

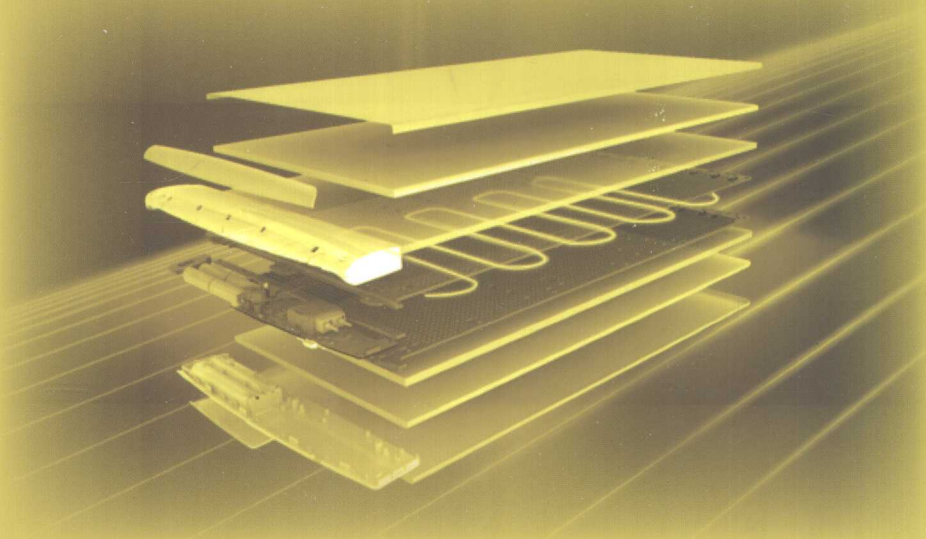
“十二五”国家重点图书出版社规划项目：光通信技术丛书

光纤材料 制备技术

主 编◎魏忠诚

副主编◎何方荣 王玉芬 王体虎 莫 杰 邵豫川

主 审◎毛 谦



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

“十二五”国家重点图书出版

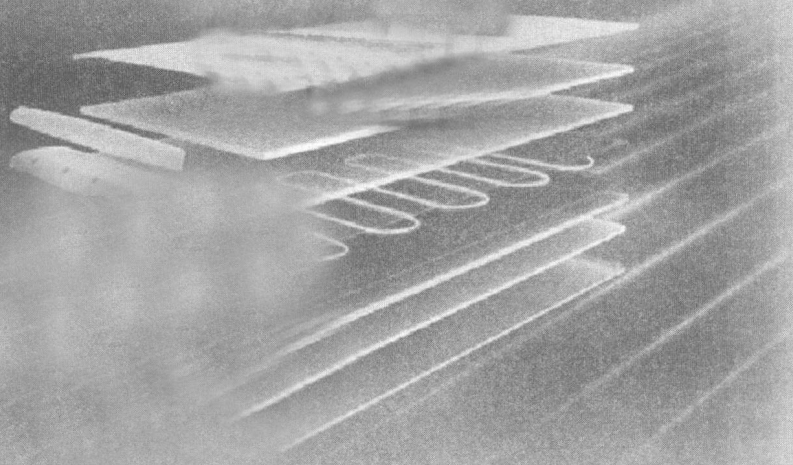
技术丛书

光纤材料 制备技术

主 编◎魏忠诚

副主编◎何方荣 王玉芬 王体虎 莫 杰 郜豫川

主 审◎毛 谦



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书对光纤制造中使用的所有材料的特性、制备工艺和提纯技术以及相关检测技术进行了系统、全面的介绍。

全书共有 12 章,第 1 章至第 4 章分别介绍光纤通信的基础知识、光纤分类及性能要求、光纤设计与制造工艺以及光纤制造对材料的技术要求;第 5 章至第 10 章分别介绍光纤制造用石英材料、高纯四氯化硅、高纯四氯化锗、各种高纯气体和光纤涂覆材料等从初始材料到高纯材料的全流程制备技术以及储运要求;第 11 章专门介绍塑料光纤及其材料制备技术;第 12 章集中介绍光纤用材料性能检测涉及的各种测试方法与技术。

本书可作为技术资料用于指导光纤材料制造厂家生产,也可作为光纤制造行业管理人员和技术人员学习、培训用教材,还可作为大专院校学生专业课本和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤材料制备技术 / 魏忠诚主编. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2016.9

ISBN 978-7-5635-4895-8

I. ①光… II. ①魏… III. ①光导纤维—材料制备 IV. ①TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 192827 号

书 名: 光纤材料制备技术

著作责任者: 魏忠诚 主编

责任编辑: 刘 佳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 24

字 数: 596 千字

印 数: 1—2 000 册

版 次: 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4895-8

定 价: 48.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

光通信技术丛书

编委会

主 审 毛 谦

主 任 陶智勇 曾 军

委 员 魏忠诚 胡强高 胡 毅

杨 靖 原建森 魏 明

序

现代意义上的光纤通信源于 20 世纪 60 年代,华人高锟(C. K. Kao)博士和霍克哈姆发表了题为《光频率介质纤维表面波导》的论文,指出利用光纤进行信息传输的可能性,提出“通过原材料提纯制造长距离通信使用的低损耗光纤”的技术途径,奠定了光纤通信的理论基础,简单地说,只要处理好石英玻璃纯度和成分等问题,就能够利用石英玻璃制作光导纤维,从而高效传输信息。这项成果最终促使光纤通信系统问世,而正是光纤通信系统构成了宽带移动通信和高速互联网等现代网络运行的基础,为当今我们信息社会的发展铺平了道路。高锟因此被誉为“光纤之父”。在光纤通信高科技领域,还有众多华人科学家做出了杰出的贡献,谢肇金发明了“长波长半导体激光器件”,金耀周最早提出了同步光网络(SONET)的概念,厉鼎毅是“光波分复用之父”等。

武汉邮电科学研究院是我国光纤通信研究的核心机构。1976 年,武汉邮电科学研究院在国内第一次选用改进的化学气相沉积法(MCVD)进行试验,改制成功一台 MCVD 熔炼车床,在实验过程中克服了管路系统堵塞、石英棒中出现气泡、变形等一系列“拦路虎”,终于熔炼出沉积厚度为 0.2~0.5 mm 的石英管,并烧结成石英棒。1977 年年初,研制出寿命仅为 1 h 的石英棒加热炉,拉制出中国第一根短波长(850 nm)阶跃型石英光纤(长度 17 m,衰减 300 dB/km),取得了通信用光纤研制史上第一次技术突破。1981 年,武汉光纤通信技术公司在国内首先研制成功一批铟镓砷磷长波长光电器件,开启了长波长通信时代。1982 年 12 月 31 日,中国光纤通信第一个实用化系统——“82 工程”按期全线开通,正式进入武汉市市话网试用,从而标志着中国开始进入光纤通信时代。

最近,由武汉邮电科学研究院余少华总工牵头承担的国家 973 项目“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”在国内首次实现一根普通单模光纤中在 C+L 波段以 375 路、每路 267.27 Gbit/s 的超大容量超密集波分复用传输 80 km,传输总容量达到 100.23 Tbit/s,相当于 12.01 亿对人在一根光纤上同时通话。对于我们日常应用而言,相当于在 80 km 的空间距离上,仅用 1 s 的时间,就可传输 4 000 部 25 GB 大小、分辨率 1 080 像素的蓝光超清电影。该项目实现了我国光传输实验在容量这一重要技术指标上的巨大飞跃,助力我国迈入传输容量实验突破 100 Tbit/s 的全球前列,为超高速超密集波分复用超长距离传输的实用化奠定了技术基础,将为国家下一代网络建设提供必要的核心技术储备,也将为国家宽带战略、促进信息消费提供有力支撑。

经过 40 多年的发展,武汉邮电科学研究院经国家批准为“光纤通信技术和网络国家重点实验室”“国家光纤通信技术工程研究中心”“国家光电子工艺中心(武汉分部)”“国家高新技术研究发展计划成果产业化基地”“亚太电信联盟培训中心”“商务部电信援外培训基地”“工业和信息化部光通信产品质量监督检验中心”和创新型企业等,已形成覆盖光纤通信

技术、数据通信技术、无线通信技术与智能化应用技术四大产业的发展格局,是目前全球唯一集光电器件、光纤光缆、光通信系统和网络于一体的通信高技术企业。

2013年第68届联合国大会期间,中国政府推动并支持通过决议将2015年确定为“光和光基技术国际年”。其重要原因是,今年是诺贝尔奖获得者、号称“光纤之父”的科学家高琨先生发明光纤50周年。为了进一步普及推广光纤通信技术的最新成果,武汉邮电科学研究院和北京邮电大学组织资深的工程师和培训师,编写了“十二五”国家重点图书出版规划项目:光通信技术丛书,该丛书包括《光纤宽带接入技术》《光纤配线产品技术要求与测试方法》《分组传送网原理与技术》《光网络维护与管理》《OTN原理与技术》《光纤材料》《光有源器件》等,力图涵盖光纤通信技术的各个层面。

著名的通信网络专家、武汉邮电科学研究院总工程师、国际电联第15研究组(光网络和接入网)副主席余少华院士,烽火科技学院卢军院长和各位领导对光通信技术丛书给予了大力支持。国际电信联盟组织的成员、武汉邮电科学研究院总工毛谦教授在百忙之中对光通信技术丛书进行了细心审核。

我们将这套丛书献给通信技术和管理人员、工程人员、高等院校师生,目的是进一步普及光纤通信的最先进技术,共同为我国的光纤通信技术发展努力奋斗!

陶智勇

前 言

光纤通信是以光波作为信息载体,以光纤作为传输媒介的一种通信方式。从理论设想、应用验证到现在还不到 50 年,光纤通信技术就在全世界范围内完成了推广和普及,其发展速度之快、应用面之广是通信史上罕见的。

从 20 世纪 70 年代开始,我国就开始布局光纤通信技术研究,经过以自主开发为主的持续不断地创新发展,在几代科技工作者共同努力下,我国完全掌握了光纤通信全部技术,并以自有知识产权技术建立了覆盖光纤光缆、光传输与网络系统和光器件等完整产业链,光通信产品已走进千家万户,应用遍及全球。仅 2015 年我国光通信产品的消费已占到全球市场需求的近 50%,2015 年的光纤光缆生产量就占全球的 55%,因此我国已成为名副其实的光纤通信技术大国、需求大国和制造大国。

作为光纤通信技术关键技术之一的光纤光缆技术主要包括光纤预制棒制造技术、光纤拉丝技术和光缆制造技术。其中在光纤光缆产业链中,光纤预制棒制造技术是核心。光纤预制棒制造工艺也是我国最早布局研究的核心工艺技术之一,经历了自主开发、引进消化和自主再创新等发展历程,我国自主开发了 MCVD 工艺、PCVD 工艺和套管制纤工艺等全部制造技术,目前正在开发适合光纤规模化生产的 VAD 工艺和 OVD 工艺。

光纤预制棒制造技术是一项系统工程,涉及多领域的技术。主要技术难点包括:(1)低成本的光纤制造最佳工艺技术;(2)配套的工艺设备制造技术;(3)光纤制造配套原材料技术。前两项技术由于国外相关技术封锁已逐步解除,国内技术工作者已借助国外基础工艺技术和设备,逐步掌握了相关核心技术,这些技术已实际应用于预制棒制造并还在进一步完善中。

长期以来光纤制造行业选择光纤预制棒配套主要原材料基本依赖国外厂商提供。造成这种局面的原因在于国内配套的原材料制造技术与国外存在差距,未形成完整的原材料生产配套能力,在一定程度上阻碍了光纤制造技术的快速发展。

作者有幸参与组织了光纤产业化全过程,在全球范围内对光纤预制棒全产业链特别是配套原材料生产技术进行了深入调研,积累了第一手技术资料。在此基础上,特组织业内专家编写了本专著,以期对光纤制造及配套材料自主技术的开发起促进作用。

本书聚焦于光纤制造原材料的制备技术,全书共分 12 章,第 1 章介绍了光纤通信的基础理论和知识以及光纤基本性能;第 2 章主要介绍石英光纤预制棒结构设计(包括基础理论、设计原则和结构参数设计等)、工艺设计(包括预制棒制造材料选择依据)和预制棒制造技术(包括技术原理、工艺设备和工艺过程控制等);第 3 章着重介绍光纤拉制理论、工艺设备与拉丝技术,讨论了拉丝过程各种影响因素;第 4 章总结了光纤制造用各种原材料的性

能、技术要求以及原材料对最终光纤性能的影响;第5章以后开始介绍具体的光纤用原材料的制备技术,其中第5章介绍的是光纤制造用石英材料的制备技术,包括工艺、设备和加工提纯技术;第6章和第7章分别从四氯化硅/四氯化锗性能介绍开始,着重介绍光纤用高纯四氯化硅/四氯化锗制备技术、提纯和包装储运技术;第8章重点介绍光纤预制棒制造中所使用的各种高纯气体材料的制备技术、提纯和包装储运技术;第9章偏重于介绍在光纤拉丝阶段所使用的各种高纯气体材料的制备与提纯技术以及包装储运技术;第10章单独安排一章介绍光纤用涂覆材料的制备技术,包括涂覆材料的特性、组成、配方组成设计、制造工艺技术和光纤对涂料的技术要求。由于塑料光纤是一种比较新颖的光纤材料,制造成本低、传输速度快,作为一种短距离的信息传输介质,具备很多性能优势,目前在通信领域的发展速度很快,未来在汽车传输系统和数据智能系统中具有十分好的应用前景。因此本书在第11章中对塑料光纤制备技术包括相关材料的特性与制备技术作了专门介绍;最后第12章集中介绍了光纤用材料性能检测涉及的各种测试技术与方法,这些测试技术为光纤材料的质量控制提供了可操作的手段。

全书由武汉邮电科学研究院魏忠诚负责筹划、统稿和主编,参与本书编写工作的还有武汉职业技术学院(简称武职);中国建筑材料科学研究总院石英与特种玻璃研究(简称建材院)、四川天一科技股份有限公司(简称天科股份)、亚洲硅业(青海)有限公司(简称亚洲硅业);有研国晶辉新材料有限公司(简称国晶辉)等单位的专家。其中第5章及第12章部分内容由建材院王玉芬、聂兰舰,王友军和武邮魏忠诚执笔;第6章全部及第12章部分内容由亚洲硅业王体虎、肖建忠,宗冰、蔡延国、董海涛、唐东昌、李彦换和武邮魏忠诚执笔;第7章全部和第12章部分内容由国晶辉莫杰、袁琴、王铁艳、武鑫萍和武邮魏忠诚执笔;第8章、第9章和第12章部分内容由天科股份邵豫川、王啸和武职何方荣执笔,其余各章均由魏忠诚和何方荣执笔。行业内多位专家也提供了许多有益资料,在此表示感谢!

光纤制造技术的发展将是一个不断提升的过程,对与之配套的原材料要求也会有所调整,其制备技术也会有新的发展与创新。本书仅是对光纤材料现有研究与实践成果总结。随着我国光纤预制棒制造技术日渐成熟,必将有众多厂家参与配套原材料技术的开发中,会有大量新技术和材料不断涌现,需要我们密切跟踪和深入研究。

光纤材料涉及知识面较广,由于作者掌握资料不全面,书中难免有疏漏之处,敬请批评指正。

编者

2016年5月

目 录

第 1 章 光纤通信技术	1
1.1 光纤通信发展历程	1
1.2 光纤通信特点	2
1.3 光纤通信的基本原理	5
1.3.1 光波基本理论	5
1.3.2 光的全反射理论	6
1.3.3 光纤传输的射线理论分析(几何光学分析)	6
1.3.4 光纤传输的波动理论	8
1.3.5 光纤通信系统	12
1.4 光纤通信技术的发展趋势	12
1.5 光纤分类	14
1.5.1 按光纤组成材料分	15
1.5.2 按光纤折射率结构分	17
1.5.3 按传输模式分	18
1.5.4 按实际用途分	18
1.5.5 按光纤截面结构分	19
1.6 典型商用光纤	20
1.6.1 商用多模光纤	22
1.6.2 商用单模光纤	23
1.6.3 商用特种商用光纤	29
第 2 章 光纤设计与制造	34
2.1 玻璃的光学特性	34
2.1.1 玻璃的折射率	34
2.1.2 折射率影响因素	35
2.1.3 玻璃的反射、吸收和透过	40
2.1.4 石英玻璃特性	41
2.2 光纤预制棒结构设计	44
2.2.1 光纤结构设计基本原则	44
2.2.2 光纤结构设计	45
2.3 光纤制造工艺设计	49

2.3.1 波导结构材料的选择	49
2.3.2 光纤制造工艺的选择	51
2.3.3 沉积工艺设计	51
2.4 光纤预制棒制造技术	53
2.4.1 概述	53
2.4.2 MCVD 工艺及关键技术	56
2.4.3 PCVD 工艺及设备	63
2.4.4 OVD 工艺	69
2.4.5 VAD 工艺及设备	75
2.4.6 外包层工艺	80
2.4.7 光纤预制棒非传统制造工艺	86
第3章 光纤拉制技术	90
3.1 光纤拉制原理	90
3.1.1 石英光纤成型基础	90
3.1.2 石英光纤成型的黏度与温度特性	91
3.2 光纤拉丝系统	92
3.2.1 拉丝设备的主要构成	93
3.2.2 光纤拉丝控制系统	96
3.3 光纤拉丝关键技术	99
3.3.1 光纤拉丝工艺	99
3.3.2 光纤拉制过程对光纤性能的影响	103
3.4 光纤涂覆工艺	106
3.4.1 光纤预涂覆	106
3.4.2 固化工艺	108
第4章 光纤制造用材料的性能与技术要求	115
4.1 光纤用原材料分类	115
4.2 光纤用材料的理化性能	116
4.2.1 石英玻璃材料的理化性能	116
4.2.2 光纤制造用材料的物化性能	117
4.3 光纤用材料技术要求	118
4.3.1 光纤材料的纯度	118
4.3.2 光纤用材料技术要求	119
4.4 光纤涂覆材料技术要求	123
4.5 对光纤特性的影响	124
4.5.1 光纤损耗	124
4.5.2 光纤预制棒沉积用原材料对损耗的影响	125
第5章 光纤用石英材料制造技术	129
5.1 石英材料概述	129
5.1.1 石英材料产业发展现状	129

5.1.2 光纤用石英材料	130
5.2 石英玻璃制坩工艺	131
5.2.1 电熔法	131
5.2.2 气炼法	133
5.2.3 高频等离子火焰熔制石英玻璃坩及厚壁管工艺	138
5.2.4 石英材料制造新技术	139
5.2.5 光纤用石英材料制造技术展望	140
5.3 石英管及棒材熔拉技术	140
5.3.1 接触法	140
5.3.2 无接触法	141
5.4 石英材料的深加工技术	142
5.4.1 石英材料的热加工工艺	142
5.4.2 石英材料热加工常用设备	144
5.4.3 石英材料的退火处理	145
5.4.4 石英材料的冷加工工艺	146
5.5 光纤沉积基管和套管用石英材料的纯化技术	147
5.5.1 石英材料的表面清洗	147
5.5.2 脱羟处理	147
第6章 光纤预制棒沉积用四氯化硅制造技术	149
6.1 四氯化硅的特性	149
6.2 四氯化硅的制造技术	150
6.2.1 硅铁氯化法	150
6.2.2 有机硅废触体氯化法	150
6.2.3 多晶硅副产法	152
6.2.4 硅氢氯化法	152
6.2.5 SiO_2 氯化法	153
6.3 四氯化硅的提纯技术	156
6.3.1 高纯液体材料提纯技术简介	156
6.3.2 四氯化硅的提纯方法	159
6.3.3 四氯化硅提纯设备	168
6.4 四氯化硅提纯后的包装与储存	170
6.4.1 高纯四氯化硅包装储存容器	170
6.4.2 高纯四氯化硅充装	171
第7章 光纤预制棒制造用四氯化锗生产技术	172
7.1 四氯化锗特性	172
7.2 四氯化锗的制造工艺和方法	173
7.2.1 单质锗的氯化法	173
7.2.2 锗精矿或锗富集物的盐酸蒸馏法	173
7.2.3 含锗碎屑氯化氢处理法	174
7.2.4 从含锗的硫化矿中制备四氯化锗	174

7.2.5 从煤中制备四氯化锗	174
7.3 四氯化锗的提纯技术	176
7.3.1 提纯原理	176
7.3.2 四氯化锗的提纯方法	178
7.3.3 四氯化锗提纯工艺	179
7.4 典型四氯化锗提纯设备	183
7.5 高纯四氯化锗提纯后的包装、储存与运输	184
7.5.1 高纯四氯化锗的包装存储容器	184
7.5.2 高纯四氯化锗原材料灌装	185
7.5.3 高纯四氯化锗原材料的储存	186
7.5.4 高纯四氯化锗原材料的运输	187
第8章 光纤预制棒用气体的制备技术	189
8.1 氧气制造技术	189
8.1.1 氧气特性	189
8.1.2 氧气制备方法	191
8.1.3 氧气提纯技术	194
8.1.4 包装与贮运	196
8.2 含氟气体的制造技术	198
8.2.1 二氟二氯甲烷	198
8.2.2 六氟化硫	199
8.2.3 四氟甲烷	203
8.2.4 氟化氢	205
8.3 氢气制造技术	208
8.3.1 氢气特性	208
8.3.2 氢气制备工艺	209
8.3.3 氢气提纯技术	211
8.3.4 包装与贮运	216
8.4 氯气制备技术	216
8.4.1 氯气特性	216
8.4.2 氯气的制备方法	217
8.4.3 氯气的提纯技术	222
8.4.4 氯气包装与储存	226
第9章 光纤制造用气体的制备技术	228
9.1 氦气制备技术	228
9.1.1 氦气特性	228
9.1.2 氦气生产方法	229
9.1.3 氦气提纯技术	232
9.1.4 氦气纯化后的技术指标	234
9.1.5 包装与贮运	234
9.2 氮气制备技术	235

9.2.1 氮气特性	235
9.2.2 氮气制备方法	235
9.2.3 氮气纯化技术	238
9.2.4 氮气纯化后的技术指标	240
9.2.5 包装与贮运	241
9.3 氩气的制备技术	241
9.3.1 氩气特性	242
9.3.2 氩气制备方法	242
9.3.3 氩气纯化技术	244
9.3.4 氩气纯化后的技术指标	246
9.3.5 高纯氩气的包装与贮运	247
9.4 氙气制备技术	247
9.4.1 氙气特性	247
9.4.2 氙气制备方法	248
9.4.3 氙气纯化技术	249
9.4.4 氙气纯化后的技术指标	249
9.4.5 包装与储运	250
第 10 章 光纤涂覆材料制备技术	251
10.1 光纤涂覆材料特性	251
10.1.1 光纤涂覆材料的分类	251
10.1.2 光纤涂覆材料对光纤性能的影响	252
10.1.3 光纤涂覆材料性能要求	253
10.2 光纤涂料组成	253
10.2.1 预聚体(prepolymer)	253
10.2.2 活性单体	255
10.2.3 光引发剂(Photo-initiator, PI)	256
10.2.4 其他添加剂(additive)	264
10.3 紫外固化光纤涂料制备工艺	265
10.3.1 涂料配方设计	265
10.3.2 预聚物的合成	269
10.3.3 光纤涂料的制备工艺	273
10.4 光纤紫外光固化涂料的技术要求	274
10.4.1 光纤涂料基本性能要求	274
10.4.2 光纤紫外光固化涂料技术要求	275
10.4.3 光纤涂料的发展趋势	276
第 11 章 塑料光纤及其材料制造技术	277
11.1 塑料光纤概述	277
11.1.1 塑料光纤发展历程	277
11.1.2 塑料光纤的特点	279
11.1.3 塑料光纤的应用	280

11.2 塑料光纤制造技术	281
11.2.1 塑料光纤的设计	282
11.2.2 塑料光纤的制备方法	286
11.3 塑料光纤芯材制备技术	290
11.3.1 PMMA 概述	291
11.3.2 PMMA 的制备技术	292
11.3.3 PMMA 材料的改性技术	297
11.4 PMMA 的纯化技术	300
11.4.1 甲基丙烯酸甲酯(MMA)的纯化	300
11.4.2 MMA 聚合反应引发剂的提纯	300
11.4.3 PMMA 的提纯	301
11.5 塑料光纤皮层材料制备技术	301
11.5.1 氟树脂	302
11.5.2 甲基丙烯酸氟化酯类均聚物制备方法	302
第 12 章 光纤材料检测技术	305
12.1 概述	305
12.2 光纤材料主要检测技术	306
12.2.1 色谱分析技术	306
12.2.2 质谱技术	310
12.2.3 红外光谱分析技术	320
12.2.4 其他基础检测技术	326
12.3 光纤材料中微量金属杂质含量的检测技术	329
12.3.1 金属元素杂质对光纤传输性能的影响	329
12.3.2 金属元素的检测方法	330
12.4 光纤材料中含氢和有机化合物杂质含量的检测技术	335
12.4.1 光纤沉积材料中含氢化合物和有机化合物对光纤性能的影响	335
12.4.2 测试原理	336
12.4.3 测试流程	336
12.5 光纤制造用石英玻璃材料的检测技术	339
12.5.1 石英玻璃管的外观检测	339
12.5.2 缺陷检测方法	341
12.5.3 石英玻璃管的纯度测试	342
12.5.4 石英玻璃管的热稳定性	343
12.6 光纤制造用气体检测技术	344
12.6.1 概述	344
12.6.2 气体水分测试方法	345
12.6.3 高纯气体中含碳化合物含量测试方法	350
12.6.4 微量氧的测试	355
12.6.5 高纯气体中微量氢的测试方法	360
12.6.6 高纯气体中颗粒度的测试方法	362
参考文献	367

第 1 章

光纤通信技术

1.1 光纤通信发展历程

信息交流与传递是人类社会最基本的特征和需求。人类在漫长的生活中创造了用于信息交流与记录的载体——语言和文字,同时还创造了许多信息传递方式,如古代的烽火台、金鼓、锦旗、航行用的信号灯等,这些都是解决远距离信息传递的方式,也是最早的通信手段和方式。

随着社会生产力的发展,人们对传递消息的要求也越来越高,希望通信具有迅速、准确、可靠等特点,且几乎不受时间、地点、空间、距离的限制。因此开发“电”来传递消息的技术成为必然的选择。1838年,莫尔斯发明有线电报,标志着人类进入电通信阶段。1896年,在麦克斯韦创立的电磁辐射理论上,马可尼发明了无线电报,无线电通信得到了迅速发展。20世纪50年代,跨洋电缆的敷设以及通信卫星的发射使得通信的覆盖范围更广,不同区域的人们相互之间信息传递与沟通更方便。

早期的通信技术受电磁波传输波长的限制,其传输速度和容量均受到影响,难以满足人类社会日益增长的信息交流的需要。由于光是电磁波,其频谱宽,覆盖可见光、近红外到紫外光谱,易于调制且光的传播速度极快,因此科学家一直希望开发光的相关技术用于通信,以突破传统电通信方式的技术瓶颈。

最初人们认为用光来传播信息必须解决光源问题和光在介质中传导的技术问题。利用光的全反射原理在介质中进行光的传导试验最早出现于19世纪,如1841年D. Colladan等研究光在水柱中的传导试验,衍生出了现代水幕电影技术与应用。20世纪20年代,利用玻璃纤维短距离传输图像得到验证,但由于最初使用的玻璃纤维是裸纤维,其强度、传光效果以及实用性受到影响,直至20世纪50年代,H. H. Hopkins等人在拉制玻璃纤维的过程中涂覆了一层包层材料,用这种带包层材料的玻璃纤维传输图像取得了较好效果,由此使得玻璃纤维传输图像由实验室走向工业化应用。

受此影响,从事光通信的科学家将玻璃纤维作为光传输介质进行试验研究。这时期主要研究了具有不同折射率分布的玻璃纤维在不同波长光下的传输特性,但由于光在传统的玻璃纤维中传输损耗极大(当时最好的玻璃纤维的损耗在1 000 dB/km),研究只停留上理论上,无法实用,从而许多研究者并不看好光纤通信。

20 世纪 60 年代,激光器的发明特别是可在室温运行的半导体激光器的出现,重新燃起人们对光通信研究的兴趣。1964 年,华裔学者高锟博士提出在电话网络中以光代替电流,以玻璃纤维代替铜导线是可行的。1966 年高锟博士发表了一篇划时代的论文《光频率介质纤维表面波导》,在无数次实验的基础上,他明确提出,当带有包层材料的玻璃光学纤维损耗降到 20 dB/km 以下时,可用于传送光信号来进行通信。而要降低玻璃纤维的损耗,就必须降低玻璃中杂质,特别是铁离子的含量。在随后的文章中,高锟博士陆续研究了不同材料的传输特性,指出石英玻璃材料可以达到光通信所需的较高纯度,可以作为光纤通信的最佳选择。由此激起了全球范围内开发低损耗石英玻璃纤维的热潮。但在当时的条件下,制造极纯的石英玻璃还是有极大难度的,一是石英玻璃熔点极高,二是制造高纯石英玻璃还没有现存的工艺技术。

在高锟研究理论的指导下,经过许多研究者的努力,美国 Corning 公司 R. D. Maurer 领导的一个研发小组采用化学气相沉积法(CVD 技术)成功地于 1970 年制造出几十米损耗小于 20 dB/km 的光纤样品来。这一突破,引起整个通信界的震动,世界发达国家开始投入巨大力量研究光纤通信。几年后,美国 Bell 实验室采用改进的化学气相沉积法(MCVD 技术)制造出 850 nm 处小于 4 dB/km 的光纤,并且生产效率极高。随后,损耗小于 1 dB/km 甚至在 1 550 nm 损耗小于 0.2 dB/km 的实用化石英光纤也问世了。

低损耗石英光纤规模制造问题解决后,1976 年,美国 Bell 实验室在亚特兰大进行了世界第一条采用多模光纤、波长 0.85 μm 发光管 LED 的激光、传输距离 110 km 的光纤通信系统的现场实验获得成功,使光纤通信向实用化迈出了第一步,由此开启了光纤通信时代。1981 年又实现了两电话局间使用 1.3 μm 多模光纤的通信系统,1984 年实现了 1.3 μm 单模光纤的通信系统,20 世纪 80 年代中后期又实现了 1.55 μm 单模光纤通信系统,20 世纪末或 21 世纪初发明了第五代光纤通信系统,用光波分复用提高速率,用光波放大增长传输距离的系统,光孤子通信系统可以获得极高的速率,在该系统中加上光纤放大器有可能实现极高速率和极长距离的光纤通信。

历经 40 多年突飞猛进的发展,光纤通信速率由 1976 年的 45 Mbit/s 提高到目前的 100 Gbit/s(实验室水平已达 1 Tbit/s 以上),光纤通信系统的传输容量从 1980—2010 年 30 年间增加了近 10 000 倍。光纤通信技术快速发展,新技术不断涌现,大幅提高了通信能力,并使光纤通信的应用范围不断扩大,光纤通信发展速度之快、普及程度之高、应用面之大是通信史上极其罕见的。

1.2 光纤通信特点

和传统通信技术相比,光纤通信具有如下特点:

1. 传输容量大

光波与无线电波相似,也是一种电磁波,图 1.2.1 为电磁波波谱图。常见可见光波长范围为 0.39~0.76 μm ,红外线是人眼看不见的光,其波长范围为 0.76~300 μm 。

目前光纤通信所用光波的波长范围(λ)为 0.8~2.0 μm ,属于电磁波谱中的近红外区。其中,0.8~1.0 μm 为短波长段,1.0~2.0 μm 为长波长段。光纤通信所用波长段与光纤的

特性有关,图 1.2.2 为光纤损耗与波长的关系,从图中可以看到从 0.8~2.0 μm 为光纤的低损耗区域,或称为低损耗窗口,光纤通信的窗口一般选择在低损耗窗口区。

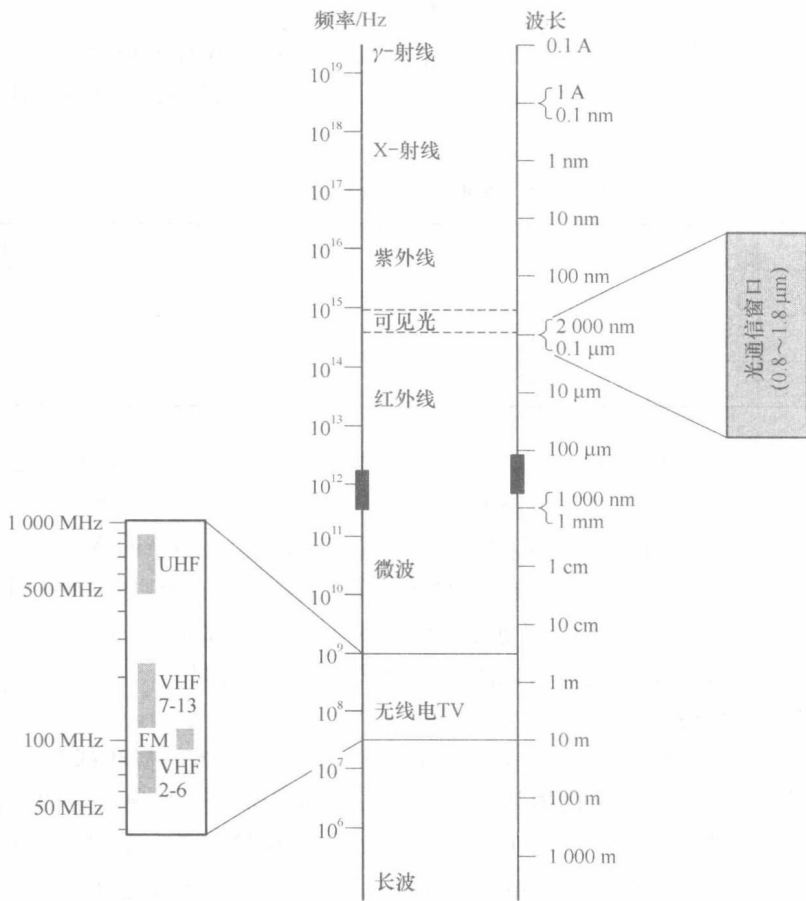


图 1.2.1 电磁波波谱图

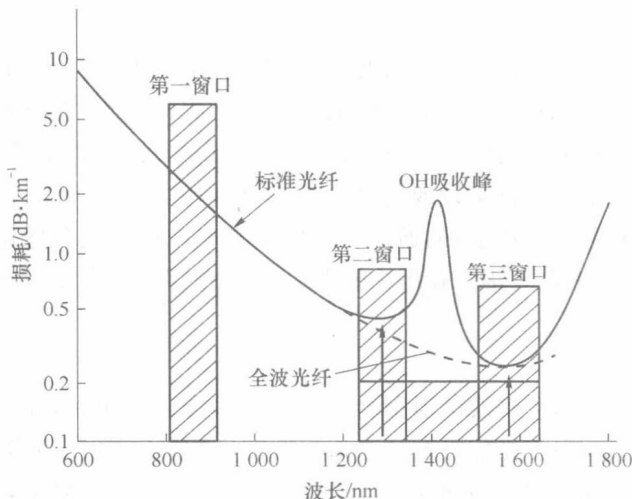


图 1.2.2 光纤损耗图谱