

OPTICAL
FIBER

Optical Fiber Material
Technology

光纤 材料技术

主编 苏君红 张玉龙
浙江科学技术出版社

光纤材料技术

主编 苏君红 张玉龙

浙江科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤材料技术/苏君红,张玉龙主编. —杭州:浙江科学技术出版社, 2009. 4

ISBN 978-7-5341-3338-1

I. 光… II. ①苏…②张… III. 光导纤维 IV. TN252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 001324 号

书 名 光纤材料技术
主 编 苏君红 张玉龙

出版发行 浙江科学技术出版社

杭州市体育场路 347 号 邮政编码: 310006

联系电话: 0571-85152486

E-mail: myy@zkpress.com

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司
印 刷 浙江印刷集团有限公司印刷
经 销 全国各地新华书店

开 本	787×1092 1/16	印 张	32
字 数	707 000	插 页	4
版 次	2009 年 4 月第 1 版	2009 年 4 月第 1 次印刷	
书 号	ISBN 978-7-5341-3338-1	定 价	98.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现倒装、缺页等印装质量问题,本社负责调换)

责任编辑	张祝娟 莫亚元	封面设计	孙 菁
	严 冰 陈小兵		
责任出版	田 文	责任校对	张 宁

主 编：苏君红 张玉龙

副 主 编：黄 晖 齐贵亮 王喜梅 张广玉 巩晓雁 李 萍

编写人员：王永连 王喜梅 孔祥海 石 磊 帅 琦 刘 栋

齐贵亮 徐亚洲 陈 瑞 巩晓雁 李创业 李 萍

苏君红 张广玉 张玉龙 张丽娜 宫 洁 夏 敏

柴 娟 郭 斌 黄 晖 曾昕琳 曾泉雁

内容摘要

本书扼要介绍了光纤的基础知识、制备技术、应用技术和发展方向。着重介绍了石英光纤、氟化物玻璃光纤、硫系玻璃光纤、单晶玻璃光纤、多晶光纤、光子晶体光纤、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)塑料光纤、聚苯乙烯塑料光纤、聚碳酸酯塑料光纤和耐热塑料光纤的基本特点、制备技术、性能分析和应用技术等内容。与此同时,还详细介绍了光纤连接器、光纤耦合器、波分复用器、光纤陀螺、光开关、光纤传感器、光纤激光器、光纤放大器、光纤光栅等光纤器件的主要类型与特点、制备技术、性能分析及应用等内容,是光纤材料与器件研究、制备、应用、管理、销售和教学人员必读之书。

前 言

自 1876 年电话发明至 20 世纪 70 年代,100 多年来,通信线路都是由铜制成导线,并历经架空明线、对称电缆到同轴电缆的发展演变过程。干线通信使用的标准同轴电缆再加上金属护套,每千米达 4t 多,有色金属的消耗量大得惊人。20 世纪 70 年代末,从石英玻璃光纤的研制成功到 80 年代投入应用成为人类通信史上的里程碑,揭开了光通信技术时代的序幕,实现了由电子通信向光子通信的历史性飞跃。这种光纤不需消耗任何有色金属,质量极轻,传输损耗小,不受外界干扰,保密性强,受到各国的高度重视。90 年代初,美国提出建设“信息高速公路”,世界各国掀起了建设“信息高速公路”的高潮,而“信息高速公路”的主体实际上就是光纤通信网。到目前为止,世界上铺设光纤总里程达几亿千米,每根光纤通信容量达上亿条话路,可以说光纤已成为人类信息社会的基石。一根光纤通向并连接了数以万计的用户,光纤通信带来了高速发展的信息时代,且又从根本上改变了人类的生活方式、工作方式、交往方式,光纤成了现代通信网络和未来全球信息网的脊梁。经过近 30 年的研究与发展,已形成了以石英玻璃光纤为主,氟化物玻璃光纤和硫系玻璃光纤为辅,塑料光纤作为

补充,着力发展晶体光纤的比较完备的光纤体系。

适用于远程通信,可作为通信干网光缆,尤其是海缆的单模玻璃光纤,已具有 $1.31\mu\text{m}$ 常规单模光纤(即 G652 光纤)、 $1.55\mu\text{m}$ 零色散单模光纤(即 G653 光纤)和非零色散位移单模光纤(即 G655 光纤);适用于做局域网或校园网,费用仅为单模光纤 $1/4$ 的多模光纤;可用于 70km 领域范围的,在 $1280\sim 1625\text{nm}$ 全波长范围实现光通信的,并消除水吸收峰的城域网适用的全波光纤;制造成本低、芯径大、光源耦合效率高、光功率大,可用于接入用户网的塑料光纤以及正在研制中的具奇特色散特性、超低光损耗的晶体光纤,这些光纤的研制和成功应用为全球信息网的建立打下了坚实的物质基础。

为普及光纤基础知识,宣传并推广光纤研制和应用成果,我们组织编写了《光纤材料技术》一书,全书共七章 36 节。本书着重介绍了石英玻璃光纤、氟化物玻璃光纤、硫系玻璃光纤、单晶光纤、多晶光纤、光子晶体光纤、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)塑料光纤、聚苯乙烯塑料光纤、聚碳酸酯塑料光纤和耐热塑料光纤的基本特点、制备技术、性能分析和应用技术等内容。同时,还详细介绍了光纤连接器、光纤耦合器、波分复用器、光纤陀螺、光开关、光纤传感器、光纤激光器、光纤放大器、光纤光栅等光纤器件的主要类型、特点、制备技术、性能分析及应用等内容,是光纤材料与器件研究、制备、应用、管理、销售和教学人员必读之书。

本书突出适用性、先进性和可操作性,理论叙述从简,以实例说明问题,论述中注重通俗性,其内容丰富、信息量大、数据准确、图文并茂。若本书的出版发行能对我国光纤材料器件的研究、应用与发展起到促进作用,作者将感到十分欣慰。

在本书编写过程中,得到兵器工业集团 53 研究所和 211 研究所领导和广大科技人员的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,文中错误在所难免,敬请读者批评指正。

苏君红

2008 年 9 月

目 录

第一章 概 述	1
1.1 简介	1
1.2 光纤制备技术	3
1.3 光纤的应用	7
1.4 光纤技术的发展	14
第二章 石英玻璃光纤	22
2.1 纯石英玻璃光纤	22
2.2 稀土掺杂石英玻璃光纤	41
2.3 掺氟石英玻璃光纤	74
2.4 掺氮石英玻璃光纤	80
2.5 大功率 Nd - YAG 激光传输石英玻璃光纤	83
第三章 氟化物玻璃光纤	89
3.1 简介	89
3.2 纯氟化物玻璃光纤	104
3.3 稀土掺杂氟化物玻璃光纤	111
第四章 硫系玻璃光纤	119
4.1 简介	119
4.2 光纤制备工艺	120
4.3 性能特性	126
4.4 应用与关键技术	131
4.5 几种硫系光纤	135
第五章 晶体光纤	145
5.1 单晶光纤	145
5.2 多晶光纤	188
5.3 光子晶体光纤	199

第六章 塑料光纤	213
6.1 概述	213
6.2 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光纤	238
6.3 聚苯乙烯(PS)光纤	253
6.4 聚碳酸酯(PC)光纤	270
6.5 含氟塑料光纤	277
6.6 耐热塑料光纤	292
6.7 塑料光纤研究方向与展望	304
第七章 光纤器件	307
7.1 光纤连接器	307
7.2 光纤耦合器	336
7.3 波分复用器	361
7.4 光纤陀螺	381
7.5 光开关	389
7.6 光纤传感器	419
7.7 光纤激光器	438
7.8 光纤放大器	471
7.9 光纤光栅	489
参考文献	501

第一章 概 述

1.1 简 介

1.1.1 基本概念

光纤是光导纤维(optical fiber, OF)的简称,具有束缚和传输从红外到可见光区域内光和传感的功能。实际上,光纤是由透明材料制成纤芯,然后在纤芯周围采用比纤芯材料折射率稍低材料制成包层,将纤芯包覆起来,通过包层界面反射,使射入纤芯的光信号在纤芯中传播前进的媒体。

1.1.2 光纤的分类

目前,光纤的分类方法较多,归纳起来大体有以下 5 种:

(1) 按工作波长分类 可分为紫外光纤、可见光纤、近红外光纤和红外光纤等。

(2) 按折射率分布分类 可分为阶跃(SI)型、近阶跃型、渐变(GI)型和其他类型(如三角形、W 形、凹隔型等)光纤。

(3) 按传输模式分类 可分为单模光纤(其中包括偏振保持光纤、非偏振保持光纤)和多模光纤等。

(4) 按制备方法分类 可分为气相轴向沉积(VAD)法、化学气相沉积(CVD)法、溶胶-凝胶法等制备的光纤。

(5) 按原材料分类 可分为玻璃光纤、晶体光纤和塑料光纤 3 大类,如图 1-1 所示。

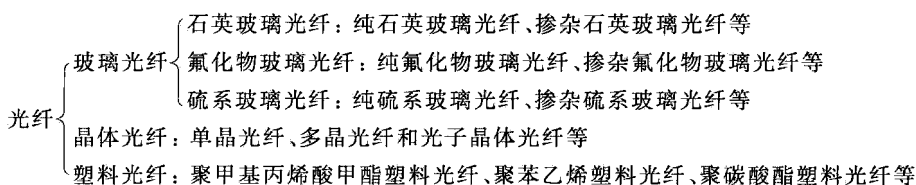


图 1-1 光纤分类

1.1.3 光纤的结构

光纤是高透明电解质材料制成的非常细(外径约为 $125\sim 200\mu\text{m}$)的低损耗导光纤维。一般通信用光纤的横截面结构如图 1-2 所示。光纤本身由纤芯和包层构成,如图 1-2(a)所示。纤芯是由高透明固体材料(如高二氧化硅玻璃、多组分玻璃和塑料等)制成。纤芯的外面是包层,由折射率相对纤芯较低的石英玻璃、多组分玻璃或塑料制成。光纤的导光能力取决于纤芯和包层的性质。

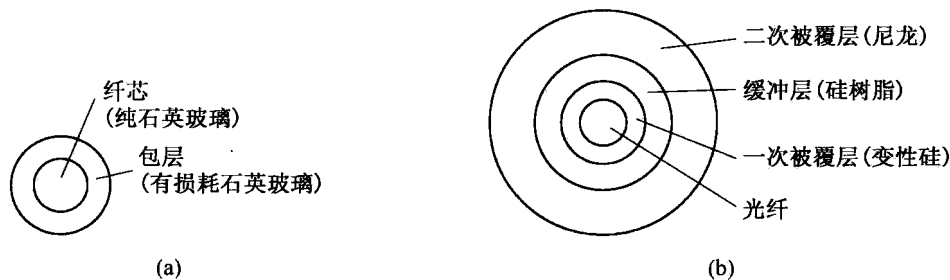


图 1-2 通信用光纤的横截面结构图

1.1.4 光纤传输的基本原理

如果有一束光投射到折射率分别为 n_1 和 n_2 的两种界面上时(设 $n_1 > n_2$),投射光将分为反射光和入射光。入射角 θ_1 与折射角 θ_2 之间服从折射定律 $\sin\theta_1/\sin\theta_2 = n_2/n_1$ 。当入射角 θ_1 逐渐增大时,折射角 θ_2 也相应增大。当 θ_2 增大到 90° 时,入射光线全部返回到原来的介质中,这种现象叫光的全反射。此时入射角 $\theta_1 = \sin^{-1}(n_2/n_1)$,叫临界角。在光纤中,光的传输就是利用光的全反射原理。当入射到纤芯中的光与光轴线的交角小于一定值时,光线在界面上发生全反射。这时,光将在光纤的纤芯中沿锯齿状路径曲折前进,但不会穿出包层,这样就避免了光在传输过程中的折射损耗,如图 1-3 所示。

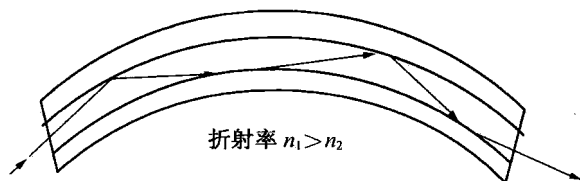


图 1-3 光的传输原理

1.2 光纤制备技术

1.2.1 玻璃光纤制备技术

1.2.1.1 石英玻璃光纤制造技术的发展

1. 各种气相沉积工艺的改进和完善

石英玻璃光纤的制造一般采用气相沉积工艺。世界各大公司对该工艺进行了改进和完善。

美国康宁玻璃公司已研制了一种用于 CVD 工艺的闪蒸供料系统。该系统可以大量地把液体原料 SiCl_4 输入一个闪蒸室,在室内快速蒸发,形成的原料蒸气与氧气及其他一些掺杂剂蒸气混合,混合气流送入氢-氧焰喷灯中发生氧化/火焰水解反应。与过去的鼓泡瓶式的供料系统相比,供料速率大大提高,有利于提高生产速率,降低制造成本。

日本住友电气公司在 VAD 工艺中,改善了掺氟效果。具体方法是:把沉积后的粉坯棒置于 SiF_4 气氛中,在压力大于 2 个大气压的条件下加热,在制品透明化之前掺氟,最终在同样气氛条件下,以更高的温度烧结达到透明化。用这种方法可以大剂量、高速率、均匀地在光纤包层中掺氟。

日本古河电气公司改进了 VAD 制棒设备,能对制造过程进行实时监测。采用传感器测量正在合成的玻璃粉灰的质量,从而可实时精确地测知正在合成中的光纤预制棒的质量,有利于工艺过程的控制。

美国在 MCVD 工艺中,采用合成石英管代替天然水晶原料制成的石英管来制作预制棒,是该工艺的发展方向,有利于提高光纤质量,降低制造成本。

德国、荷兰有些厂家已在生产合成石英管。合成石英管不仅可用做衬底管,还含有一部分导光包层材料,有的合成石英管含有掺氟的导光包层材料。采用这类石英管,只需沉积纤芯材料和少量包层材料,简化了 MCVD 工艺,减少了沉积时间。或者说,同样的沉积时间可获得更多的光纤产量。

美国菲利普公司用 PCVD 工艺制作预制棒,为改善均匀度,在沉积区的进气端使等离子体的平移有所停顿,从而使进气端沉积的几何尺寸与其余部分一致。过去,在 MCVD 工艺中,也曾采取相同的措施,以解决进气端沉积的椎形问题。

2. 光纤涂覆技术的改进

SiO_2 玻璃或掺锗 SiO_2 玻璃有特殊的光学和力学特性,最适于制造光纤。不过,这些玻璃有脆性及与水发生反应的缺点。脆性使光纤易损坏,与水反应易造成腐蚀。采用各种聚合物或金属涂覆层可解决上述问题。然而,尚需进一步改善其性能,包括长期稳定性。

美国通用电气公司已就新的涂覆料成分申请并获得了专利权。该成分是可紫外辐射固化的含环氧组分或乙烯基组分的有机硅(epoxy-functional or vinyl-functional diorganopolysiloxanes)。这种涂料可在光纤表面形成柔韧的、松黏附的、在环境条件下稳定的预涂覆层。该涂层既有助于防止通过光纤传输的光脉冲的衰减,也有助于防止信

噪比降低。此种涂料成分也适于光纤的高速拉制。

美国光纤波导公司已在玻璃光纤上涂覆了铝、金,光纤强度超过数百万兆帕,抗疲劳特性也很好,作为传感器、生物医学器件以及各种高温场合的可靠的光纤是很有前途的。

日本古河电气公司已研究了一种多层涂覆工艺,即先在光纤外表面涂一薄层无定形碳,再于碳涂层外表面上涂导电层。碳涂覆层可提供抗氧、防水能力,而导电涂层是由不同厚度的多种金属涂层构成的,能抗热、导电,并作为光纤的机械支撑层。

英国的 STC. plc 公司已在光纤表面上制成了氮化硅或氧-氮化硅涂覆层。该涂层是一种陶瓷材料,涂覆方法已获专利。在拉丝炉的气流中加入氮化气氛,可进行直接氮化;或者把氮化气氛加入外沉积工艺的反应气流中混合,通入氢-氧焰喷灯中,也可进行直接氮化。

3. 改善光纤特性的测试技术

对长光纤的机械可靠性起作用的 3 项最关键的参数是裂纹分布、裂纹生长方式及无应力老化特性。美国贝尔实验室已研究了专用的检测技术以检查这些裂纹。这种检测技术可对光纤端面上的缺陷进行探测、分类、计量,可在 3 个聚焦位置上分别得到端面的像,再把这些像合而为一,各像之间的不整合现象可用于区别是裂纹还是划痕,也能探测并鉴别出是碎裂还是疤痕。

美国康宁公司已研制出一种光纤强度连续测量装置,可测量长光纤的强度分布,精确到 10^{-5} 断裂率水平。将这一强度分布与 20m 长光纤测得的强度分布的高强度区结合起来分析,可求得总强度分布。总强度分布对于评价光纤可靠性是重要的,因为短光纤测试仅能得出以小裂纹为基础的数据,而长光纤通常含有较大的裂纹,光纤的疲劳和老化特性也随着裂纹的大小而改变。大裂纹对标准负荷下的疲劳损坏是最敏感的。

此外,康宁公司还研究了熔融石英玻璃光纤疲劳特性的测试方法。疲劳参数一般是用 1m 或更短的、具有初始强度的光纤段测定的,可是实际使用的光纤要长得多,其强度也低得多。一种维氏测试法(Vicker's)是把受到控制的裂纹引入光纤表面,已应用该方法成功地建立了低强度光纤的模型,借此可计算在不同环境条件下被测光纤的疲劳特性,从而预计真实工作条件对光纤的影响。

精确地测量包层直径(精确到 $\leq 0.1\mu\text{m}$)是又一项重要的测试课题,其目的在于为制造不需要手工调整的高效活动连接器提供基准。为满足这一需求,美国国家标准与技术研究所已研制了 3 种仪器,即接触式测微仪、扫描式共焦显微镜和白光干涉显微镜,这些仪器能以 $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$ 的精度进行绝对测量。

1. 2. 1. 2 溶胶-凝胶(sol-gel)工艺的发展

溶胶-凝胶(Sol-gel)也是制造高纯石英玻璃光纤的一种有效方法,可从溶胶液中直接拉制纤维。溶胶液的可抽丝性是随着乙醇的含量而变化的,往原液中添加聚乙烯醇可有效改善其可抽丝性。目前,已用 Sol-gel 法制备了 Er^{3+} 、 Nd^{3+} 及 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 掺杂的石英玻璃光纤,用于制造光纤激光器和放大器。在掺 Er^{3+} 石英单模光纤中获得最低光损耗。采用 Sol-gel 工艺还可扩展 SiO_2 基光纤所用的共同掺杂剂的选择范围,并且可获

得均匀的掺杂,这可进一步改善光纤的某些特性。

Sol-gel 工艺在各种光学材料的生产中有着广泛用途。杜邦公司已发展了以醇盐溶液为基础的 Sol-gel 工艺,用于生产符合化学计量的、致密的、无裂纹的 KTiOPO_4 薄膜,其潜在用途包括光波导。

也可用 Sol-gel 工艺制造玻璃与聚合物的透明复合材料。其方法是把有机物单体植入经过干燥处理的疏松多孔的凝胶体中,并就地聚合。用此法制出了多种很稳定的、非多孔性的复合材料,其最高加工温度不超过 100°C 。这些材料有潜力用做固体激光器基质、非线性光学材料及光电器件材料。

贝尔实验室用颗粒状凝胶制备了一种低碱、高 SiO_2 含量的多组分玻璃,含有不超过 $6\text{mol}\%$ 的 Li_2O 、 K_2O 、 Rb_2O 或 Cs_2O ,不超过 $3\text{mol}\%$ 的 Al_2O_3 ,并用 Er^{3+} 和 Na^+ 进行掺杂。把含 Al^{3+} 和 Er^{3+} 的溶液植入低碱含量的凝胶管内表面,经烧结之后,可制得有陡峭的成分分布和折射率分布的玻璃管。这样,以前不能制得的多组分玻璃块体也可由 Sol-gel 工艺途径制取,其工艺流程如图 1-4 所示。这种玻璃的热胀系数小、玻璃化温度 (T_g 约为 $750\sim 800^\circ\text{C}$) 和软化点较低,可用于制作光波导。

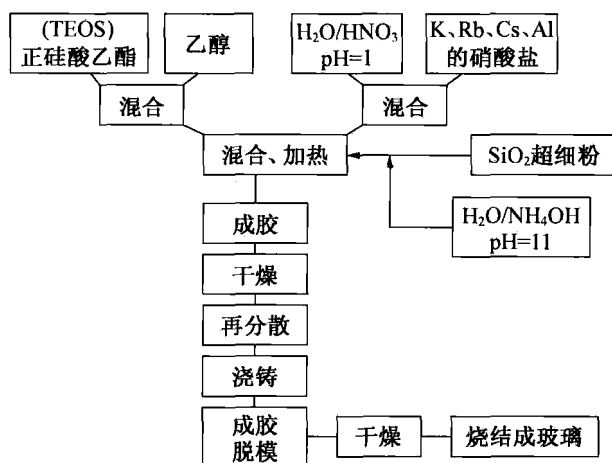


图 1-4 AT&T Bell 实验室制作 $\text{M}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 玻璃的 Sol-gel 工艺流程图

Rutgers 大学已研究了非晶态氟化物 ZBLAN ($\text{Zr}-\text{Ba}-\text{La}-\text{Al}-\text{Na}$) 凝胶的合成工艺,用于制作氟化物玻璃。已发现,所用原材料的种类对凝胶的性质有影响。采用冠醚制出的凝胶有纳米级的高度均匀性,用醇盐所产生的凝胶则有偏析和结晶现象。

1.2.1.3 提高光纤产品的可靠性

为使光纤持续成功地应用,不管光纤采用何种工艺、何种成分制成,均必须有很高的可靠性。这要求光纤制造者与用户之间密切合作。光纤用户必须确定光纤的应力-时间要求,对安装过程中的应力及长期工作的应力都要考虑到,明确所用的环境条件,以便制造厂家可采用适当的模型和数据使光纤可靠性达到最佳化。

光纤制造厂家必须用最高的质量标准,并将在光纤制造过程中大裂纹的产生、出现的频次及其危害性减至最低限度。当光纤在上述条件下制出之后,必须使裂纹的进一步生长减至最低限度,在光纤的储存、处理、装运、成缆及使用过程中保持光纤的强度。

可以预计,随着光纤制造工艺的改善以及新的玻璃组分、新的光纤品种的开发,光纤产品的市场无疑将进一步扩大,用途将更加广泛。

1.2.2 晶体光纤的生长技术

单晶光纤的生长方法很多,分类也各不同,但最常用的有导模法、毛细管固化法和基座法 3 类。

1. 导模法

导模法一般都有一个容器,原料放入容器后加热熔化,熔体从一个带有小孔的模子中引出,馈入籽晶后进行定向生长。调整模子的孔径、温度梯度、生长速率等参数,可以控制光纤的直径,其基本原理如图 1-5 所示。

随着光纤生长的需要,人们不断地对这类方法进行改进。上面提到的加压毛细管馈送法和毛细管连续引出法,后来的 μ -CZ 法以及最近报道的一些新方法等,主要是在熔体的引出途径、模子的形状等方面做了改进,归根到底,它们仍属于导模法。

这类方法的主要优点是能连续生长光纤,并能改变模子的形状生长出特殊截面的光纤,是目前生长单晶光纤的主要方法之一。但它受容器材料的限制,难以生长熔点超过 2100°C 的晶体光纤,而且难以避免污染问题。

2. 毛细管固化法

毛细管固化法的基本原理是将很细的毛细管捆成一束,一端插入熔化的材料中,利用毛细现象使溶液充满毛细管中,然后在温场中通过改变温度梯度使溶液单方向结晶而固化成单晶光纤。

这类方法的主要技术要点是毛细管的选取及温场的设计。其优点是技术简单,可以制备细直径乃至单晶光纤,一次可获得多根光纤。然而它只能制成短的光纤,无法连续生长,而且纤芯的熔点受毛细管的限制,所以这类方法只适用于生长某些有机非线性晶体光纤。

3. 基座法

基座法也叫浮区熔法,是将块状晶体加工或用粉末晶体压制成小棒,称作源棒。源棒竖直安装在送料装置上,顶端通过局部加热形成小的熔区,浮在源棒顶端,馈入籽晶后定向提拉而成为单晶光纤。加热方式有电阻加热、感应加热、电火花加热和激光加热等。

最常用的方法是激光加热基座法(LHPG),图 1-6 所示为该法生长单晶光纤的示意图。其优点是:① 激光直接照射熔区,而且熔区温度可以很高,这样既无污染问题,又能生长出高温光纤;② 熔区小,温度梯度大,故生长速度快;③ 用料少,成本低,是探索新晶体的方便、经济而快速的手段;④ 整个过程可以采用计算机控制,自动化程度高。

除了这 3 类生长方法外,还有气相生长法、气相-液相-

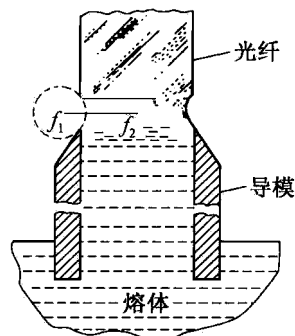


图 1-5 导模法生长单晶光纤的基本原理示意图

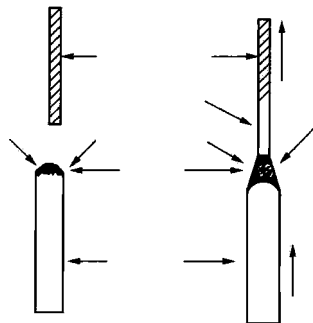


图 1-6 激光加热基座法生长单晶光纤示意图

固相生长法、溶液生长法等,但这些方法目前使用较少,在此不一一介绍。

1.2.3 塑料光纤的制备技术

塑料光纤的制造工艺主要有 2 种:挤压法和界面凝胶法。

(1) 挤压法 主要用于制造阶跃折射率分布的塑料光纤(SI)。其工艺流程如下:首先,作为纤芯的聚甲基丙烯酸甲酯的单体甲基丙烯酸甲酯通过减压、蒸馏提纯后,连同聚合引发剂和转移剂一并送入聚合器中。接着,再将该容器放入电烘箱中加热,放置一定时间让单体完全聚合。最后,将盛有完全聚合的聚甲基丙烯酸甲酯的容器加温至拉丝温度,并用干燥的氮气从容器的上端对已熔融的聚合物加压,该容器底部小嘴便挤出一根塑料纤芯,同时使挤压的纤芯再包覆一层低折射率的聚合物,就制成了阶跃折射率塑料光纤。

(2) 界面凝胶法 用于梯度折射率分布的塑料光纤(GI)制造。其工艺流程如下:首先将高折射率掺杂剂置于芯单体中制成芯混合溶液,然后把控制聚合速度、聚合物相对分子质量大小的引发剂和链转移剂放入芯混合溶液,将该溶液投入一根选作包层材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的空心管内,再将装有芯混合溶液 PMMA 管子放入烘箱内,在一定的温度和条件下聚合。在聚合过程中,PMMA 管内逐渐被混合溶液溶胀,从而在 PMMA 管内壁形成凝胶相,凝胶相分子运动速度减慢,聚合反应由于“凝胶作用”而加速,聚合物的厚度逐渐增厚,聚合终止于 PMMA 管子中心,从而获得一根折射率沿径向呈梯度分布的光纤预制棒。最后,将塑料光纤预制棒送入加热炉内加温拉制成梯度折射率分布的塑料光纤。

1.3 光纤的应用

1.3.1 用于核心网干线的低衰减、中等色散和大有效面积光纤

现在核心网仍然采用由 G. 652 + DCF 组成的色散管理传输线路来进行长途的 DWDM 传输。为了实现 40Gbit/s 的 DWDM 长途传输,需要解决传输线路中每个跨距的最大累计色散问题。为此,日本古河公司提出以正中等色散光纤(P-MDF)加负中等色散光纤(N-MDF)组成色散管理传输线路进行 40Gbit/s 的 DWDM 长途传输。研究发现,构成色散管理传输线路的最佳光纤应该是低衰减、中等色散和大有效面积的光纤。

众所周知,光纤的衰减、色散和大有效面积的调整既取决于纤芯的折射率分布,又与所选择的掺杂剂种类和光纤制造工艺有关。因此,在正、负中等色散光纤的设计中重点解决了 2 个关键问题:

① 采用环形芯折射率分布来扩大纤芯的有效面积($>100\mu\text{m}^2$)和保持色散系数为中等大小[$<13.5\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$]。

② 以掺氟包层来降低光纤的衰减系数($<0.21\text{dB/km}$)。

表 1-1 和表 1-2 分别给出了 P-MDF 和 N-MDF 的性能特点,以及由 P-MDF 与 N-MDF 构成的色散管理传输线路的总线路传输特性。

由表 1-2 可以看出,通过优化 N-MDF 的折射率分布结构,使其大约为 $-13\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的色散系数,以完全补偿由 P-MDF-1 或 P-MDF-2 产生的色散系数,从而使 P-MDF 与 N-MDF 组成的传输线路的总色散系数为零。另外,将 N-MDF 的色散斜率提高到 $-0.070\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,这样可以在宽的工作波带范围内获得十分平坦的总传输线路色散。因此,未来的长途干线、高速率的 DWDM 传输可以选用 P-MDF+N-MDF 传输线路方案。

表 1-1 P-MDF 和 N-MDF 的性能特点(1 550nm)

光纤品种	衰减 (dB/km)	色散系数 [ps/(nm · km)]	色散斜率 [ps/(nm ² · km)]	有效面积 (μm ²)	偏振膜色散 (ps/km ^{1/2})	弯曲损耗 (dB/m)
P-MDF-1	0.210	13.5	0.068	125	0.05	6
P-MDF-2	0.180	12.9	0.068	95	0.05	10
N-MDF	0.220	-13.0	-0.070	35	0.05	5

注: ① P-MDF-1 为非掺氟包层的环形芯折射率分布光纤。

② P-MDF-2 为掺氟包层的环形芯折射率分布光纤。

表 1-2 P-MDF 与 N-MDF 组成线路的总传输性能(1 550nm)

光纤品种	衰减 (dB/km)	色散系数 [ps/(nm · km)]	色散斜率 [ps/(nm ² · km)]	有效面积 (μm ²)	偏振膜色散 (ps/km ^{1/2})
P-MDF-1+N-MDF	0.215	0.0	-0.002	77	0.05
P-MDF-2+N-MDF	0.201	0.0	-0.001	65	0.55

1.3.2 用于城域网的负色散平坦光纤

由于全世界因特网高速通信的需要,城域网已经变得越来越重要。城域网的特点是传输容量大、传输距离短和业务种类多等,因此城域网光纤的研究重点是工作波长宽、色散系数小等。为了减少城域网建设投资,城域网系统使用的光源是价格便宜的直接调制激光器(DML)。但是,DML 会因载波引起模折射率变化而产生大的“啁啾”,从而限制了系统的传输距离。解决 DML 产生大的“啁啾”问题的具体方法有:

① 改善 DML 的结构。

② 利用负色散系数的传输光纤(N-MDF)来消除 DML 产生的大的“啁啾”。

在 N-MDF 与 DML 组成的传输线路中实现了 C 带 10Gbit/s、100km 的传输。在低水峰非零色散位移光纤(WPS-NZDSF)上分别成功地进行了 10Gbit/s、28.5km(O 带)和 10Gbit/s、12km(C 带)的传输。

因为 N-MDF 在 O 带具有大的色散系数,限制了其传输距离,而 WPS-NZDSF 在 C 带和 L 带具有正色散,要使 10Gbit/s 系统传输距离超过 20km 是困难的。为了解决