

Sensing Characteristics and Applications of a Long
Period Fiber Grating and a Long Period Fiber Grating Pair

长周期光纤光栅 及其级联结构的传感特性及应用

► 胡兴柳 王彦 杨忠 / 著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Sensing Characteristics and Applications of a Long
Period Fiber Grating and a Long Period Fiber Grating Pair

长周期光纤光栅 及其级联结构的传感特性及应用

► 胡兴柳 王彦 杨忠 / 著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

长周期光纤光栅及其级联结构的传感特性及应用 /
胡兴柳, 王彦, 杨忠著. — 北京: 人民邮电出版社,
2018. 1

ISBN 978-7-115-47649-4

I. ①长… II. ①胡… ②王… ③杨… III. ①光纤光
栅—研究 IV. ①TN25

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第001473号

内 容 提 要

本书系统地阐述了长周期光纤光栅 (LPG) 传感器及其级联结构 (LPGP) 的传感特性及应用研究, 共分 11 章。

第 1 章介绍了 LPG 在通信和传感领域的应用以及国内外研究现状; 第 2 章采用耦合模理论对 LPG 及 LPGP 进行分析; 第 3 章对 LPG 的主要参数进行频谱分析和仿真; 第 4 章对 LPG 的基本传感特性进行了理论分析和实验研究; 第 5 章研究设计 LPG 解调系统, 实现对板结构振动信号的监测; 第 6 章应用 LPG 实现基于小波包能量谱分析的结构损伤识别; 第 7 章研究了 LPG 在土木工程结构中耐久性健康监测的应用; 第 8 章对 LPGP 的温度、应变、弯曲和折射率传感特性进行了理论和实验研究; 第 9 章研究了温度和应变的同时测量技术; 第 10 章用 LPGP 来实现对超声波的检测, 获得相应的超声场的参数; 第 11 章提出了对 LPGP 减敏保护、温度补偿的封装设计。本书是一本有关智能监测与控制方面的专著, 反映了作者近年来在这一领域的主要研究成果。

本书内容新颖, 理论联系实际, 适合大专院校及科研院所光纤光栅、智能监测与控制领域的高年级本科生、研究生阅读, 也可供相关领域的教师、科研人员及工程技术人员作参考。

◆ 著 胡兴柳 王彦 杨忠

责任编辑 邢建春

执行编辑 肇丽

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 13.5

2018 年 1 月第 1 版

字数: 265 千字

2018 年 1 月河北第 1 次印刷

定价: 88.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

长周期光纤光栅 (LPG) 是一种周期在数百微米的光纤光栅, 具有插入损耗低、无后向反射、制作简单以及成本低、灵敏度高、尺寸小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰等优点, 在光纤传感和光纤通信领域中具有良好的应用前景, 成为近年来的研究热点。长周期光纤光栅是智能结构中的一种十分重要的传感器, 易于和基体结构集成, 可以实时监测结构的应力、折射率、应变、温度、损伤等结构健康状态。目前, 对长周期光纤光栅的研究主要还停留在理论与实验的探索阶段, 实用化程度不高。因此, 利用长周期光纤光栅传感技术实现智能结构健康监测的研究具有十分重要的意义。

本书是以长周期光纤光栅及其级联结构 (级联长周期光纤光栅 (LPGP)) 作为研究对象, 对这 2 种类型的长周期光纤光栅的传感特性、解调、封装、多参数检测及超声测量等进行了研究, 致力于将长周期光纤光栅应用到实际的工程结构中, 包括结构的振动监测以及民用的土木工程结构, 实现结构的健康监测, 构建了实时监测乐果溶液降解的级联长周期光纤光栅智能系统, 并结合作者近年来从事有关长周期光纤光栅智能监测关键技术的研究与应用实践, 选取了一系列新的研究成果, 具有一定的深度、广度和新颖性。本书对长周期光纤光栅的深入研究, 对拓宽长周期光纤光栅的应用领域及加速实用化进程具有重要理论意义和实用价值。本书的主要内容如下所示。

第 1 章为本书绪论部分, 介绍了光纤光栅的发展、理论研究情况及 LPG 的制备技术, 概述了 LPG 在通信和传感领域的应用以及国内外发展情况, 阐述了 LPG 应用中存在的问题和发展趋势。

第 2 章介绍了 LPG 及 LPGP 的理论。从光在光纤中的传播模式入手, 采用耦合模理论对 LPG 光栅的传光原理进行分析, 给出了 LPG 纤芯基模和包层模的有

效折射率,各阶次模式的耦合特性、传播常数、场分布的方程、LPGP 纤芯和包层模式的模态幅度及透射率。

第 3 章介绍了光纤光栅的周期、长度、折射率调制参量、纤芯的折射率及半径、包层的折射率及半径等光栅常数的改变对传输光谱的影响规律,得出合理优化设计光纤光栅参数的理论依据。

第 4 章介绍了长周期光纤光栅的基本传感特性,包括温度、轴向应变、弯曲、折射率和横向负载特性,讨论了各种情况下长周期光纤光栅透射光谱的变化,并给出相应的特性曲线和灵敏度系数。

第 5 章介绍了长周期光纤光栅振动信号的检测。基于长周期光纤光栅的微弯特性,实现待测板结构振动信号的采集,同时还建立了分布式的振动信号采集系统,监测待测结构多点的振动情况。

第 6 章介绍了长周期光纤光栅型智能结构的损伤识别。应用小波包分析方法对采集的动态信号进行小波分解,提取小波包能量谱变化率为结构的损伤指标,对采集到的动态信号进行分析,实现结构的损伤识别。

第 7 章研究了长周期光纤光栅在土木工程混凝土结构的应用。首先介绍了混凝土结构中钢筋的锈蚀机理与过程,并针对钢筋锈蚀过程中将发生的周围环境氯离子浓度的增高以及钢筋锈蚀后将导致钢筋体积的膨胀,分别提出基于长周期光纤光栅对折射率的敏感特性以及对弯曲的敏感特性的钢筋锈蚀监测。

第 8 章介绍了 LPGP 的温度、应变、弯曲、折射率传感特性。LPGP 通过对外界环境引起光栅波长或在谐振波长位置处的透射深度的变化来获取传感信息。

第 9 章介绍了温度和应变的同时测量技术,重点研究了支持向量机算法和常规的标准逆矩阵方程这 2 种方法实现对温度和应变的同时测量。

第 10 章介绍了用 LPGP 来实现对超声波的检测,分别研究了改变超声波的电压幅度、频率和持续时间对 LPGP 谐振波长及谐振幅值的影响,通过观察 LPGP 谐振波长的移位获得相应的超声场的参数。

第 11 章介绍了 LPG 温度补偿的原理,提出了对 LPGP 减敏保护的封装设计,实现温度补偿,并且研究了用封装的 LPGP 在线实时监测乐果溶液的降解过程。

本书得到了江苏高校“青蓝工程”、江苏自然科学基金项目(No.BK20171114)、金陵科技学院高层次人才引进基金项目(No.Jit-rcyj-201604)、金陵科技学院校级教育教改研究课题项目(No.JYJG2017-3)、国家自然科学基金项目

(No.60774092, No.51309001, No.11402112)、安徽省教育厅自然科学研究重点项目 (No.KJ2017A041)、国家公派高级研究学者及访问学者项目 (No.201408340038, No.201408340036)、江苏省高校自然科学研究面上项目 (No.16KJB510010)、安徽省科技厅科技攻关计划项目 (No.12010402c182) 等的资助, 本书的撰写是在以上科研工作经历的基础上完成的。

在此, 向所有参考文献的作者及为本书出版付出辛勤劳动的同志表示感谢。特别鸣谢金陵科技学院领导和同事们的大力支持与鼓励。

限于作者的水平, 书中会有许多缺点和不完善之处, 恳请广大专家及同行批评指正。

作 者

2017 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 LPG 的理论研究现状	2
1.3 LPG 的制备技术	3
1.4 LPG 的应用概况	6
1.4.1 LPG 在通信领域的应用	7
1.4.2 LPG 在传感领域的应用	8
1.5 LPG 的发展趋势	9
1.6 本书的研究内容及结构	10
参考文献	12
第 2 章 LPG 及 LPGP 的理论分析	17
2.1 光纤光栅的结构	17
2.2 耦合模理论	19
2.3 LPG 模式耦合	20
2.3.1 纤芯基模有效折射率及其场分布	20
2.3.2 包层模有效折射率及其场分布	21
2.3.3 耦合特性分析	25
2.3.4 LPG 的模式耦合方程	26
2.4 LPGP 模式耦合	27
2.5 本章小结	30
参考文献	30

第3章	LPG 及 LPGP 谱特性的仿真和研究	32
3.1	表征 LPG 的谱特性的参数	32
3.2	LPG 对结构参数的敏感特性分析	35
3.2.1	光栅参数对频谱的影响	35
3.2.2	光纤结构参数对频谱的影响	40
3.3	LPGP 对结构参数的敏感特性	45
3.4	本章小结	49
	参考文献	49
第4章	LPG 的传感机理	50
4.1	LPG 的温度传感	50
4.1.1	谐振波长的温度特性理论分析	50
4.1.2	损耗峰幅值的温度特性	52
4.1.3	温度特性实验研究	53
4.2	LPG 的轴向应变传感	54
4.2.1	轴向应变理论分析	54
4.2.2	轴向应变实验研究	55
4.3	LPG 的弯曲传感	57
4.3.1	弯曲特性理论分析	57
4.3.2	弯曲特性实验研究	59
4.4	LPG 的折射率传感	60
4.4.1	折射率特性理论分析	60
4.4.2	折射率特性实验研究	62
4.5	LPG 的横向负载传感	64
4.5.1	横向负载特性理论分析	64
4.5.2	横向负载特性实验研究	65
4.6	LPG 的温度补偿技术	66
4.6.1	温度补偿方法	66
4.6.2	温度补偿实验	67
4.6.3	其他温度补偿方法	69
4.7	本章小结	70
	参考文献	71

第 5 章	LPG 振动信号监测	72
5.1	薄板振动的微分方程	73
5.2	LPG 振动信号监测传感器	76
5.2.1	动态信号监测原理	76
5.2.2	LPG 动态信号监测系统	77
5.2.3	LPG 动态信号的解调方案	80
5.2.4	系统最优工作点的确定	84
5.3	薄板结构振动信号的采集	85
5.4	分布式振动信号采集系统	89
5.5	具有自动跟随功能的振动信号监测系统	91
5.6	本章小结	93
	参考文献	94
第 6 章	基于小波包能量谱分析的 LPG 结构损伤识别	95
6.1	板结构 ANSYS 分析	95
6.2	小波包理论分析	98
6.2.1	小波分析	99
6.2.2	小波包分析	100
6.3	信号的能量特征指标提取	102
6.3.1	小波基的选取	102
6.3.2	小波分解阶数和小波包分解尺度的选取	103
6.3.3	特征指标的提取	103
6.4	板结构的小波包能量谱分析	104
6.4.1	同一位置不同程度的损伤	104
6.4.2	不同位置相同程度的损伤	107
6.5	本章小结	109
	参考文献	110
第 7 章	LPG 土木工程结构耐久性健康监测	111
7.1	混凝土结构中的钢筋锈蚀	111
7.1.1	钢筋锈蚀机理	112
7.1.2	钢筋锈蚀过程	114
7.2	混凝土结构中钢筋锈蚀监测方法	115
7.3	实验方法确定	116

7.3.1	钢筋锈蚀方法的确定	116
7.3.2	混凝土中钢筋锈蚀率的测量	117
7.4	基于 LPG 折射率特性的钢筋锈蚀监测	117
7.4.1	传感器设计	117
7.4.2	实验室环境实验	119
7.4.3	双光栅测量	121
7.4.4	实验讨论	122
7.5	基于 LPG 微弯特性的钢筋锈蚀监测	123
7.5.1	传感器设计及封装	123
7.5.2	实验室环境实验	125
7.5.3	混凝土埋入实验	126
7.5.4	实验讨论	129
7.6	本章小结	130
	参考文献	131
第 8 章	LPGP 传感特性的研究	133
8.1	LPGP 温度传感特性	133
8.1.1	LPGP 温度特性的理论分析	133
8.1.2	LPGP 温度特性的实验及分析	136
8.2	轴向应变传感特性	139
8.2.1	LPGP 轴向应变特性的理论分析	139
8.2.2	轴向应变特性实验	141
8.3	弯曲传感特性	144
8.3.1	LPGP 弯曲传感特性的理论分析	144
8.3.2	弯曲传感特性实验	145
8.4	折射率传感特性	148
8.4.1	LPGP 折射传感特性的理论分析	148
8.4.2	LPGP 折射传感特性的仿真研究	149
8.4.3	折射率传感特性实验	152
8.5	本章小结	156
	参考文献	156
第 9 章	基于支持向量回归机的单 LPGP 应变和温度同时测量技术的研究	158
9.1	支持向量回归机理论基础	158
9.2	温度与应变的同时测量	163

9.2.1 交叉敏感问题的解决方案	163
9.2.2 不同谐振峰应变与温度的测量	164
9.3 矩阵分析方法	166
9.4 基于 SVR 的温度与应变预测模型的建立	168
9.4.1 支持向量回归机的表述	168
9.4.2 ε -SVR 相关模型参数选取	172
9.4.3 基于 SVR 的温度和应变的预测	174
9.4.4 SVR 和标准矩阵法对应变和温度预测的比较	174
9.5 本章小结	175
参考文献	176
第 10 章 LPGP 对超声波检测研究的初探	178
10.1 超声波简介	178
10.2 光纤光栅检测超声波的研究	179
10.3 超声波作用于 LPGP 的原理	180
10.4 超声波基本特性的 LPGP 实验研究	183
10.4.1 超声波静态特性实验系统组成	183
10.4.2 实验结果分析	183
10.5 本章小结	186
参考文献	187
第 11 章 LPGP 的封装及在乐果溶液降解过程中的应用	188
11.1 光纤光栅的封装类型	188
11.1.1 保护性封装	188
11.1.2 敏化性封装	190
11.2 LPGP 的封装	191
11.2.1 LPGP 温度补偿的封装原理	191
11.2.2 LPGP 温度补偿的封装设计	193
11.2.3 封装的 LPGP 温度特性实验	195
11.3 基于 LPGP 的乐果溶液污水降解的在线监测	195
11.3.1 乐果溶液污水降解技术	195
11.3.2 超声强化电絮凝技术降解乐果溶液污水原理	197
11.3.3 超声强化电絮凝技术降解乐果溶液实验	199
11.4 本章小结	203
参考文献	203

第1章

绪论

1.1 引言

光纤光栅是近期发展非常迅速的光纤无源器件。光纤光栅的带宽范围大且波长选择性好,具有非传导性、高灵敏度、高分辨率、抗腐蚀、抗电磁干扰、极化不敏感等特点。由于光纤光栅与光纤之间天然的兼容性,光纤光栅易于与光纤连接且损耗低、光谱特性好、可靠性高。这些优点使光纤光栅以及基于光纤光栅的器件成为全光网中理想的关键器件。

根据光纤光栅周期的长短,可以分为周期在微米量级的布拉格光纤光栅(FBG, fiber Bragg grating)和周期在几十微米及几百微米之间的长周期光纤光栅(LPG, long period grating)。这两类光纤光栅虽然原理上有差别,但是在理论处理和制作方法上有很多类似之处,都可以为特定目的、改进性能而进行多种类似结构变化,均可用于传感和通信领域,两者具有不可分割的联系。

LPG是一种能够实现某些特定波长的前向传输的导模与包层模之间耦合的新型光纤器件,与FBG相比,它具有如下优点:(1)无后向反射,可避免由后向反射引起的光源振荡,插入损耗很小;(2)LPG的谐振波长和幅值对外界环境的变化非常敏感;(3)制作成本低,有效节约了成本,精度容易控制。自从AT&T贝尔实验室的Vengsarkar等^[1]首次在氢载硅锗光敏光纤中采用振幅掩模板成功制作出第一只LPG以来,由于LPG的优良性能,其应用研究引起了国内外学者的广泛关注。

LPG的基本工作原理是将光源的光输入光纤,并经光纤传输至光栅区域,在光栅区域内,外界被测参数(如温度、曲率、折射率、应变等)与进入光栅区域的光相互作用,进而改变光的波长、强度、相位等参数。LPG灵敏度较高、体积小,易于和基体结构集成,是智能结构传感器中十分重要的一类。所谓智能结构,

就是利用集成在结构中的先进传感元件,提取结构信息,进行数据的传输和多种参数的检测,包括应变、损伤、温度、压力、声音、光波等。光纤光栅智能结构是智能结构的典型研究方向,将光纤光栅用于传感可以实现结构的健康监测,在线实时地对结构状态进行监测。对机体结构进行健康监测的主要方法是把传感元件和传感网络粘贴在机体结构表面或埋入机体结构中,实时监测结构的应力、应变、温度、损伤等健康状态。对光纤光栅的传感特性及应用的研究是智能结构健康监测的一个重要课题。

级联长周期光纤光栅(LPGP, long period grating pair)是由2个参数完全相同的LPG刻写在同一根光纤上构成,LPGP作为LPG的一个特殊结构,本质上还是LPG,LPG的制作技术、理论研究、应用同样适用于LPGP,具备LPG的所有优点,由于它的结构不同,可能还具备一些其他特质。

1.2 LPG 的理论研究现状

目前,关于光纤光栅的分析方法很多,例如Bloch波理论^[2]、传输矩阵^[3]、耦合模理论^[4]以及散射理论^[5]等方法。其中,耦合模理论是研究LPG光学特性的最有效也是最有力的工具,其很多其他特性也可以利用该方法从理论上加以分析,可用于研究各类复杂结构的光纤光栅。

Erdogan运用耦合模理论^[6,7]较全面地研究了LPG中的纤芯模到包层模和辐射模的耦合及传输谱特性。该理论考虑一个纤芯基模与多个包层模之间的耦合,应用三层光纤模型及多种模式耦合理论对均匀LPG进行建模。同时,耦合模理论也对光栅折射率变化幅度和周期沿轴向按一定规律变化的非均匀LPG作了研究,如超结构光纤光栅、相移光纤光栅、啁啾光纤光栅、切趾光纤光栅也进行了深入的理论分析,这些分析奠定了LPG耦合模理论的基础。

对纤芯模色散方程的求解通常采用二层模型,而对于包层模,需要采用精确的三层光纤模型。Tsao^[8]建立了光纤三层模型的包层模色散方程,并用图解法进行了求解,其中,Tsao方程不包括冗余项。张自嘉等^[9]利用解析法证明了2个包层模色散方程的等价性,建议可选用Tsao的方程来求解传播常数,计算各场分量时,可将传播常数代入Erdogan方程求出光纤各阶包层模的有效折射率和传播常数。

LPG的模式与耦合问题已有若干研究报道,但说法不一。李新碗等^[10]应用图解法和简化计算的方法,对包层模场分布及其与纤芯基模的耦合系数进行研究,结果表明纤芯基模与一阶低次奇模的耦合要比其与一阶低次偶模的耦合强得多。Kong等^[11]认为包层模式次数较高时,纤芯基模与 EH_{11} 包层模式的耦合常数不可忽略,其值和纤芯基模与 HE_{11} 包层模式的值相当。何万迅等^[12]认为纤芯基模与 HE_{11} 包层模式产生

的耦合常数远远大于与 HE_{11} 包层模式产生的耦合常数,当包层模式次数较低时,耦合常数会随次数的增加而增大。张自嘉等^[13]指出,导模能在相距较近的波段内和相邻的 HE 、 EH 包层模同时发生耦合。当导模和某一包层模发生耦合时,如该包层模和另一个包层模的传播常数满足同一谐振条件,包层模间也会产生耦合。

在实际应用中,LPG 作为波长相关的损耗器件,合适的 LPG 谐振波长是一个需要重点考虑的问题。张东生等^[14]应用色心模型和 Kramers-Kronig 原理研究了 LPG 的中心谐振波长与曝光量的关系:谐振波长与曝光量呈多项负指数之和规律变化的,变化率受到模板占空比的控制,且周期光纤光栅的中心谐振波长与模板占空比成反比关系。童治等^[15]推导出长周期光栅谐振波长、峰值损耗和带宽的表达式,提出通过控制曝光能量密度可获得不同特性参数的 LPG。舒学文等^[16]探讨了导模与高阶包层模的耦合谐振特点,研究了 LPG 的谐振波长与光纤参数及光栅周期的变化关系,指出高阶包层模与低阶包层模具有完全不同的特点,在光纤或光栅参数变化时高阶模与低阶模的谐振波长向相反的方向变化。长周期光栅的谐振波长与光纤参数(芯和包层的折射率及半径)在很多情况下表现出近似线性的关系。孔梅等^[17]用耦合模理论计算了单模光纤中导模与包层模耦合的耦合波长与光栅周期的关系、耦合系数和功率转换谱。结论表明:与短周期光纤光栅相比较,LPG 耦合到不同包层模的波长间距大,耦合中心波长随调制深度变化而大幅度漂移,耦合带宽较大。

LPG 对外界环境折射率的变化也相当敏感,Patrick 等^[18]研究了 LPG 谐振峰的谐振波长、幅值和外部环境折射率变化的关系,指出可通过选择合适的光栅周期来提高 LPG 对外部环境折射率变化的灵敏度。Erdogan^[7]认为当环境折射率增大到与包层折射率相等时,光栅中除了基模外,其他包层模式全部截止,只有连续的辐射模。Stegall 等^[19]应用一维射线传播模型研究了光纤中包层模式的漏泄模式传播,指出当环境折射率较高时,由于较强的 Fresnel 反射使光栅中形成了类似于包层模的漏泄模式,环境折射率越高,从基模到漏泄模式的耦合越强。童治等^[20]也对 LPG 环境折射率高于包层折射率的情况,根据耦合模理论和辐射模式理论建立了模型,定量的分析了 LPG 中基模到辐射模的耦合特性。

1.3 LPG 的制备技术

LPG 的写入方法很多,这些方法形成机理各异,写入 LPG 的特性也不尽相同。常见的写入方法有以下几种。

(1) 振幅掩模法

振幅掩模法是在模板上刻好图案,通过光学系统,将之投射到光纤上,

纤芯折射率发生变化而成栅的，最常用的是用振幅掩模板，通过紫外光曝光氢载掺锗光纤^[21]，如图 1.1 所示，可通过改变掩模缝隙的周期写入不同谐振波长的 LPG，紫外光在光敏光纤中写入 LPG 的热稳定性差，可在制作过程中适当降低氢含量，灵活运用均匀紫外曝光技术，且结合退火的方法提高光栅的热稳定性。

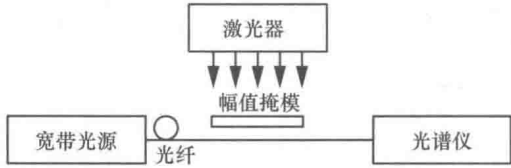


图 1.1 幅值掩模法（紫外曝光）制作 LPG 示意

将高能离子譬如氦 (He^{2+}) 或氢 (H^+) 沿轴向周期性入射到各种石英玻璃中，使纤芯和包层产生高达 10^{-2} 的折射率变化。Bibra 等^[22]将 He^{2+} 离子注入到光纤中，制作 LPG，如图 1.2 所示，离子注入导致的硅玻璃折射率变化在 500°C 以下都是稳定的，适合在高温环境下应用，光纤折射率调制大小的控制可通过调节入射粒子束的剂量来实现。

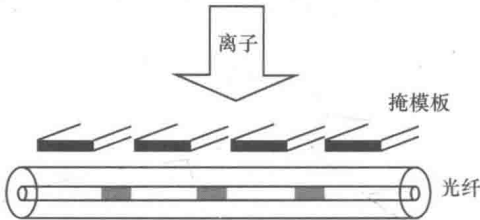


图 1.2 幅值掩模法（离子注入）制作 LPG 示意

（2）热激成栅法

为了弥补振幅掩模法需在纤芯中进行掺杂，近年来已开始探讨在纯硅光纤上写入光栅。热激成栅法是用电弧放电、氢氧、 CO_2 激光等对光纤进行局部加热的热激成栅法，使光纤的折射率发生改变，形成 LPG。

Karpov 等^[23]在 2 个电极之间放置没有装护套的光纤，控制每次的放电时间及电弧移动的距离，可制作出不同形变量和不同周期及耦合强度的 LPG，如图 1.3 所示，该方法可以容易且精确地实现切趾技术生产设计滤波器的滤波特性。

Rao 等^[24]用聚焦高频 CO_2 激光脉冲辐射写入 LPG，如图 1.4 所示，这种方法不需要光纤的变形，使用掺杂物 B_2O_3 可以控制 LPG 的温度灵敏度，增加粘性差异，且高频 CO_2 激光脉冲的能量集中，单个脉冲加热时间短、效率高。

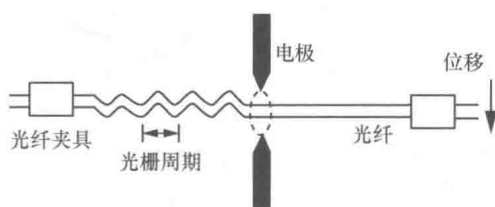
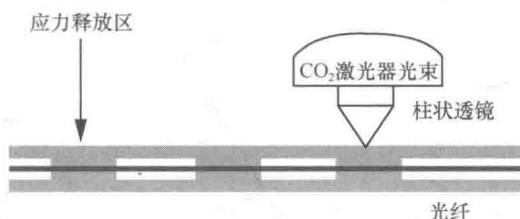


图 1.3 热激成栅法（电弧放电）制作 LPG 示意

图 1.4 热激成栅法（CO₂ 激光）制作 LPG 示意

如图 1.5 所示，艾江等^[25]用精密切割机载光纤表面上刻一定周期数和间距 V 型槽，将该光纤用类似于制作耦合器的熔融拉锥工艺，将光纤置于光纤拉锥机上，熔融光纤表面应力受 V 型槽的影响，纤芯会发生周期性变化，从而导致光纤的纤芯折射率发生轴向周期性调制。

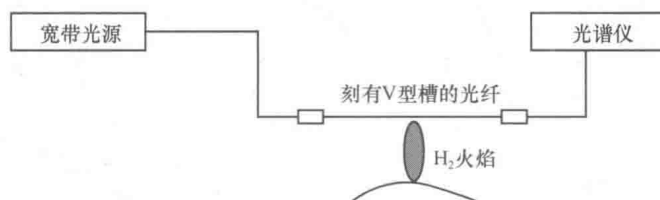


图 1.5 热激成栅法（氢氧焰加热）制作 LPG 示意

热激成栅法具有周期可调、灵活性高、对光源相干性条件低等优点，另外，热激成栅法普遍是在包层中写入光栅，纤芯可不必掺锗，能简化光纤生产工艺及减少生产成本，获得的 LPG 是纯构造性微扰，具有对温度不敏感特征，能克服紫外曝光法写制光栅性质不稳定缺点，但是热激成栅法受步进装置及光斑大小或电弧尺寸限制，热激成栅法仅能写制 LPG。

（3）机械微弯变形法

Savin^[26]用机械微弯变形法从光纤中写入 LPG，如图 1.6 所示，他们在构槽板上刻上周期性的沟槽，经光弹效应使光纤轴向发生周期性的折射率调制。对放置于沟槽板和平板之间的光纤，通过在沟槽板施加压力，通过改变沟槽板与光纤之间的夹角可以调节 LPG 的周期及谐振波长的位置，谐振波长的深度可通过调节压力的大小

来实现。由于护套可以减少光纤的微弯，去除光纤的护套时光栅的插入损耗大，而不去除护套时光栅的插入损耗小。该种写入方法对光纤没有要求，不需光纤具有光敏性，几乎常用的光纤都可用机械微弯变形法制作，且该方法制作的 LPG 的温度稳定性比较好，与光感性的光栅类似，且当压力去除后，光纤的传输可恢复它的最初波段，即可擦除。但是由于外部压力所致的线性双折射会表现出偏振模式色散。

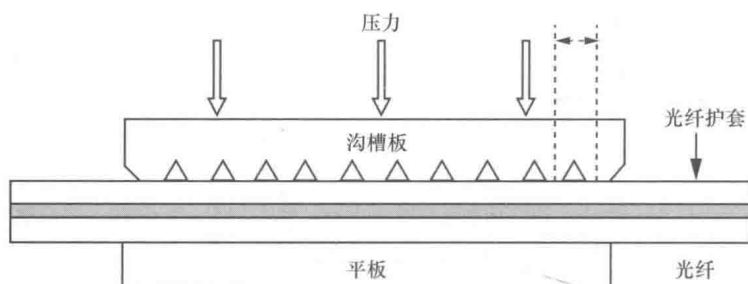


图 1.6 机械微弯变形法写入 LPG 示意

（4）微透镜阵列写入法

微透镜阵列写入法^[27]是利用微透镜阵列实现激光振幅的周期性调制写入 LPG，如图 1.7 所示。相邻透镜的中心间距决定了写入光栅的空间周期，通过控制写入的时间和照射到模板上光栅的宽度即写入光栅的总长度，故用同一块微透镜模板写入不同波长、不同透射率的长周期光栅。其优点是这种技术写入的效率高，写入一个 LPG 仅需要数十秒的时间，且该方法使激光能量全部用于曝光光纤，光能量的利用率比较高。微透镜阵列写入法的缺点在于大功率的紫外光束很容易损坏透镜阵列，且阵列和光纤之间的间隔需要精确控制。

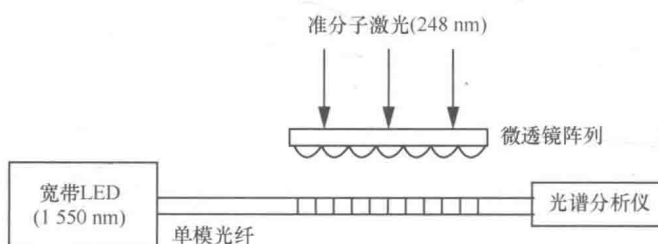


图 1.7 微透镜阵列写入法制作 LPG 示意

1.4 LPG 的应用概况

LPG 因为自身的特点，在光纤通信、光纤传感领域得到了广泛的应用。