6.1.3	基于遗传算法光纤光栅横向均匀受力 反射谱寻优	191
6.2	蚁群算法在光纤光栅中的应用	194
6.2.1	蚁群算法的基本原理	194
6.2.2	基于蚁群算法光纤光栅轴向均匀 受力反射谱寻优	198
6.3	粒子群算法在光纤光栅中的应用	202
6.3.1	粒子群算法基本原理	202
6.3.2	基于粒子群算法光纤光栅轴向均匀 受力反射谱寻优	205
6.3.3	基于粒子群算法光纤光栅横向均匀 受力反射谱寻优	205
6.4	和声搜索算法在光纤光栅中的应用	207

6.4.1	和声搜索算法基本原理	207
6.4.2	基于 AHS 算法光纤光栅轴向均匀 受力反射谱寻优	213
6.4.3	基于 AHS 算法光纤光栅横向均匀 受力反射谱寻优	214
6.5	优化算法在光纤光栅中的应用实验	215
6.5.1	光纤光栅横向均匀受力蚁群算法 谱型分析实验	215
6.5.2	光纤光栅横向均匀受力遗传算法 谱型分析实验	217
6.5.3	光纤光栅轴向均匀受力 AHS 算法 谱型分析实验	218
6.5.4	光纤光栅横向均匀受力 AHS 算法 谱型分析实验	220
	参考文献	222
第 7 章	光纤光栅传感器工程应用	226
7.1	光纤光栅传感器在桥梁状态监测中的应用	226
7.1.1	桥梁工况及监测内容	226
7.1.2	FBG 传感器在斜拉桥施工中的应用	228
7.1.3	FBG 传感器在斜拉桥静载试验中的应用	237
7.1.4	FBG 传感器在斜拉桥动载试验中的应用	241
7.2	光纤光栅传感器在大坝监测中的应用	247
7.2.1	设计依据与原则	248
7.2.2	安全监测设计	248
7.2.3	监测系统组成	254
7.2.4	设计实例	255
7.3	光纤光栅在航空航天材料结构健康监测中的应用	259
7.3.1	航空航天用复合材料简介	259
7.3.2	光纤光栅传感器在航空航天健康 监测中的应用	261

7.4 光纤光栅传感器在石油工业中的应用.....	265
7.4.1 测井技术	265
7.4.2 火灾报警	268
参考文献	271

第1章 绪论

1.1 引言

光纤传感技术是20世纪70年代以来伴随着光纤通信技术发展起来的,经过近40年的发展,已经得到长足进步,不断涌现出各种新型光纤传感器。作为光纤传感器的一种新产品,光纤光栅传感器以其抗电磁干扰、耐腐蚀、高绝缘性、测量范围宽、便于复用成网、可微型化等优点,得到世界范围内的广泛关注,成为传感领域内发展最快的技术之一,在土木工程、航空航天、石油化工、电力、医疗、船舶工业等领域取得了广泛应用^[1-8]。

在土木工程方面,1993年,加拿大卡尔加里的 Beddington Trail 大桥使用光纤光栅传感器对桥梁进行了结构健康监测^[9]。Fuhr 在美国 Winooski 河上的 Waterbury 桥上埋设了八个光纤光栅传感器对桥的状况进行了监测^[10]。此后,各国研究人员陆续将光纤光栅传感器应用于各种土木工程中。在国内,哈尔滨工业大学对呼兰河大桥、武汉理工大学对海口世纪大桥、大连理工大学对 L 形结构的框架梁柱实现了工程结构的健康监测^[11-13]。

在航空航天方面,美国国家航空和宇宙航行局利用光纤光栅传感网络对航天飞机 X-38 进行了实时健康监测^[14];德国国防发展局将光纤光栅传感器粘贴在飞机机翼上,对飞机飞行过程中机翼的应变和温度变化情况进行了监测^[15]。

在电力工业方面,由于电力设备大多处于高电压、强磁场环境中,所以,光纤光栅传感器无疑是实现参数测量的最佳传感器之一。在德国,西门子公司用经过特殊处理的光纤光栅传感器对发电机定子温度和电流进行了测量^[16];Hendersond 等人用光纤光栅传感器对高压变

压器绕组温度进行了实时测量^[17]。目前光纤光栅传感技术研究集中包括以下几个方面^[18]：

(1) 光纤光栅传感模型及其理论研究。模式耦合理论是分析光纤光栅传感特性较为严格的理论,但其解决问题的方法较为繁杂,而且能够得到的解析解有限。

(2) 光纤光栅的敏化与封装技术研究。由于光纤光栅本身的机械强度有限,力敏和温敏灵敏度系数较低以及交叉敏感效应的存在,难于将其直接应用于实际工程待测体的感测之中。

(3) 光纤光栅传感器设计及技术研究。针对工程测量的参量类型、性质、分布等不同要求,需要对光纤光栅传感器的结构进行特殊设计,以保证感测结果的精确性和可重复性。

(4) 信号解调及其传感网络系统研究。高精度、低成本的波长检测技术是信号解调的应用基础,而分布式、多参量、多功能感测的传感网络系统是实现大型结构体实时监测的希望所在。以光纤光栅为传感基元,探索新型光纤光栅传感器的设计方法和实现技术,开发质量优良、持久耐用、稳定性强、功能集成的光纤光栅系列传感器及信号解调系统,是最终实现光纤光栅传感器模块化、产业化、规模化的目标。

1.2 光纤光栅的发展与分类

1.2.1 光纤光栅传感技术的发展

近年来,光纤光栅作为一种新型的光纤器件,在传感应用方面受到普遍关注。目前,以布喇格光纤光栅(FBG)为传感器件的设计成为研究的主流,对以长周期光纤光栅、啁啾光纤光栅等为传感器件的研究也引起了人们的关注。

当前设计的多种光纤光栅传感器主要依据光纤光栅的轴向应变和温度特性。1989年,W. W. Morey等人首次对光纤光栅的温度和应变传感特性进行了研究,得到了光栅反射波长温度和应变的灵敏度分别为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$ ^[19]。由此可见,裸光栅对温度和应变的灵敏度都很低。为了使光栅得到广泛应用,人们提出了许多

封装措施,增加其灵敏度。2000年,刘云启等人将光纤光栅封装于一种有机聚合物基底中,并对其压力传感特性和温度交叉敏感特性进行了研究,封装后的光纤光栅对压力的灵敏度提高了31.7倍^[20,21]。2001年,张颖等人用聚合物封装光纤光栅,得到的压力灵敏系数为 $-3.4 \times 10^{-3} \text{ nm/MPa}$ ^[22]。在温度增敏方面,贾振安、关柏鸥等人采用较大热膨胀系数的聚合物材料对光栅进行封装,分别把光纤光栅对温度的灵敏度提高了16倍、23倍之多^[23,24]。另一方面,研究热点集中在多参量的传感设计。2001年,X. Y. Dong等人把光纤光栅粘贴在固定端A与悬臂梁B的交界处(A、B材料性质不同)。当悬臂梁自由端受到外界作用时,光纤光栅FBG1与FBG2的应变和温度响应系数均不同,可解出温度和应变(应力、位移)的值^[25]。张伟刚等人将一根光纤上写入的两个不同波长的布喇格光栅,沿矩形悬臂梁的中性面与表面的交线粘贴于靠近固定端两个相邻侧面,利用光纤布喇格光栅波长绝对编码的特性,设计并实现了应力(或应变)与位移的光纤光栅二维传感器^[26]。A. Quintela等人把两个中心波长不同的光纤布喇格光栅封装在水泥块中,其中一个光纤光栅利用氰基丙烯酸酯胶黏剂固定在水泥块中,其对应变和温度都敏感;另一个光纤光栅螺旋地封装在水泥中,因其松散只对温度敏感。他们把六个这样的传感器分别埋植于桥梁的各处,利用信号解调系统可准分布地、多点地监控路面交通情况^[27]。Y. J. Rao等人设计并实现了一种光纤布喇格光栅和Fabry-Perot干涉腔(EFPI)复合结构传感器。该传感器可同时实现静态应变、温度和振动等多参量测量^[28]。

随着光纤光栅的应用发展,其横向应变特性的研究逐步成为热点。2000年,Gafsi和El-Sherif讨论了FBG基于有效折射率变化的横向负载敏感特性,提出FBG受到横向负载作用时反射峰会分裂成两部分^[29]。2002年,Federico Bosia对光纤光栅进行了横向负载实验,提出光栅的反射谱随着受力载荷的不同会发生变形^[30]。同年,Yoji Okabe等人设计了光纤光栅横向受力传感器,并对实验光谱进行详细分析^[31]。2004年,Zhao Tingxi对光纤光栅横向受力时的高双折射现象进行了实验分析^[32]。2005年,钱景仁等人设计了一种对FBG在横向压力负载条件下的谐振波长分裂进行高灵敏检测的系统,得到了

0.025N/mm 的分辨率^[33]。2006年, N. Takeda 应用光栅横向特性进行了结构损伤的传感实验^[34]。由此可见, 虽然光纤光栅的横向负载特性的研究还仅局限于实验室的研究, 但其真正的实用化也将指日可待。目前一些学者除了研究光纤光栅的各种应变和温度特性外, 还将目光转移到了光纤光栅的扭转偏振特性。2001年, C. Y. Lin 等人通过对光纤施加周期性机械作用, 发现了应力长周期光纤光栅效应, 并由此实现了应力长周期光纤光栅应变、扭曲及弯曲的传感测量^[35]。2002年, 张伟刚等人将光纤布喇格光栅粘贴在弹性扭梁的表面, 设计并实现了光纤光栅的线性、双向扭转(扭角、扭矩等)的传感测量^[36]。同年, 他们还将光纤光栅斜向粘贴在固定端与扭梁的交界处(两种材料的性质不同), 成功地实现了扭转(扭转角或扭矩)与温度的双参量同时测量^[37]。2002年, 王义平等利用自行设计的长周期光纤光栅, 研制了长周期光纤光栅扭曲传感器^[38]。2005年, 他们对长周期光纤光栅扭曲特性进行了详细的理论研究^[39]。2006年, 朱涛等人设计了一种基于超长周期光纤光栅的高灵敏度扭曲传感器, 该传感器可判别扭转方向, 扭曲灵敏度达到 $0.4394\text{dB}/(\text{rad}/\text{m})$ ^[40]。同年, 提出了一种利用光纤布喇格光栅反射光作信号源、长周期光纤光栅和超周期光纤光栅作传感器实现温度、应变和扭曲三参量同时测量的全光栅型低成本强度解调传感方案^[41]。

1.2.2 光纤光栅的分类

随着光纤光栅发展, 由于研究的深入和应用的需要, 人们制作出不同结构的光纤光栅, 主要可以分为均匀周期光纤光栅和非均匀周期光纤光栅两类, 其中一些典型光纤光栅的折射率分布如图 1-1 所示。

1. 均匀周期光纤光栅

该类光纤光栅的光学周期沿轴向保持不变, 主要有布喇格光纤光栅、长周期光纤光栅和倾斜光纤光栅。

1) 布喇格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)

FBG 是最早发展起来的, 也是目前应用最广泛的一种光栅, 其折射率分布如图 1-1(a) 所示。此类光栅的栅格周期一般为 500nm 左右, 光栅波矢方向与光纤的轴向一致。这种光栅具有较窄的反射谱和

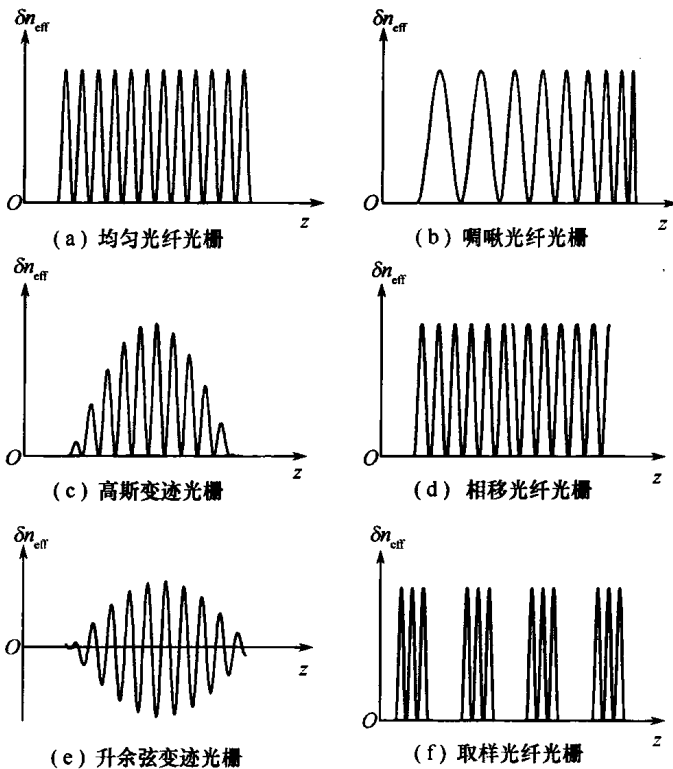


图 1-1 按折射率分布的光纤光栅分类

较高的反射率,其反射带宽和反射率可以根据需要,通过改变写入条件加以控制调节。该光栅具有结构简单,良好的温度和应变灵敏度,在光纤通信领域和传感领域均有广泛的应用^[42]。

2) 长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating)

长周期光纤光栅是指栅格周期达到几百微米的均匀周期光纤光栅,是一种透射型光纤光栅,其作用是将特定波长的光耦合到包层中损耗掉,从而在透射谱中形成宽带损耗峰,因此它是一种理想的掺铒光纤放大器(EDFA)的增益平坦元件。此外,长周期光纤光栅的透射损耗峰会因外界的应变和温度等因素的影响而改变,而且与FBG相比具有更高的灵敏度,可作为一种理想的传感元件。近年来,由于长周期光栅的制作技术发展,具有更多传感特性,如弯曲、扭转等新型长周期光栅正处于研究的热点^[43-45]。