



光纤器件制造理论与技术

帅词俊 刘德福 刘景琳 高成德 著



科学出版社

光纤器件制造理论与技术

帅词俊 刘德福 刘景琳 高成德 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对目前光纤器件损耗大、性能一致性差、生产效率和成品率低等问题,本书介绍了典型光纤器件的制造原理、工艺、装备要素与器件光学性能的量值关系。全书共分两部分,第一部分(1~6章)以熔融拉锥流变成形技术制备光纤器件为代表,重点介绍光纤器件的熔融拉锥制备理论、流变制造工艺参数(如熔融温度)及其扰动对流变制造成形过程、微观结构与器件光学性能的影响,以及一种新型的电阻加热系统和熔融拉锥机的研制;第二部分(7~10章)以光纤连接器端面研磨抛光为代表,重点介绍研磨抛光工艺和影响光纤连接器光学性能的关键因素、连接器端面研磨加工时光纤材料的去除机理与测试方法,以及光纤端面研磨变质层形成的理论机理。

本书可供从事光纤通信和光纤传感研究的科研院所、设计部门、工程施工单位和生产企业的技术人员参考,也适合高等院校通信工程、机械工程等专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

光纤器件制造理论与技术/帅词俊等著. —北京:科学出版社,2014. 10
ISBN 978-7-03-042009-1

I. ①光… II. ①帅… III. ①光纤器件-制造 IV. ①TN253

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223764 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬



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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:290 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

光纤器件在光纤通信、光纤传感等技术领域不可或缺,且随着技术的不断发展,器件性能要求不断提高。而我国关于制造光纤器件的技术准备不足,其相关的制造装备几乎全部依赖进口。目前,普遍使用的制造工艺与技术难以制备高性能的光纤器件,迫切需要更深层次地认识光纤器件制造过程中的关键科学问题,以期在制造技术和装备上取得突破。

光纤器件的制造是光学原理融合于制造科学的高精度、高难度的特殊制造技术,器件的功能由光学设计和制造精度确定。目前光纤器件的种类、结构形式十分丰富,各种不同功能的器件不断推陈出新,但有关器件制造过程的诸多机理性、规律性科学问题尚未得到充分认识,尚未形成连续、自动化的集成制造工艺流程,相应的装备水平也不能反映复杂的工艺原理,造成器件损耗偏大、性能一致性欠佳、生产效率和成品率低、生产成本较高。因此,对器件光学性能与制造过程参数的相关机制以及制造工艺与装备的运动、能量输运规律进行深层次研究是当前光学器件制造从技艺走向科学的必由之路。

熔融拉锥法是制造光纤耦合器、滤波器和波分复用器等光纤器件的通用制造方法;端面研磨则是光纤连接器、光纤器件对接的通用制造工艺。本书以光纤器件的光学性能与制造过程参数的结合点为核心,以提升光纤器件制造中具有代表性的制造技术为切入点,结合熔融拉锥法和端面研磨这两项共性技术,分别以光纤耦合器和光纤连接器为代表,以提高器件性能及其一致性为目的,系统阐述光纤器件制造界面的多过程耦合行为与亚微米精度生成机理、光波传输界面与制造界面的融合机制、光纤器件功能品质—制造精度—制造工艺—制造能量与运动状态的相关规律,并介绍新一代用于提升光纤器件性能的典型制造技术与装备。

本书由中南大学“高性能复杂制造国家重点实验室”中长期从事光纤器件亚微米制造领域相关教学和研究工作的教师撰写而成。其中,第1、2、5、6章由帅词俊撰写;第7~10章由刘德福撰写;第3章由刘景琳撰写;第4章由高成德撰写。

在撰写本书过程中,作者参阅了大量的国内外文献,在此向这些文献的作者表示感谢。另外,感谢韩子凯、曹弋远、黄伟等研究生为本书撰写所进行的插图、编排和录入等工作。

光纤器件制造技术发展日新月异,本书内容若有不妥之处,恳请专家学者以及使用本书的教师、学生和工程技术人员提出宝贵意见,以便今后不断改进。

目 录

前言

第 1 章 光纤器件制备导论	1
1.1 光纤器件的分类	2
1.2 光纤器件的制作方法	4
1.3 光纤器件的熔融拉锥流变制备方法	6
参考文献	10
第 2 章 光纤器件熔融拉锥工艺实验	14
2.1 耦合机理及结构参数的影响	14
2.1.1 耦合机理	14
2.1.2 结构参数对性能的影响	17
2.2 光纤器件的制备与性能测试	19
2.2.1 实验设备	19
2.2.2 制作流程	20
2.2.3 性能指标及测试方法	20
2.3 工艺参数与器件性能的相关规律	23
2.3.1 拉伸速度对性能的影响	23
2.3.2 预设分光比对性能的影响	25
2.3.3 相同工艺参数条件下的性能	27
2.4 工艺参数的测试	29
2.5 典型流变缺陷	31
2.6 小结	34
参考文献	35
第 3 章 光纤器件微观结构测试与分析	36
3.1 测试方法——红外光谱	36
3.1.1 红外光谱基本原理	36
3.1.2 分子的振动模式	38
3.1.3 Si—O—Si 振动模式	40
3.2 红外频率与微观结构的关系	41
3.2.1 红外频率与键角的关系	41
3.2.2 键长与键角的关系	44

3.2.3 键角与分子体积的关系	46
3.3 微观结构测试与分析	48
3.3.1 测试结果	48
3.3.2 结果分析	51
3.4 小结	53
参考文献	53
第4章 光纤器件熔融拉锥过程的有限元分析与建模	55
4.1 广义麦克斯韦模型建立的算法研究	55
4.1.1 松弛模量的表达方式	55
4.1.2 拟合算法的提出	56
4.1.3 广义麦克斯韦模型参数的确定	59
4.2 等温条件下的本构方程	62
4.2.1 广义麦克斯韦黏弹模型	62
4.2.2 三维黏弹本构方程	66
4.2.3 积分型本构方程的增量形式	68
4.3 温度对松弛的影响及时温等效方程	69
4.3.1 时温等效原理	69
4.3.2 Tool-Narayanaswamy 转变方程	71
4.4 小结	74
参考文献	75
第5章 光纤器件熔融拉锥过程仿真	77
5.1 有限元数值法	77
5.1.1 有限元法求解基本思路	77
5.1.2 力的平衡方程	78
5.1.3 几何变形方程	79
5.1.4 本构方程	79
5.2 几何模型的建立	80
5.3 光纤耦合器预加热分析	81
5.3.1 传热基本方程	81
5.3.2 单元选取与划分	81
5.3.3 火焰温度场分析	82
5.3.4 热分析的边界条件	83
5.3.5 热分析结果	84
5.4 光纤耦合器拉锥过程分析	86
5.5 熔融拉锥过程仿真结果与分析	89

5.5.1 光纤耦合器应力应变分析结果	89
5.5.2 光纤耦合器流变形状分析结果	90
5.5.3 工艺参数对光纤耦合器应力分布的影响	91
5.6 小结	94
参考文献	95
第6章 一种基于新型加热系统的熔融拉锥机	96
6.1 一种新型电阻加热系统的设计、制造与分析	96
6.1.1 加热方式与加热材料	96
6.1.2 电阻加热器的结构设计	99
6.1.3 电阻加热器的温度场分析	101
6.1.4 电阻加热器的供电系统	109
6.1.5 电阻加热系统的实验研究	111
6.2 一种电阻加热熔融拉锥机	116
6.2.1 熔融拉锥机总体设计	116
6.2.2 加热器工装的校核	122
6.2.3 熔融拉锥机性能实验	124
6.3 小结	127
参考文献	128
第7章 光纤器件端面研磨导论	130
7.1 光纤连接器的研究现状	131
7.1.1 光纤连接器插针体端面形状	132
7.1.2 提高光纤连接器回波损耗的途径	134
7.1.3 光纤连接器端面研磨与抛光	135
7.2 与光纤连接器端面研磨抛光加工相关的几个问题	136
7.2.1 硬脆材料塑性域超精密加工理论的研究	136
7.2.2 光学玻璃超精密研磨抛光加工变质层的研究	138
7.2.3 SiO ₂ 玻璃压缩特性的研究	139
参考文献	139
第8章 影响光纤连接器光学性能的关键因素及端面研磨抛光工艺试验研究	142
8.1 影响光纤连接器光学性能的关键因素研究	142
8.1.1 光纤连接器的性能指标	142
8.1.2 光纤端面间隙对连接器光学性能的影响	143
8.1.3 光纤端面粗糙度对光反射和透射的影响	146
8.1.4 插针体端面形状参数及其对连接器光纤物理接触的影响	148

8.1.5 光纤端面变质层与连接器光学性能的关系	154
8.2 光纤连接器端面研磨抛光试验	157
8.2.1 试验设备及基本步骤	158
8.2.2 研抛机运动参数及研磨压力的确定	160
8.2.3 光纤连接器端面研磨试验	162
8.2.4 光纤连接器端面抛光试验	167
8.3 小结	171
参考文献	171
第9章 连接器端面研磨加工时光纤材料的去除	173
9.1 光纤压痕试验研究	174
9.1.1 光纤的宏观特性和细观特性	174
9.1.2 光纤压痕试验	175
9.1.3 压痕形成过程	178
9.2 研磨过程中光纤材料去除的脆-塑转变研究	180
9.2.1 光纤材料去除的脆-塑转变临界切削深度	180
9.2.2 金刚石磨粒对光纤的最大切削深度计算	182
9.2.3 连接器端面研磨加工时光纤材料去除模式的试验	185
9.2.4 讨论	187
9.3 光纤端面研抛变质层的红外光谱测试	188
9.3.1 光纤红外光谱特征峰波数与其微观结构的关系	188
9.3.2 光纤端面研抛变质层红外光谱测试	190
9.4 小结	194
参考文献	195
第10章 光纤端面研磨变质层形成的有限元仿真	197
10.1 光纤材料的弹塑性本构模型	197
10.1.1 光纤材料的弹性本构关系	198
10.1.2 光纤材料在研磨加工时的屈服准则	199
10.1.3 光纤材料的塑性体积应变	200
10.2 光纤材料本构模型在通用有限元系统 ABAQUS 中的实现	202
10.2.1 光纤材料弹塑性本构模型的矩阵形式	203
10.2.2 光纤材料的弹塑性增量计算	205
10.2.3 光纤材料本构模型子程序 UMAT 的实现	209
10.3 光纤材料弹塑性本构模型参数的获取	210
10.3.1 光纤在维氏压头作用下的“载荷-压深”关系测量	210
10.3.2 光纤维氏压痕过程的有限元仿真	211

10.4 光纤研磨过程的三维有限元仿真.....	215
10.4.1 光纤研磨过程的三维有限元仿真计算模型.....	215
10.4.2 光纤研磨过程的三维有限元仿真计算结果.....	217
10.5 小结.....	223
参考文献.....	223

第1章 光纤器件制备导论

光纤器件是当今光纤通信技术中的研究热点。自 20 世纪 80 年代以来,光纤通信以其频带极宽、信息容量巨大等显著优点带来了通信业革命性的大发展,光纤已成为通信网的重要传输媒介,现在世界上大约有 90% 的通信业务经光纤传输^[1,2]。在目前对频宽需求不断提高的情况下,为满足广大用户对通信网宽带容量进一步扩大的要求,光纤通信正朝着密集波分复用技术(在同一根光纤内传输多路不同波长的光信号,以提高单根光纤的传输能力)结合光放大器(可将光信号直接放大,具有输出功率高、噪声小、增益带宽宽等优点)的高性能、大容量、灵活的全光网络发展。实现全光网络的主要关键器件有光波分复用器(WDM)、光开关、波长交换器、带宽可调滤波器、宽带 $1 \times N$ 分/合光器、光放大器、可调 LD 或 LD 光源阵列以及多路光接收机阵列等光纤器件^[3,4]。

光纤器件的另一重要应用领域是光纤传感技术。光纤传感技术是以光波为载体,光纤为媒质,感知和传输外界被测信号的新型传感技术。光纤传感器具有传统传感器无法比拟的优势:绝缘性好、无电火花、安全度高、抗干扰力强等。光纤传感实际上就是将外界信号按照其变化规律对光纤中光波的物理特征参数,如强度(功率)、波长、频率、相位和偏振态进行调制,然后通过解调后进行数据处理。因此,光纤传感和信号处理的基础是光纤本身以及由其制造成的各种光纤器件,如光纤耦合器、光纤延迟线、光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)光纤干涉仪、光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉腔和光纤陀螺仪等。同时,光纤传感技术也正在向时分复用、波分复用网络的方向发展。光纤器件已广泛应用于光纤传感和信号处理等系统^[5~10]。

总之,光纤器件不仅是光纤通信设备的重要组成部分,也是光纤传感和其他光纤应用领域不可缺少的器件,其重要性日益突出。世界上许多研究机构和光通信公司都投入巨大的人力和物力来开发光纤器件,并建立相关的产业——光电子产业。现在,光电子技术已成为世界各国在 21 世纪战略必争的前沿领域。据美国光电子产业发展协会预测,从 2003 年的全球光电子产品近 2000 亿美元,到 2010 年超过 4500 亿美元,到 2020 年将超过 2 万亿美元。美国商务部曾指出,“谁在光电子产业取得主动权,谁就在 21 世纪尖端科技较量中夺魁”。光电子产业是 21 世纪最具魅力的朝阳产业已是不争的事实,其在国家安全与经济竞争方面有着深远的意义和巨大的潜力。目前,世界上已形成以美国、欧洲和日本为中心的光电子产业发展格局。其中光电子技术主要方面的突破产生于美国,而光电子产业形成在日

本,日本国内光电子生产规模几乎占了世界市场的 $1/3$ ^[11~14]。我国在光电子技术方面几乎与世界同时起步,1986 年经中央批准的 863 计划中将光电子器件及其集成技术选为信息领域的三大主题之一。据中国光学光电子行业协会的数据统计,2006 年我国光电产值超过 1100 亿元。我国光电子产业近年来发展速度也很快,每年以 20% 左右的速度增长。目前,我国光电子产业已占全球市场 10% 左右的份额,但技术与产业水平与大国的地位还很不相称^[15,16]。因此,努力开发新的制造工艺和研制新的光纤器件也是我国光通信产业发展的重点。

1.1 光纤器件的分类

光纤器件按功能主要分为光有源器件和光无源器件^[17~20],具体类型见表 1.1。

表 1.1 光纤器件类型

光纤器件	光无源器件	光纤耦合器	分路器
			合路器
		光波分复用器	窄带波分复用器
			密集波分复用器
		光开关	机械式光开关
			非机械式光开关
		光衰减器	固定光衰减器
			可变光衰减器
		光隔离器	块状型光隔离器
			光纤型光隔离器
			波导型光隔离器
		光纤连接器	固定连接器
			活动连接器
		光纤光栅	
光有源器件	光源		发光二极管
			激光器
	光放大器		半导体放大器
			掺杂稀土放大器
	光电探测器		

熔锥型光纤器件是光纤器件中最具代表性也是构成其他器件的一种基础器件,在光纤通信中得到了广泛应用,其相应的制造工艺已经成为一门对光纤器件的开发具有举足轻重的技术——熔融拉锥技术。从理论上讲,除了光非互易器件以外,

熔融拉锥技术可以开发所有其他各类光无源器件,如光纤耦合器、光波分复用器、光开关、光衰减器、光纤光栅等。其中,光纤耦合器是光纤通信中使用量位居第二位的光纤器件^[21~25],针对光纤耦合器进行器件制造的基础研究具有普遍意义。

1. 光纤耦合器

光纤耦合器是光纤网络中的关键无源器件,其作用是实现光信号的分路/合路,一般是对同一波长的光功率进行分路与合路,因此相应的又称分路器与合路器。现常用熔融拉锥法制作,其制作过程是将两根单模(或多模)除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢,在高温下加热熔融,同时向两侧拉伸,最终产生一段双向圆锥结构,入射的光功率在这个双锥体结构的耦合区发生光功率再分配,一部分光功率从“直通臂”继续传输,另一部分光从“耦合臂”传输到另一光路,实现光功率的分配(见图 1.1)^[26,27]。

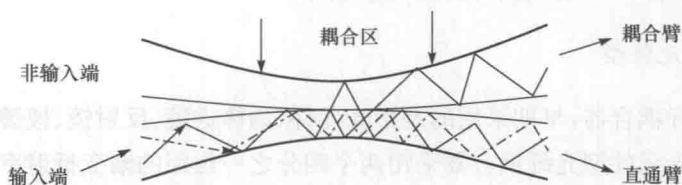


图 1.1 光纤耦合器示意图

近年来,随着光纤通信、光纤用户网、光纤传感技术等领域的迅猛发展,光纤耦合器的应用也越来越广泛。以往只应用在骨干网络中的光纤耦合器,如今已广泛地应用到小区通信网络中。现在光纤耦合器已形成门类齐全、品种繁多的产品系列,成为用量上仅次于连接器的关键光无源器件。不仅如此,对于近在咫尺的光纤到家(FTTH)时代,其显著的程度更扮演着超高速全光网络缔造者的关键角色^[28~30]。光纤通信系统未来的发展趋势是“宽带化”,因此对光通信器件的工作带宽提出了越来越高的要求,相应的器件技术也将实现向宽带技术的过渡,光纤耦合器也不例外。全波耦合器的带宽覆盖了光通信系统的 O+E+S+C+L 波段,在即将全面展开的应用全波光纤的 CWDM 城域网建设中会被广泛应用。

2. 光波分复用器

光波分复用器是指通过调谐波源的调制,将几路不同的信号用不同波长的光波在同一根光纤中传输,执行把不同波长光波合在一起,以及在终端分开任务的器件。利用熔锥型光纤器件对波长敏感的特性,制作双波长的复用,如 1310nm/1550nm 的 WDM 系统、掺铒光纤放大器(EDFA)应用的 980nm/1550nm(如图 1.2 所示)和 1480nm/1550nm WDM 系统、光学监控系统应用的 1510nm/1550nm WDM(其中

1550nm 为信号光波长,1510nm 为监控光波长)。

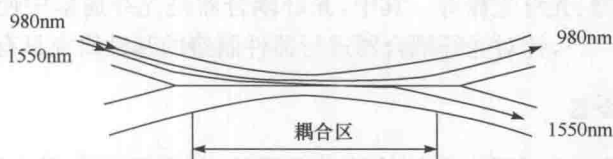


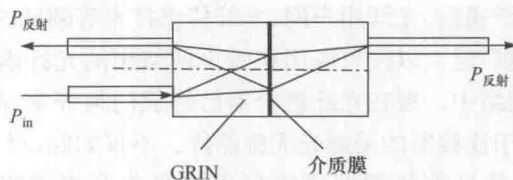
图 1.2 双窗口 WDM 光纤耦合器示意图

1.2 光纤器件的制作方法

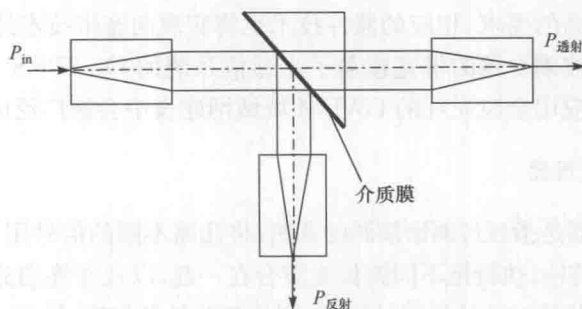
光纤器件按制作方法可分为微光元件型、全光纤型(含腐蚀法、研磨法和熔锥法)和平面波导型,以光纤耦合器为例来说明。

1. 微光元件型

制作光纤耦合器,早期采用的是微光元件(如棒透镜、反射镜、棱镜等)的组合、拼接等。微光元件型光纤耦合器采用两个四分之一焦距的渐变折射率圆柱形透镜(GRIN),中间夹有半透明涂层镜面(也可以在 GRIN 圆柱透镜端面直接涂上这种介质)构成,见图 1.3(a)。



(a) 采用半透明镜面的耦合器



(b) 采用 45° 半透明棱镜的耦合器

图 1.3 微光元件型光纤耦合器

输入光束(功率 P_{in})投射到第一个 GRIN 圆柱形透镜,其中部分光被半透明镜面反射回来耦合进第二根光纤,而透射光则聚焦在第二个 GRIN 圆柱透镜并耦合进第三根光纤。这种微光元件型光纤耦合器结构紧凑、简单、插入损耗较低($<0.3\text{dB}$),对模功率分配不敏感,也得到了很多应用。如果将半透明介质膜涂在插入两个 GRIN 透镜间的 45° 的棱镜表面,见图 1.3(b),可以构成另一种微光元件型光纤耦合器。这类方法耦合机理简单,直观,可由一般的几何光学方法进行描述,但存在环境稳定性较差、与光纤传输线路耦合困难等缺点^[31,32]。

2. 全光纤型

1) 腐蚀法

腐蚀法后来逐渐发展到全光纤器件,即直接在两根(或以上)光纤之间形成某种形式的耦合。这类方法最先出现的是由 Sheem 和 Giallorenzi^[33]发明的蚀刻法,即将两根裸光纤扭绞在一起,浸入氢氟酸中,腐蚀掉光纤四周的涂覆层和包层,从而使光纤纤芯相接触,实现两根光纤间的耦合。这种方法虽然简单,但制作出来的耦合器不仅不耐用,而且对环境温度的变化很敏感,缺乏实用价值。

2) 研磨法

Bergh 等^[34]发明的光纤研磨法采用机械和光学加工的方法,将光纤用光学黏合树脂胶合于玻璃等材料基板上的 V 形槽中,然后用光学研磨抛光的方法对埋有光纤的基板进行研磨抛光,使光纤覆层的厚度能最大限度地减薄,同时监视光通量,研磨结束后,便可以将两块研抛成光学平面的埋有光纤的基板拼合,并让受到研磨的光纤段平行相邻,若在两块基板之间填以折射率相匹配的介质,便可产生有效的光功率耦合。这种方法克服了分立元件法的一些缺点,并可做成分光比可调的耦合器,器件的实用性也有所提高,但这种方法的工艺复杂,制作困难,成品率低,并且所制作出的耦合器性能容易受到环境因素特别是温度的影响,插入损耗大,一般只在实验室和特定场合使用,无法适用于商业应用。

3) 熔锥法

第一个熔锥型光纤耦合器是 1977 年 Kawaski 制作的 2×2 多模光纤耦合器^[35]。随后,Kawaski 等于 1981 年用熔锥法制出了单模光纤耦合器^[36]。1983 年,Bures 和他的科研团队对光纤耦合器的应用做了深入的研究,利用熔锥法和其他一些特殊工艺研制出了光波分复用器和密集波分复用器(DWDM)等^[37]。由于这种技术具有明显的优势,已成为当前制作耦合器的主要方法。熔融拉锥法是将两根或多根光纤去掉外包层,平行靠拢后置于高温火焰或其他加热器件中熔合并拉伸,两根光纤置于高温区的部分熔融并受到拉伸发生流变变形,形成双锥体结构。当光纤纤芯之间的距离减小到可以产生导波光相互耦合的距离时,便可制成光纤耦合器。由于熔融形成的双锥体角度很小,纤芯与包层之间的模式转换基本

上不会有任何损失,因此使得熔锥的耦合器比其他的技術有更小的附加损耗(excess loss)。除此之外,全光纤的元件的光纤结构不会与其他结构一样有界面或是不连续的情况,因此内部不会有反射损耗,有很高的方向性。熔锥法由于制作工艺简单,在商业上得到了广泛的应用。

3. 平面波导型

集成化是未来光纤通信发展的必然趋势,集成光学在通信器件方面的应用会越来越广泛。光波导是光集成的核心,是为光波的传播所规定的通道。光集成中的光波导是用溅射、镀膜、扩散、光刻或离子注入等在某种半导体衬底上加工出适合于某种波长的光传输通道。利用平面波导原理制作的光纤耦合器具有体积小、分光比控制精确、易于大批量生产等特点,但这种技术还不完善。与之比较,熔融拉锥法更加灵活,在目前更为实际。

1.3 光纤器件的熔融拉锥流变制备方法

1. 光学原理

早期的耦合器采用分立光学元件组合拼接而成,其耦合机理简单、直观,用一般的几何光学方法进行描述即可。20世纪50年代后期,人们开始利用电磁场理论对光纤耦合器的机理进行广泛的研究^[38~48],其中H-S理论、V-P理论和标量场理论最为普遍。这些理论假设组成光纤耦合器波导结构的两根光纤的各个模相互正交,但实际上各个模相互之间并不一定正交,因此这种方法并不精确。特别是对于熔融拉锥型光纤耦合器,在耦合作用的腰部导波模变成包层模,普通耦合理论是无效的。随后,人们提出了耦合模理论,把光纤耦合器简化成平行波导的近似模型,作弱导近似和弱耦合近似,把一根光纤看作另一根光纤的微扰动,互相耦合的两波导中的场各保持了该波导独立存在时的场分布和传输系数,耦合的影响表现在场的复数振幅的沿途变化。

熔锥型光纤耦合器的理论分析要比腐蚀型和磨抛型两种光纤耦合器的分析复杂,这是因为熔锥区的典型结构呈连续缓变的双锥形状,再加上锥区和耦合区复合波导的结构不同,所以导致了耦合区和锥区功率耦合具有不同的特点:①耦合强弱不同,在锥区,两熔锥纤芯虽然很靠近,但仍有微米级的间隙,它们之间的耦合属于弱耦合;而在耦合区,两纤芯之间相互接触,属于强耦合;②传输的基模场分布不同,当传导模进入耦合区域后,由于纤芯很细,大部分光功率渗入光纤包层中,原来在独立光纤中传输的基模场(零阶贝塞尔函数分布)变为由包层作为芯,纤外介质(一般为空气)作为新的包层的复合波导传输。由于纤芯折射率的影响,两光纤中

的模场可近似为三角形分布。由于光纤被熔融拉锥后的波导和场分布以及传输特性与拉锥前相比发生了很大的变化,严格的数学分析需要求解纤芯、包层和周围介质所构成的复合波导区域内的矢量波动方程。为了简化分析,很多学者针对不同类型的光纤耦合器提出了不同的近似模型,如弱耦合波导模型和强耦合波导模型^[38~48]。

1985年,Hardy等^[49]提出了统一耦合模理论,它能够对波导中的频谱特性进行精确分析。这种理论把波导中的场分布展开成一组完整的正交模,每一个单独波导的导模加上辐射模形成一组完备的基。这一组完备的基可用来表示其他波导的模结构及整个波导结构的场,再求解麦克斯韦方程组。用这种理论能对平面波导型光纤耦合器进行精确的分析。由于统一耦合模理论是由麦克斯韦方程组直接推导出来的,因而所得到的方程组更方便更直观。

2. 流变成形

光纤耦合器的性能主要由熔锥区的微观结构、显微形貌与几何形状参数等决定。围绕这些,国内外的学者开展了一定的研究,但从研究现状来看,对光纤耦合器的光学原理分析与结构设计较多,对耦合器的光场耦合机理虽然提出了很多种理论,但这些理论都是对理想状态下的光纤耦合器进行光学性能研究,没有考虑流变制造工艺过程中产生的流变缺陷对耦合器性能的影响。从制造科学角度来看,对流变制造过程的力学行为规律研究不够,对制造过程的机理与规律研究不足,尤其对熔融拉锥工艺参数与器件光学性能的相关机制认识不够,基本上处于一种基于经验的技艺阶段,生产耦合器也基本处于手工操作阶段,自动化程度低^[50~53]。

现阶段对光纤以及光纤玻璃高温状态下流变的行为和理论的研究主要是针对光纤生产。而这些理论主要研究的对象为在熔化温度以上呈液相状态的光纤玻璃,不适合对制造光纤耦合器中呈黏弹状态的光纤玻璃进行研究。光纤耦合器的这种熔融温度状态的流变行为更适合用黏弹松弛理论进行分析。针对光纤耦合器的黏弹流变行为,Cummings曾建立过一个流变数学模型,但是模型中对温度场进行了简化的假设,并且数学模型计算复杂,缺乏实际应用的价值^[54]。随后,Eliopone对Cummings的模型进行了改进,对数学模型进行了简化^[55]。但此模型仅适合计算出光纤耦合器的截面曲线形状,不能得到光纤耦合器在制造过程中应力、应变等其他力学参数,应用范围较窄。

3. 微观结构

光纤耦合器由光纤熔融拉锥而成,而光纤是由高纯度的石英玻璃制作。石英玻璃是一种非晶体材料。一般认为非晶体材料是一种内部结构近程有序、远程无序的无定形“过冷液体”,即硅氧四面体在空间无规则的排列。硅离子与四个相邻

氧离子结合,形成四面体结构单元;硅离子处于四面体的中心,而氧离子处于四个顶角上,见图 1.4。

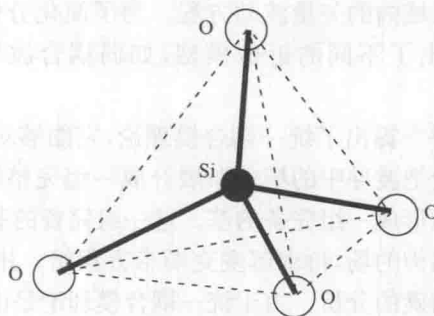


图 1.4 硅氧四面体结构单元

在二氧化硅中,相邻的四面体共用一个氧离子,这相邻两个四面体的相对位置可以有一定的挠度,即在连接两个四面体时,如图 1.5 所示,连接硅离子与共用顶角氧的 SiO 与 $\text{Si}'\text{O}$ 这两条线,所构成的夹角 θ 可以存在一定变动。当石英玻璃受外力作用时,单个硅氧四面体比较稳定,变化极小,而相邻硅氧四面体间的位置不是很稳定,会发生明显的变化,相应地导致 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}'$ 夹角 θ 发生明显的变化。

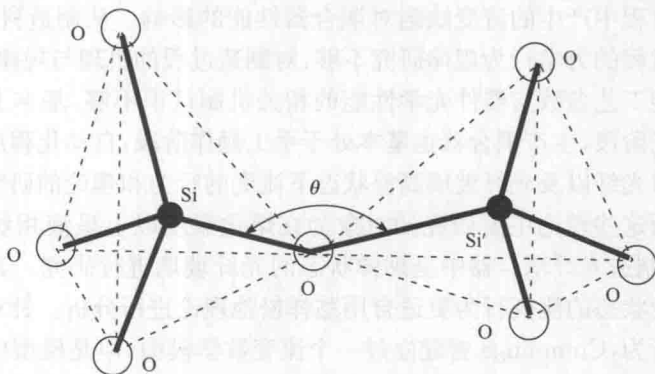


图 1.5 共用一个角氧离子的相邻结构单元

红外光谱法作为一种测定材料结构特征和光学性能的有效方法,经常被用于研究石英玻璃的结构松弛、羟基含量、掺杂离子对网络结构的改性等。红外光谱包括红外透射、红外吸收和红外发射光谱三种方式。对无机物而言,这三种方式的特征峰位置大致相同。围绕着玻璃结构这个中心,国内外的许多专家学者以红外光谱法为分析手段,展开了很多的研究,取得了许多令人满意的成就。

在工艺条件方面,Chmel 和 Eranosyan^[56]、Agarwal 和 Tomozawa^[57]、Magrude 等^[58]研究了合成石英玻璃的红外反射光谱;周永恒和顾真安^[59]用红外反射光谱