

POF POF POF POF POF

聚合物光纤

● 江源 邹宁宇 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

聚合物光纤

江 源 邹宁宇 编著

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心
·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

聚合物光纤/江源, 邹宁宇编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.6

ISBN 7-5025-3752-X

I. 聚… II. ①江…②邹… III. 高聚物-光导纤维-基本知识 IV. TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 014974 号

聚 合 物 光 纤

江 源 邹宁宇 编著

责任编辑: 夏叶清 白 洁

责任校对: 李 林

封面设计: 蒋艳君

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 19½ 字数 485 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3752-X/TQ·1512

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书为国内第一本关于聚合物光纤的专著。较为全面地综述了光纤传光特性及其分类和应用、聚合物光纤 POF 用材料及其要求,分析了各种聚合物光纤 POF 性能特征及其发展,并结合作者的工作经验阐述了聚合物光纤 POF 的制备工艺,着重叙述了聚合物光纤 POF 在照明、装潢、装饰、传感、传像和短距离数据传输中的应用,并在附录中收集了聚合物光纤 POF 缩写词索引。本书不仅具有较强的实用性,而且为聚合物光纤研究开发者提供详尽的 POF 背景资料。

本书可供从事光纤研究、光纤应用开发以及从事聚合物材料研究的大学教师、工程技术人员及大学生参考。

前言

20 世纪是信息革命兴起并席卷全球的时代，而光导纤维则是信息传递的载体，光导纤维的发明是信息时代来临的序曲之一。仅仅数十年前，有人提出将具有“寸烛之辉映照广厦”特征的光封闭、束缚在细如毛发的纤维之中让其按人们设定的方向传播，当时这一观点还被认为是无稽之谈，但几乎在转瞬之间，光导纤维便风靡世界，光纤通信网络已覆盖全球各处，纵横交错数百万公里，光导纤维对社会、经济和科技的影响将继续增加。

聚合物光导纤维 (POF) 是光导纤维家庭的重要成员，与多组分玻璃光纤和石英光纤相比，它具有大直径、重量轻、杰出的柔软性和优异的弯曲性能等，且易于加工，成本低。正是具有如上优点，聚合物光纤首先在工艺品、装饰装潢领域获得应用，并一鸣惊人，为世人瞩目。从用赤铁矿石块在崖石和洞穴中刻画的史前猎人到近代的艺术大师，无不呕心沥血追求生动的艺术形象，而采用 POF 制作的光纤工艺品，能够变幻形态和色彩，且更富有动感，栩栩如生。20 世纪 80 年代中期，中国始研制出 POF，南京玻璃纤维研究设计院是国内最早从事 POF 研究和制品开发的单位之一，其制作的 POF 艺术品伴随轻歌曼舞出现在中央电视台的春节晚会上，出现在南京玄武公园和夫子庙的灯展中，展现出热带森林、沙漠和深海奇观，展现出神话世界和民间故事，令人耳目一新，流连忘返，都引起阵阵轰动，被认为是汇集秦淮风月和钟山灵秀的作品，不论在南国，还是在冰城，或在东南亚还是南美洲，都受到热烈欢迎。

随着 POF 研究开发的不断进展，其应用领域不断扩充，现在 POF 在汽车、医疗、环境保护、建筑和光纤通信局域网等中都有用武之地，POF 冷光照明被认为代表未来照明装饰趋势，而用于光纤传感器和光疗的侧面发光 POF，更是 POF 独到的表现，可以预见，随着科学技术的进步，POF 在 21 世纪还有更加广阔的发展空间。

近 10 年来，作者翻译了近百篇有关 POF 的外文专利文献资料，并注重收集相关 POF 的中外文文献资料，经过 6 年的悉心整理，数易其稿，终成此书。为在本书中提供更多信息，把握 POF 发展方向，故对多种 POF 资料进行筛选，对一些新的观点和理论进行消化后再进行介绍，并顾及到本书的系统性和实用性。本书系统论述了 POF 用材料及其要求，详尽地分析了各种 POF 性能特征，并结合自己的工作经验阐述了 POF 的制备工艺，着重介绍了 POF 在照明、装潢、装饰、传感、传像和短距离数据传输中的应用，以使本书具有较强的实用性。作者倾尽心血、竭尽所知系统地介绍了 POF 并提供相关参考文献的目的，是为了给 POF 研究者提供较为详尽的 POF 背景资料，以期中国的 POF 水平也能迅速提高。数年前，中国 POF 的水平落后，归结主要原因是中国材料研制水平的落后，尤其是包括含氟在内的透明无定形聚合物材料研究开发水平不高，在国内缺乏用于 POF 的透明氟树脂，甚至至今为止国产的聚苯乙烯亦难以用于聚苯乙烯芯 POF 的生产，更谈不上新型透明无定形聚合材料的开发。中国 POF 的发展需要长期的系统规划，聚合物光纤 POF 研究应包括三方面：无定形透明聚合物的研究及其规模化生产，POF 制备工艺及其规模生产，POF 的应用开发。POF 作为聚合物光子学的一个分支，在如今光电子信息社会，将是一个重要的发展方向。

POF 是一种正在发展的新材料技术,其原料、工艺及其制品都在不断发展变化之中,POF 还可视为两种或多种组成的复合材料,具有复合材料的特点,可根据需要进行设计,成为结构-功能一体化的构件,并在使用过程中将多种因素进行优化。

在本书成稿之际我们欣喜地看到中科大、西安交大、上海交大、东南大学、中科院理化所和中科院感光化学所等单位已开展相关 POF 研究,尤其是开展了渐变折射率分布 POF 和功能 POF 研究,而且有单位已着手开展了纳米 POF、POF 光栅和聚合物波导的研究,他们作为中国最高 POF 研究水平的代表者,缩小了国内 POF 研究水平同国外的差异,而高技术含量的 POF 规模化生产及其推广应用,还需要许多人的努力。

10 年前,当作者涉及 POF 时,国内没有一本有介绍 POF 的书,甚至介绍 POF 的文章也不多见,现在国内已有许多论述 POF 的文章,而且将有一本系统介绍 POF 的书要公开出版了,这是我们的最大欣慰。

由于水平所限,虽殚心竭虑,错误和遗漏恐在所难免,而且对 POF 的论述难以全面,何况本书未论述聚合物波导和 POF 光栅等内容,本书期待您的指正。

在此还要感谢所有在撰写本书过程中曾帮助过作者的人,他们是中国科技大学的明海教授和张其锦教授,中科院长春光机所的谷艳琴,南京玻纤院的王志明、李泽财、凌根华、徒桂平、申兆红、孙利国、马永红、殷志东、徐明泉、刘晓辉、赵缓、王蓓以及王锦兰和王世新等人,在此谨致深切感谢,没有他们的帮助,本书是难以完成的。

邹宁宇 江源 于石城南京

2001 年 12 月 13 日

目 录

第 1 章 光纤概述	1
1.1 光纤通信发展背景	1
1.2 光纤用光源	1
1.3 通信光纤系统	2
第 2 章 光纤传光特性及其分类和应用	7
2.1 光纤的传光原理	7
2.2 光纤的传输损耗.....	11
2.3 POF 损耗分析	17
2.4 光纤的分类及其应用.....	25
参考文献	31
第 3 章 聚合物光纤用材料	33
3.1 概述.....	33
3.2 聚合物光纤对材料的要求.....	33
3.3 POF 用聚合物材料种类	41
参考文献	68
第 4 章 聚合物光纤	69
4.1 PS 芯 POF	69
4.2 低损耗聚合物光纤 (Low-Loss POF)	75
4.3 耐热聚合物光纤.....	85
4.4 渐变折射率聚合物光纤.....	96
4.5 侧面发光光纤	117
4.6 荧光 POF 和闪烁 POF	129
4.7 其他 POF	144
参考文献.....	152
第 5 章 聚合物光纤的制备工艺	156
5.1 棒拉法拉制 POF	156
5.2 涂覆法拉制 POF 工艺	160
5.3 共挤法拉制 POF 工艺.....	167
5.4 反应式挤出	173
5.5 POF 套塑工艺	182
5.6 变频器控制	199
5.7 彩色 PS 芯 POF 及其片材成型工艺	214
5.8 影响 PS 芯 POF 质量的因素	217
5.9 PS 芯 POF 拉丝操作章程	219
参考文献.....	224

第 6 章 聚合物光纤的应用..... 226

6.1 POF 在工艺品、广告灯箱和装饰装潢上的应用 227

6.2 POF 传光束的应用 239

6.3 POF 传感器的应用 258

6.4 POF 传象束和光纤面板的应用 270

6.5 侧面发光 POF 的应用 277

6.6 近距离数据传输的应用 286

参考文献..... 296

附录 POF 缩写词索引 298

第1章 光纤概述

光导纤维 (Light Guide Fiber 或 Optical Fiber) 是一种由介质材料制成的细丝状光波导, 而光波导是一种传导光功率的传输线, 光导纤维又称光学纤维, 简称光纤。光纤是传输光或光信号的媒质, 它是同通信紧密相连的。

1.1 光纤通信发展背景

在人类的发展历史上, 早期远距离快速通信的方式就是一种目视光通信, 即采用“烽火”或“狼烟”来传送报警等事先约定的信号, 我国的长城每隔 5km 左右就设置了一个烽火台, 这种通信方式持续了几千年。1791 年, 法国人 Chappe 发明了扬旗式通信机, 这也是一种目视通信方式, 可传递更多的内容, 它在欧洲境内盛行。直至 1835 年, Morse 发明了电报通信方式, 宣告了通信新时代——电信时代的到来。

1.2 光纤用光源

光源和光纤一样, 是光通信系统中最重要的组成部分之一。对于光纤通信来说, 要求光源要稳定, 在室温下能连续工作, 寿命长, 发光效率高, 耗电要小; 其尺寸和封装要便于和光纤相匹配; 光源所发出的光束的发散角要小, 要能和光纤的数值孔径相匹配, 这样才使光源所发出的光有效地注入光纤, 耦合效率才能高; 光源发出光的波长要正好在光纤损耗谱的低损耗区, 即在光纤的传输窗口附近; 光源的波长要尽量在光纤零色散点附近的低色散区, 光源的谱线要窄, 即 $\Delta\lambda$ 要小, 以便减小在传输过程中由于光纤色散引起的脉冲加宽; 光源应易进行调制, 以便加上需要传送的信息; 对于能直接调制的光源, 其时间响应要快, 以便进行高速调制; 光源输出光的波长还必须和光电探测器相匹配, 探测器在这样的波长上有较高的灵敏度和较小的噪声。

光通信系统中, 半导体发光二极管 (Light Emitting Diode, 即 LED)、半导体激光二极管 (Laser Diode, 即 LD), 以及钕固体激光器是三类最重要的光源。LD 更适合于做光通信光源, 因为 LD 比 LED 的输出谱线窄, 调制速率高, 光束发散角小。而 LED 便宜, 寿命长, 使用方便, 在中小容量和短距离光纤通信系统中仍广泛使用 LD。

物理学家爱因斯坦早在 1917 年就预言了受激发射过程必然存在; 1958 年, 美国的肖洛 (A.L.Schawlow) 和汤斯提出了制造光波受激发射放大器的具体设想和建议。1960 年美国休斯实验室 (Hughes Laboratories) T.H.Maiman (梅曼) 发明了第一只红宝石激光器, 其发射波长为 $0.6943\mu\text{m}$, 频率为 $5 \times 10^{14}\text{Hz}$, 是由一根插在螺旋气体放电氙闪光灯中的红宝石棒构成。红宝石棒是粉红色的圆柱形晶体, 棒的两个端面镀银, 作为反射镜, 激光器发射的激光是脉冲输出, 其谱线窄, 方向性好, 亮度高, 是频率和相位一致的相干光, 是一种理想的光载波, 激光器的出现推动了光纤通信的发展。同年美国研制出 He-Ne 激光器。

“激光”一词译自英语 “Laser”, 它是从 “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” 各词取第一个字母缩写而成的。激光具有普通光源所无法比拟的许多优点, 即高度的方向性、单色性、相干性、高亮度、超短脉冲和可调谐性等。

随着激光器的研制发展,各种工作物质、运转方式的激光器不断出现,按工作波段分,则可分为红外和远红外激光器、可见光激光器、紫外和真空紫外激光器;如果按运转方式分,则可分为连续激光器、脉冲激光器、超短脉冲激光器;按激光器工作物质分类,可分为固体激光器、气体激光器、染料激光器和半导体激光器。对于光纤通信而言,最重要的激光光源波长为 850nm (0.85 μ m)、1300nm 和 1550nm。

1.3 通信光纤系统

1.3.1 色散补偿

光导纤维进入 1980 年,其最重要的发展依旧在光纤通信上,光纤损耗和色散是限制中继距离和提高传输速率的两个主要因素。随着光纤通信系统朝高速度和大容量方向发展,色散成为限制光纤通信的关键因素,为优化控制光纤色散,就出现了多种单模通信光纤。第一代单模通信光纤,其零色散波长为 1.31 μ m;随着工作在 1.55 μ m EDFA 的广泛应用,出现了零色散波长为 1.55 μ m 的第二代单模通信光纤——色散位移光纤(DSF);第三代单模通信光纤为非零色散位移光纤(NZDF),它是应高速 WDM 系统要求产生的;第四代单模通信光纤为大负色散的色散补偿光纤,其目的是补偿常规光纤的色散。色散补偿技术可有效地减弱光脉冲展宽和畸变引起的码间干扰,增大传输距离,这包括相位共轭技术、自相位调制技术、负色散光纤补偿技术、线性啁啾光栅法、消啁啾技术、光源预啁啾技术、色散支持技术和色散均衡器技术,其中色散均衡器包括啁啾光纤布拉格光栅(Linearly Chirped Fiber Bragg Grating,简称 LCFBG)和法布里佩罗腔(Fabry-Perot)色散均衡器,前者光栅啁啾必须精确设计以得到预期频率响应,而后者色散补偿范围大,插入损耗低,对系统链路影响小,既可前置补偿,又能用于后置补偿,而且有应用于波分复用的良好前景。相比而言,色散补偿光纤(Dispersion Compensating Fiber,简称 DCF)色散补偿能力低,损耗大,非线性强,偏振模色散(Polarisation Mode Dispersion,简称 PMD)大。

低色散光纤和系统色散补偿技术日益完善,在小容量、低速率、短距离的光纤通信系统中 PMD 的负面影响微不足道,但在高速光纤传输系统中,光纤 PMD 就成为限制高速传输速率和已有的光纤通信系统升级的主要因素。

产生 PMD 的因素包括内在和外在因素,其中内在因素是光纤制造过程中产生的纤芯或包层不对称性玻璃表面应力;外在因素是外部应力、弯曲和扭曲因素。这些因素结合在一起引起了双折射和模耦合,从而产生 PMD,这是由于光纤不是一个理想的圆柱体,在单模光纤传输过程中,光波的基模有两个相互垂直的偏振态,理想的光纤几何尺寸是均匀的,且没有应力,因而光波在这两个相互垂直偏振态中以完全相同的速度传播,在光纤的另一端没有任何延迟,但在实际的光纤中,两个相互垂直的偏振模到达单位长度光纤的另一端有一定的时间差,其值为 PMD,单位为 ps/km^{0.5},PMD 在数字系统中的负面效应造成脉冲展宽,且随着传输速率的增加,PMD 的影响将更加严重。

PMD 系数与系统的传输速率和传输距离有一定的关系,若 PMD 系数越小,系统受限的传输距离越长,如 PMD 系数为 0.1ps/km^{0.5}时,传输速率为 2.5Gb/s 的传输距离为 160000km;传输速率为 10Gb/s 的传输距离为 10000km;传输速率为 40Gb/s 的传输距离则为 625km,PMD 系数限制系统的最大传输距离的理论计算公式为:

$$L = \frac{10000}{PMD^2 \times B^2}$$

式中 PMD 为平均 PMD 系数; B 为系统传输速率, Gb/s 。

因此降低光纤通信系统的 PMD 源头在于单模光纤本身, 即要求精确控制光纤生产工艺过程。通过原料提纯、预制棒制备、拉丝可制得的几何尺寸优异的光纤, 单模光纤几何尺寸越小, 单模光纤的 PMD 值可以越小 ($<0.1ps/km^{0.5}$)。

光纤通信系统 PMD 的补偿方法是减小 PMD 的被动方式, 其主要用于现有的光缆线路的升级。 PMD 补偿工作原理可分为两种: 分布平衡器法和自动补偿法。前者是利用 PMD 的统计性质, 用若干个平衡器每个引入一个小的差分群时延对系统的 PMD 进行最合理的补偿; 后者是将信号分解到光纤输出端主偏振态的两个相互垂直方向, 然后对这两个方向的信号进行补偿, 最后合波输出。

啁啾光纤光栅具有插入损耗小、与偏振光无关、光源易于制造、参数易于调节、不受光纤非线性影响且体积小等优点, 并且它可改善光纤放大器增益平坦度, 故线性啁啾光纤光栅被认为是最有前途的色散补偿方案之一, 并且在光通信领域中有多种用途, 是一种重要的无光源器件。连续啁啾光纤光栅的制备方法包括直接横向侧面曝光法、弯曲法、锥形光纤纵向应力法和锥形光纤法; 阶跃啁啾光纤光栅的制作方法主要有直接相位掩膜法、在线应力释放法、透镜调节法和超长啁啾光纤光栅制备法, 啁啾光纤光栅可广泛应用于各种高速光纤通信系统中。

1.3.2 光纤放大器

石英系的光纤系统有将近 $500nm$ 的低损耗窗口 (从 $1200nm$ 到 $1700nm$), 它们都是潜在的通信资源带宽, 不同的波段可以通过不同的光纤放大器对光信号进行放大。在光通信中使用的最为广泛的光放大器, 主要有以下主要几种: 掺稀土元素的光纤放大器, 半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, 简称 SOA), 光纤拉曼放大器 FRA, 掺稀土元素的光波导放大器。

目前已有工作在 $1.3\mu m$ 的掺镨光纤放大器 (Praseodymium-Doped Fiber Amplifier, PDFA), 工作在 $1.46\mu m$ 的掺铥光纤放大器 (Thulium-Doped Fiber Amplifier, 简称 TDFA), 工作在 $1.55\mu m$ 的掺铒光纤放大器 (EDFA) 和工作在 $1.65\mu m$ 的包层掺铽的掺铥光纤放大器 (TDFA-Tb) 等, 且又有许多研究集中在拉曼 (Raman) 光纤放大器上, 因为它几乎可以工作在所有波段上。

1989 年掺铒光纤放大器 EDFA 研制成功, 20 世纪 90 年代初 EDFA 实用化, 1994 年首次在海底传输光缆中应用, EDFA 是 20 世纪 80~90 年代光电子技术的一项重要突破; EDFA 具有在 $1.55\mu m$ 波长处提供 $30nm$ 左右平坦信号增益带宽的特点, 它具有高增益、低噪声、宽带宽、对偏振不敏感以及 EDFA 放大区域正好对应于光纤最小损耗窗口 $1.55\mu m$ 等优点, 它具有大的光增益使得在光传输系统中的无中继传输距离超过 $100km$, 且具有大的带宽和增益动态很慢的特性, 使得多个光通道同时复用一个 EDFA 时没有明显的串扰, 几个高速的光通道波长可同时传输, 在光网络技术中, EDFA 的出现使得光网络的容量、可靠性和透明性等性能得到改善而其经济性也有巨大的提高。改善了 $1.55\mu m$ 的光纤通信系统传输距离受光纤损耗限制的局面, 这是光纤通信发展的里程碑。EDFA 现已具备输出功率大, 体积小, 功耗小特性, 将逐步取代传统的光-电-光中继模式, 已成为光纤通信系统的关键器件, 它是由光学增益模块和控制电路组成的, 其发展方向是扩展其增益平坦带宽, 从目前的 $1546\sim1565nm$ 扩展到整个 C 波段的 $1528\sim1565nm$, 直至扩展到 L 波段 ($1570\sim1600nm$), 以满足密集波分复用 DWDM 系统的要求, 现在最新的宽带 WEDFA 已满足这一要求, 提高

泵激光功率, 以克服 EDFA 输出功率的限制。

1999 年光纤拉曼放大器 FRA 成功应用于 DWDM 传输系统, 就立刻受到广泛的关注, 成为继掺铒光纤放大器之后的新型光纤放大器。拉曼光纤放大器的放大机制和 EDFA 及半导体光放大器不同, EDFA 利用掺铒光纤中铒离子的能级间跃迁过程实现光放大, 而拉曼光纤放大器 FRA 则利用光纤的非线性散射获取增益。

拉曼光纤放大器就是利用强泵浦激光通过光纤传输所产生的受激拉曼散射来获得增益, 拉曼光纤放大器可在不掺杂的石英光纤中实现对信号光的增益, 受激拉曼散射的过程实际上是泵浦光将能量通过介质的分子振动转移给信号光的非线性过程。

1928 年, Chandrasekhara Raman 爵士发现在许多非线性光学介质中, 高能量 (波长较短) 的泵浦光散射, 将一小部分入射功率转移到另一频率下移的光束, 频率下移量由介质的振动模式决定, 此过程称为拉曼效应。石英光纤具有很宽的受激拉曼散射 SRS 增益谱, 并在 13THz 附近有一较宽的主峰, 如果一个弱信号与一强泵浦光波同时在光纤中传输, 并使弱信号波长置于泵浦光的拉曼增益带宽内, 弱信号光即可得到放大, 这种基于受激拉曼散射机制的光放大器即称为光纤拉曼放大器 FRA。

FRA 由于其自身固有的全波段可放大特性和可利用传输光纤进行在线放大, 这些优点及其作为分立式放大器使用时所具有的超宽带特性使其在近几年内获得了广泛的研究和应用。FRA 具有三大特点: 其一为 FRA 增益波长由泵浦光波长决定, 只要泵浦源的波长适当, 理论上可得到任意波长的信号放大, 使 FRA 可以放大 EDFA 所不能放大的波段, 使用多个泵源还可得到比 EDFA 宽得多的增益带宽, 对开发光纤整个低损耗区 1270~1670nm 具有无可替代的作用; 其二为 FRA 增益介质为传输光纤本身, 适用于长距离的无中继传输和远程泵浦, 尤其适用于海底光缆通信等不方便设立中继器的场合, 而且因为放大是沿光纤分布而不是集中作用, 光纤中各处的信号光功率都比较小, 从而可降低非线性效应尤其是四波混频 (FWM) 效应的干扰; 其三为 FRA 噪声指数低, 与常规 EDFA 同时使用时可大大降低系统噪声指数, 增加传输距离。

半导体光放大器 SOA 的工作原理和 EDFA 很相像, 都由激活介质组成, 该介质的载流子反转到激发态, 所以它能使外输入光场产生受激辐射而产生相干增益。离子数的反转是从泵浦源吸收能量而实现的, 而半导体光放大器 (SOA) 则由电能进行泵浦 (电激励), 注入电流使介质产生载流子数反转, 将电子从价带激发到导带, 外光场 (信号光) 出现时, 则有可能发生受激辐射, 从而产生光增益, 由于其采用的制造工艺为微电子工艺, 特别适合未来进行光电子的集成, 还具有放大波长域较宽特性。

掺铒波导放大器 EDWA 是一种基于集成光波导技术结合 EDFA 技术而成的光放大器。它采用微电子技术, 将高浓度的铒离子注入到光波导中, 利用和 EDFA 相同的原理实现对信号光的放大作用, 其主要特点是小型化和低成本, 在很短的光通道内即可得到所需的增益。

1.3.3 光纤预制棒的制备

在通信光纤制备过程中, 重要内容之一是光纤预制棒的制备, 目前光纤芯预制棒制备技术四种工艺共存, 这四种工艺为外汽相沉积法 (OVD)、汽相轴向沉积法 (VAD)、改进汽相沉积法 (MCVD) 和等离子体化学汽相沉积工艺 (PCVD)。光纤芯棒的光学特性主要取决于芯棒制造技术, 而光纤预制棒的成本取决于外包层技术, 现今光纤外包层制造技术包括套管法、阿尔卡特 (Alcatel) 公司发明的等离子喷涂法 (Plasma Spray)、火焰水解法

(SOOT) 和美国朗讯科技公司发明的溶胶-凝胶法 (Sol-gel 法), 其中 SOOT 法是泛指 OVD 和 VAD 等火焰水解外沉积工艺。

而 MCVD 法现采用外沉积技术取代套管法制作大预制棒, 形成 MCVD 外沉积工艺相结合的混合工艺, 从而改变了传统 MCVD 工艺沉积速度低, 几何尺寸精度差的缺点, 降低了生产成本, 提高了预制棒的质量。现又开发了低成本大尺寸的套管工艺, 套管制备工艺为 Sol-gel 和 OVD 法。

预制棒制备工艺 OVD 法近 20 年来已从单喷灯沉积发展到多喷灯同时沉积, 沉积速率成倍增加, 并实现一台设备同时沉积多根棒, 并且从依次沉积芯包层制成预制棒的一步法发展到二步法, 即先制备出大直径的芯棒, 再拉制成多根小直径芯棒或不拉细, 然后采用外包层技术制备出光纤预制棒, 提高了生产效率, 降低了生产成本。并且, MCVD 法尤其是 PCVD 法比 OVD 和 VAD 法更易精确控制芯棒的径向折射率分布, 因而对于制备多模光纤 MMF 和非零色散光纤 DZDF 芯预制棒更有效。

近 20 年来, 光纤预制棒外包层技术已有许多发展, 1980 年初开始用套管法制备光纤预制棒, 从而光纤预制棒制造工艺实现从一步法到二步法的转变, 美国 CORNING 公司首先将 SOOT 外包技术代替了套管法应用于工业生产。1990 年, 阿尔卡特 Alcatel 等离子喷涂技术及美国朗讯公司开发了 Sol-gel 外包技术替代了套管技术, 因而采用套管法制备光纤预制棒工艺的发展受到制约, 其重要原因是套管法合成石英管的成本高, 现在几乎所有 OVD 和 VAD 制造光纤芯棒的生产厂家都采用 SOOT 外包技术。

1.3.4 光纤通信技术

在光纤通信领域中, 出现了许多通信新技术, 如波分复用 WDM 技术、相干光通信技术、密集波分复用 DWDM 技术、光时分复用 (Optical Time Division Multiplexing, 简称 OTDM) 技术、全光光纤通信技术和光孤子传输技术等。20 世纪 80 年代末期, 国际上开始设想使用 WDM 技术, WDM 技术是充分利用光纤的传输带宽, 在一根光纤中同时传输多个光波信号, 可以实现光纤通信系统的大幅度扩容和多种信号的传输, 它是实现光交叉连接和全光网络的关键技术, 它使系统易于升级和兼容, 解决了电子器件限制系统扩容的电子瓶颈问题。WDM 技术朝着多信道发展, 信道数达十几路甚至几十路, 信道波长 (频率间隔) 越来越接近, 成为现在研究焦点。在 WDM 传输系统中, 若在多个波长上传输信号, 就必须增加光的峰值强度, 但光纤内光峰值强度的增加会产生明显的非线性效应, 光的非线性效应的增加严重制约了光纤的传输性, 控制非线性效应的方法之一是增大光纤的有效面积降低光纤内光的峰值强度, 光纤技术的最新进展已使得石英光纤在 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ 的两个低损耗窗口打通并连成一个区域, 未来的 WDM 将在 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 的全波窗口中进行。1996~1998 年发展的密集波分复用 DWDM 技术主要用于长途传输系统, 它可充分利用光纤低损耗宽带宽特性, 其主要目标是增加光纤通信传输容量和传输距离, DWDM 系统正在向城域网发展, 在不远的将来还可向接入网发展, 并最终出现传输速率为 Tb/s 级的 DWDM 系统。光时分复用 OTDM 技术是以光领域的超高速信号处理技术为基础, 当信号传输速率超过 10 Gb/s 时, 避免高速电子器件和半导体激光器直接调制能力的限制, 可实现数十 Gb/s 及至 100Gb/s 的超高速传输, 它是用多个电信道信号调制成具有同一个光频的不同光信道, 经复用后在同一根光纤传输的传输扩容技术, 它使用宽带光电器件代替高速电子器件, 因而避免电子器件造成的瓶颈效应, 电的时分复用技术 (Time Division Multiplex, 简称 TDM) 运行速率以 10Gb/s 为极限, OTMD 是光纤通信系统实现超大容量、超高比特率传输的一个有效途径,

OTDM 与 WDM 相结合可满足将来大容量宽带业务的要求,是将来网络发展的方向,是走向全光通信网和实现“信息高速公路”的有效技术途径。同时为适应大容量光纤通信和超高速光电子测试系统,结构设计和工艺技术的改进已经使光探测器取得了极大进步。

20 世纪 70 年代开始应用第一代光纤通信系统,其光纤传输波长为 $0.85\mu\text{m}$,其光纤为多模石英光纤,光源采用 AlGaAs 半导体激光器或发光二极管,无中继传输距离为 10km,光纤损耗为 $2.5\sim 4\text{dB/km}$ 。至 80 年代中期,第二代光纤通信系统投入使用,光纤通信从多模光纤向单模光纤发展,波长从 $0.85\mu\text{m}$ 发展至 $1.3\mu\text{m}$,所用传输波长为 $1.3\mu\text{m}$,这是多模石英光纤的第二个低损耗窗口,有较低的损耗且有最低的色散,选用 InGaAsP 激光二极管和 Ge 光电探测器,无中继传输距离为 50km。80 年代中期研制成功第三代光通信系统,80 年代后期至 1990 年初开始使用第三代 $1.3\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统,无中继传输距离为 100km 或更长。第四代光纤通信系统是从 1990 年初开始使用的,其传输波长为 $1.55\mu\text{m}$,传输速率已达 10Gb/s ,这一系统已大量用于中距离和长距离干线中,可实现 300km 无中继站传输;1990 年以来,随着光纤通信技术的迅速发展,许多学者提出了“全光网络”的概念,其本意是信号以光的形式穿过整个网络,直接在光域内进行信号的传输、再生和交换/选路,中间不经过任何光电转换,以达到全光透明性,实现有任意时间、任意地点和传送任意格式信号的理想目标,现今光纤通信正朝着大容量、高速率和长距离方向发展。

第 2 章 光纤传光特性及其分类和应用

2.1 光纤的传光原理

2.1.1 光的基础知识

光是通过光源内大量的分子或原子振动而产生的辐射。

1894 年，麦克斯韦从理论上指出，光是一种电磁波。1905 年爱因斯坦提出光是一粒一粒的粒子流，每个粒子可被称为光子。也就是说光既具有粒子性，又具有波动性，光在传播时表现为波动性，而与物质作用时又表现为粒子性。通常我们所说的光是电磁波的一种，它通常由紫外光、可见光和近红外光组成，其中 1~390nm 波段的光为紫外光，波长为 280~300nm 波段为 UV-B，它可以杀死或严重损伤地球上的生物；200~280μm 波段为 UV-C，它可以杀死地球上一切生物，包括人类；390~760nm 波段的光为可见光；波长在 760~1500nm 为近红外光，中红外波段波长范围为 1.5~25μm，远红外光谱波长范围 25~300μm。比紫外光频率更高的还有 X 光和 γ 射线等，比远红外光频率更小或波长更长的有毫米波、微波和短波等。而可见光又是由七色光组成的，即可见光含有红色光、橙色光、黄色光、绿色光、蓝色光和靛青光等色光^[1]，其对应波长范围见表 2-1。

表 2-1 可见光组成/nm

紫 色	靛 青	蓝 色	绿 色	黄 色	橙 色	红 色
390~430	430~450	450~500	500~570	570~600	600~630	630~760

光在真空中的传播速度 c 为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，光的传输波长 λ ，频率 f 和光速 c 之间关系参见如下公式：

$$c = f\lambda$$

式中 f 的单位为赫兹 (Hz) 或 1/秒 (1/s)，波长的单位为米 (m)。

只有真空的折射率 n 为 1.0，故光在任一传输介质的传播速度 V 是光速除以该介质的折射率，即：

$$V = \frac{c}{n}$$

光在真空中的传播速度是最快的，传输介质不同，其折射率不同，传光速度也不同。相对而言，折射率大的传输介质是光密介质，折射率小的传输介质是光疏介质，对于光导纤维而言，芯材为光密介质，皮材为光疏介质，光在芯材中的传输速度慢于皮材中的传输速度。

光在均匀媒质或不均匀媒质中传输时，满足费玛 (Fermat) 原理，即光从空间一点到另一点是沿着时间为极值的路程而传播的，即光沿着光程为最小或最大或恒量的路径传播。

2.1.2 几何光学

要了解光导纤维的传光原理，必须从几何光学开始。

光学分为几何光学和物理光学，几何光学是研究光在均匀介质中的传播特性，通常采用直线来描述，它是研究光在介质中传播的基础光学理论。几何光学理论的四大基本定律

如下。

① 光的直线传播定律：在各向同性的均匀介质中，光是沿直线传播的。

② 光的独立传播定律：不同光源发出的光线从不同方向通过某点时，彼此不影响，各光线的传播不受其他光线影响。

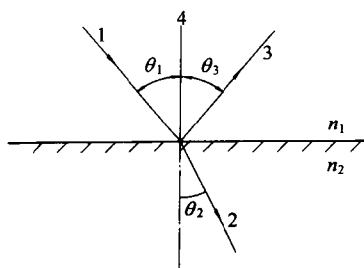


图 2-1 光的反射折射示意图

1—入射光线；2—折射光线；
3—反射光线；4—法线

③ 光的反射定律：当一束光投射到某一介质光滑表面时，保存一部分光反射回原来的介质，这一光线称为反射光线，反射光线、入射光线和法线位于同一平面内，入射光线同法线组成的角称为入射角，反射光线同法线组成的角称为反射角，反射角等于入射角，其绝对值相等，这就是反射定律，其示意图见图 2-1。

④ 光的折射定律：当一束光投射到某一介质光滑表面时除了有一部分光发生反射外，还有一部分光通过介质分界面入射进第二传输介质中，这一入射光线称为折射光线，折射光线和入射光线分别位于法线的两侧，折射光线位于入射光线和法线所决定的平面内。折射光线同法线组成的角称为折射角，入射角的正弦值同折射角正弦值的比值为一恒定值，这就是折射定律，其表示式如下：

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

式中 θ_1 、 θ_2 分别为入射角和折射角； n_1 为第一介质的折射率； n_2 为第二介质的折射率； n_{21} 为相对折射率。

需要指出的是采用几何光学分析光在某一研究对象中的传输特性时，这一研究对象的几何尺寸必须远远大于所传输的光波长，这样才能忽略波长的长度，否则就必须采用物理光学分析光在研究对象中的传输特性。也即是光纤纤芯直径是所传播光波长的几十倍或几百倍时，其传播现象就可用几何光学而不用波动光学来研究。

物理光学又分为波动光学和量子光学。波动光学认为光是一种电磁波，但它不能解释光的微观现象。量子理论认为光的能量不是连续分布的，光是一粒粒运动着的光子组成，每个光子具有确定的能量。

2.1.3 子午光线在阶跃型光纤中的传输

子午平面指的是包含有光纤轴的平面，所谓子午线，就是光线的传播路径始终在同一平面内，子午光线总是和光纤轴相交的。光在一种均匀介质中传播时是一种直线式传播：当光从一种介质传至另一介质表面时，一般同时发生反射和折射；如果光从折射率小的光疏介质射入折射率大的光密介质时，则折射角小于入射角；而当光从光密介质射入光疏介质时折射角将大于入射角，因而当光从光密介质射入光疏介质时就有可能出现只有反射而无折射的现象，这就是全反射。光导纤维就是通过全反射原理进行光传输的，其示意图如图 2-2。

其中所分析的光线为子午线，对于圆柱形阶跃型光纤，这一平面为含有圆柱体中心轴线的子午面。

由折射定律公式可得出：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

式中 n_1 、 n_2 分别为芯、皮折射率； θ_1 、 θ_2 分别为入射角和折射角。设发生全反射的临界角为 θ_m ，此时 $\theta_2 = 90^\circ$ ，故而

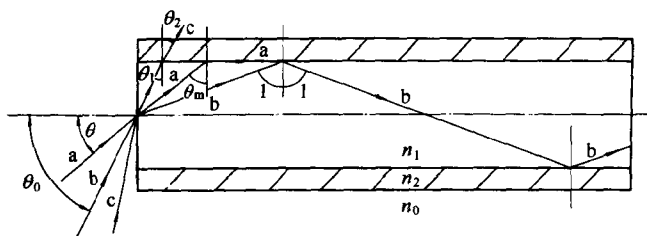


图 2-2 光纤全反射原理示意图

$$\sin \theta_m = \frac{n_2}{n_1}$$

即：

$$\theta_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

当入射角 $\theta_1 > \theta_m$ 时，则光在芯皮界面上发生全反射，而当入射角 $\theta_1 < \theta_m$ 时，则光在芯皮表面上出现折射，有一部分光从芯材泄漏至皮层外。

由全反射临界角同样可推出光纤截面临界入射角 θ_0 ，在空气和光纤截面界面上，同样有：

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin(90^\circ - \theta_m) = n_1 \cos \theta_m = n_1 \cos \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

其中， n_0 为空气折射率，设定其值同于真空折射率值 1.0 即 $n_0 = 1.0$ ，因而

$$\sin \theta_0 = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

即外界光入射角 θ 小于 θ_0 时，光线才能在光纤中以全反射的形式向前传播，从光纤一端传至光纤另一端，所以，光纤临界接受角为：

$$2\theta_0 = 2\arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

光纤数值孔径：

$$NA = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

光纤数值孔径是光纤重要指标之一，NA 值越大，则 θ_0 越大，光纤临界入射角越大，则光纤端面接受光或发射光角度越大，光纤的集光能力愈强，愈便于光纤同光纤的连接或同光源的耦合。

2.1.4 子午线在阶跃型光纤中的几何行程和反射次数^[3]

由于子午光线入射光纤中并不是同一角度，故而在光纤中的几何行程也不相同。如图 2-3 所示。

由折射定律可以得出：

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \varphi$$

式中 n_0 、 n_1 和 n_2 分别为空气、光纤芯材和皮材的折射率，其中 $n_0 = 1$ ； θ_0 、 φ 分别为光纤端面入射角及其折射角。由图 2-3 可以得出：

$$\sin \varphi = \frac{\sqrt{OB^2 - OA^2}}{OB} = \sqrt{1 - \frac{OA^2}{OB^2}}$$

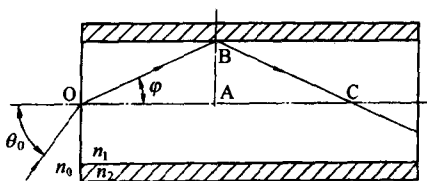


图 2-3 子午线在阶跃型光纤中的几何行程示意图