

“十一五”国家重点图书出版规划项目

光电技术与系统精品丛书

光纤与光缆技术

Fiber Optic and Fiber Cable

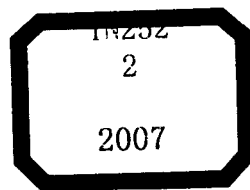
• • Techniques

胡先志 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



“十一五”国家重点图书出版规划项目
光电技术与系统精品丛书

光纤与光缆技术

胡先志 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统而全面地介绍了光纤与光缆的发展、制造、性能测量、光缆安装施工和线路维护等应用技术。

本书的特点是：一、内容新颖。书中所介绍的光纤与光缆的设计、制造、材料选择、品种特点、性能测量方法等内容都是取材于国内外光纤与光缆制造技术及其工程应用的最新研究成果和有关光纤与光缆性能测量或试验方法的最新版本；二、重点突出。书中在对光纤与光缆材料、制造方法、性能特性测量方法阐述时，重点介绍基本概念、关键技术、性能测量原理和工程应用实用技术；三、目的明确。使阅读此书的读者能对光纤与光缆的设计、制造、材料选择、品种特点、性能及工程应用技术有所了解和掌握。

本书可供从事光纤通信领域的科研、生产、施工、维护等方面工作的技术人员参考使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

光纤与光缆技术/胡先志编著. —北京：电子工业出版社，2007.1

（光电技术与系统精品丛书）

ISBN 7-121-03591-X

I. 光… II. 胡… III. ①光学纤维—手册 ②光缆—手册 IV. ①TN252-6 ②TN818-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 146538 号

责任编辑：王春宁

印 刷：北京市李史山胶印厂

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：22.75 字数：550 千字 插页：2

印 次：2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系电话：（010）68279077；邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

中发桥

国展标

光的纽带和
电子业

王火所

发展光电技术
造福祖国人民

周炳琨

丛 书 编 委 会

名誉顾问

王大珩 中国科学院院士、中国工程院院士，中国科学院研究员

主 任

张以谟 天津大学教授

委 员 (排名不分先后)

母国光 中国科学院院士，南开大学教授

王启明 中国科学院院士，中国科学院研究员

金国藩 中国工程院院士，清华大学教授

周立伟 中国工程院院士，北京理工大学教授

黄尚廉 中国工程院院士，重庆大学教授

叶声华 中国工程院院士，天津大学教授

倪国强 北京理工大学教授

宋菲君 中国科学院研究员

秘 书 长

丁伯瑜 中国光学学会副秘书长，北京理工大学教授

联络委员

许 楷 电子工业出版社策划编辑

王春宁 电子工业出版社高级策划编辑

前 言

正是光纤、光纤放大器、波分复用技术的发明,推动了光纤通信技术向着高速率、大容量、远距离的方向发展。今天,在实验室中所达到的最高传输容量的世界记录是 10.9 Tb/s ($42.7 \text{ Gb/s} \times 256$),无电中继传输了 300 km。新光纤、新器件和新传输系统等新的光纤通信技术不断问世,必将使得光纤通信发生一场又一场新的革命,其主要标志是在核心网上朝着通信超长距离、超大容量、超高速率的方向发展,即在 2006 年底有望实现 100 Tb/s 的传输容量。针对城市中的多业务、多效率和大容量的宽带数据传输特点,在城域网上要一定具备能够提供各种宽带数据、视频、音频业务能力。接入网则是力求使宽带业务能够以价格便宜、接入快捷引入到家庭和桌面,即真正实现光纤到家庭和光纤到桌面的目的。

今天,由光纤传输网络、个人计算机、手机、电视机等终端设备共同构成的信息产业实体日益普及并迅猛发展,大大地刺激了用户对语音、数据、视像等综合业务的发展。正是人们对综合业务信息需求量的与日俱增,从而推进核心网、城域网、接入网、局域网的网络光缆链路的建立和互连,以完成人们对各种信息的需求和交换。

随着各种网络蓬勃发展,促进了作为网络传输介质的光纤、光缆的产业腾飞。随之而来的是光纤的品种更新、光缆结构多样、施工便利,以满足各种网络发展的实际需要,进而又使光纤、光缆的应用场所越来越广泛,敷设量越来越大。

面对 21 世纪光纤、光缆产业所逢盛世,如何借助科学方法合理设计光纤、光缆结构和性能,精心制造光纤、光缆产品,正确测量光纤、光缆特性,仪器与装置,如何运用科学的测量方法来确保光纤、光缆产品自身性能的良好,怎样正确验证光缆工程质量优劣和监督光缆链路运行正常与否,这些正是本书着重解决的问题。

鉴于近二、三年光纤通信技术的飞速发展,光纤通信系统的传输容量和传输距离的记录不断刷新,优异性能的光器件层出不穷,进而大大缩短了光纤、光缆的性能和品种更新周期。特别是进入到 21 世纪,国际标准组织,如 IEC 和 ITU—T 等接二连三颁布最新版本的光纤、光缆的性能要求、品种分类和测量方法的标准。为了及时掌握国际光纤、光缆的技术发展动态,国内应该积极出版一本内容新颖、实用性强的光纤、光缆工程应用专著来满足从事光纤、光缆科研、生产和光缆施工、维护的人员的工作需要。

本书作者以自己多年从事光纤、光缆研究工作亲身的经验和国际电工委员会(IEC)、国际电信联盟(ITU—T)、国家标准(GB/T)和通信行业标准(YD/T)等有关光纤、光缆的性能要求、品种分类测量和工程应用规范的最新版本为依据,同时,在大量阅读了介绍光纤、光缆的技术领域中的最新成果的书刊文献的基础上,再总结我们的工作实践经验,结合我国国情,编著此书。力求做到内容新颖、技术先进、实用方便。本书全面地介绍了光纤、光缆

特性的发展历史、基本概念、材料限制、制造技术、性能测量方法，以及光缆工程竣工验收、线路维护等内容。

作者在本书的编写过程中引用了赵梓森院士、刘有信教授、陈永诗教授、唐仁杰教授、罗杰博士、刘泽恒教授、邓都才教授等专家的研究成果，也参考了一些最新出版的图书、期刊和国内外最新标准；从而使本书的内容能够充分反映出光纤、光缆技术及其工程应用的当今水平。罗杰博士为本书第2章光纤设计提供了部分书稿，刘泽恒教授就全书的整体结构和第8章光纤机械性能提出了一些宝贵的修改意见，在此向他们表示衷心的感谢。

作者在本书编写过程中参考借鉴了国内外不少同行的相关著述，在此向他们表示真诚的感谢。对于有关专家的研究成果，作者已在书末的参考文献中做了一一列举，但难免有遗漏之处，还请他们多加谅解。

由于本书涉及光纤、光缆产业中材料选择、产品制造、性能测量及工程应用等各个方面的技术问题，书中内容广泛且技术新颖，加之作者专业水平有限，书中难免出现一些谬误和不足，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 光纤通信技术的发展历程	(1)
1.1.1 光纤通信概念	(1)
1.1.2 光纤通信重大成果	(1)
1.2 光纤品种的演进	(6)
1.2.1 多模光纤	(6)
1.2.2 单模光纤	(7)
1.2.3 光纤的研究方向	(11)
1.3 光缆结构的演变	(12)
1.3.1 结构设计	(12)
1.3.2 室外光缆结构	(13)
1.3.3 光纤到户光缆	(14)
1.3.4 室内光缆结构	(16)
1.3.5 光缆的研究方向	(17)
参考文献	(18)
第 2 章 光纤设计	(19)
2.1 光纤的光传输理论	(19)
2.1.1 多模光纤的几何光学传输理论	(19)
2.1.2 单模光纤的电磁场传输理论	(21)
2.2 光纤设计理论	(23)
2.2.1 设计原则	(23)
2.2.2 设计基础理论	(24)
2.3 光纤设计实例	(35)
2.3.1 光纤折射率径向分布分析	(35)
2.3.2 多模光纤折射率分布	(38)
2.3.3 单模光纤折射率分布	(42)
参考文献	(53)

第 3 章 光纤原材料	(54)
3.1 选择原则	(54)
3.2 材料分类	(56)
3.3 光纤原材料	(57)
3.3.1 石英玻璃原材料	(57)
3.3.2 石英玻璃	(60)
3.3.3 塑料	(64)
3.3.4 光子晶体光纤材料	(66)
3.3.5 掺杂稀土元素材料	(68)
3.3.6 光纤预涂覆材料	(70)
3.3.7 光纤着色涂料	(71)
3.3.8 气体	(71)
3.4 材料对光纤传输特性的影响	(73)
3.4.1 材料对光纤衰减的影响	(73)
3.4.2 折射率	(77)
3.4.3 材料的线性热膨胀系数	(79)
参考文献	(80)
第 4 章 光纤制造工艺	(81)
4.1 工艺方法分类	(81)
4.2 气相沉积工艺	(82)
4.2.1 芯棒技术	(82)
4.2.2 外包层工艺	(102)
4.3 非气相技术	(105)
4.3.1 直接熔融法	(106)
4.3.2 界面凝胶法	(106)
4.3.3 机械挤塑法	(106)
4.3.4 管束拉丝和打孔拉丝法	(107)
4.3.5 高速离心扩散法	(108)
4.4 光纤拉丝	(108)
4.4.1 光纤拉制工艺	(108)
4.4.2 光纤成型机理	(109)
4.4.3 光纤拉制工艺过程	(110)
4.4.4 拉丝过程对光纤性能的影响	(113)

参考文献	(117)
第5章 光纤类型	(118)
5.1 光纤分类	(118)
5.2 光纤种类	(120)
5.2.1 多模光纤	(120)
5.2.2 单模光纤	(125)
5.3 光纤选择建议	(144)
5.4 光纤的发展趋势	(146)
参考文献	(148)
第6章 光纤传输性能	(150)
6.1 研究目的	(150)
6.2 传输理论	(150)
6.3 测量	(151)
6.3.1 几何尺寸特性	(151)
6.3.2 模场直径	(156)
6.3.3 截止波长	(164)
6.3.4 衰减	(170)
6.3.5 色散	(191)
6.3.6 偏振模色散	(202)
6.3.7 非线性效应	(213)
参考文献	(219)
第7章 光纤机械性能	(220)
7.1 研究目的	(220)
7.2 断裂机理	(221)
7.3 测量	(224)
7.3.1 光纤筛选	(224)
7.3.2 光纤抗拉强度	(227)
7.3.3 疲劳参数	(228)
7.3.4 涂覆层可剥性	(232)
7.3.5 光纤翘曲	(234)
参考文献	(238)

第 8 章 光纤环境性能	(239)
8.1 研究目的	(239)
8.2 作用机理	(239)
8.3 测量	(240)
8.3.1 温度循环	(240)
8.3.2 温度时延漂移	(241)
8.3.3 浸水	(243)
8.3.4 干热(高温)	(243)
8.3.5 湿热(稳态)	(244)
参考文献	(245)
第 9 章 光缆材料	(246)
9.1 材料作用	(246)
9.2 选用原则	(246)
9.3 类型与作用	(247)
9.3.1 分类	(247)
9.3.2 作用	(247)
参考文献	(272)
第 10 章 光缆设计、分类和结构特点	(273)
10.1 光缆设计原则	(273)
10.1.1 保护光纤	(273)
10.1.2 考虑因素	(273)
10.1.3 设计原则	(274)
10.2 光缆设计	(275)
10.2.1 余长设计	(275)
10.2.2 强度设计	(277)
10.3 光缆分类	(277)
10.3.1 网络层次	(277)
10.3.2 光纤状态	(278)
10.3.3 光纤形态	(279)
10.3.4 缆芯结构	(280)
10.3.5 敷设方式	(280)
10.3.6 使用环境	(281)

10.4	结构特点	(281)
10.4.1	结构类型	(281)
10.4.2	室外光缆	(282)
10.4.3	室内 / 外两用光缆	(284)
10.4.4	室内光缆	(285)
10.4.5	其他光缆	(289)
	参考文献	(295)
第 11 章	光缆制造	(296)
11.1	光纤着色	(296)
11.1.1	色谱	(296)
11.1.2	着色	(297)
11.2	光纤套塑	(297)
11.2.1	套塑分类	(297)
11.2.2	套塑工艺	(298)
11.3	缆芯绞合	(303)
11.3.1	工艺	(303)
11.3.2	绞合原理	(304)
11.3.3	伸长与收缩	(307)
11.4	缆芯填充	(307)
11.5	护套	(308)
11.5.1	工艺	(308)
11.5.2	护套种类	(309)
11.6	外护层	(310)
11.6.1	保护层	(310)
11.6.2	铠装	(310)
11.7	护套的完整性检验	(311)
	参考文献	(311)
第 12 章	光缆性能测量	(312)
12.1	光缆机械性能测量	(312)
12.1.1	目的	(312)
12.1.2	性能测量	(312)
12.2	光缆环境性能	(317)
12.2.1	目的	(317)

12.2.2 性能测量	(318)
参考文献	(325)
第 13 章 光缆型号、选型、采购与验收	(326)
13.1 光缆型号命名	(326)
13.1.1 型号组成	(326)
13.1.2 型式组成、代号及意义	(326)
13.2 光缆选型	(332)
13.2.1 光纤选择	(332)
13.2.2 光缆路由选择	(333)
13.2.3 敷设方式选择	(333)
13.2.4 光缆结构选择	(334)
13.3 光缆采购	(343)
13.4 验收	(346)
13.4.1 目的	(346)
13.4.2 测量分类	(346)
13.4.3 采用标准	(347)
参考文献	(351)

第 1 章 概 述

1.1 光纤通信技术发展历程

1.1.1 光纤通信概念

光纤通信是以激光作为载体,以光纤作为传输媒介的通信方式。与电缆或微波等电通信相比,光纤通信具有传输频带宽、传输衰减小、信号串扰弱、抗电磁干扰等优点。因此,当今全世界通信方式中已构成了一个以光纤通信为主,微波、卫星通信为辅的格局。

现在,以大有效面积非零色散位移光纤、光纤放大器和波分复用技术共同组成的密集波分复用光纤传输系统已经遍及全世界的核心网以及城域网。今天,由光纤构筑的网络拓扑已延伸到地球的各个角落,光缆的敷设正向着光纤到家庭、光纤到桌面进军,以实现光纤通信的最终目的。为了使读者能够全面地了解光纤通信技术的整个发展历程,作者对近 30 年国内外光纤通信研究中所取得的一些重大成果按照时间顺序大致归纳如下。

1.1.2 光纤通信重大成果

原始的光通信可以追溯到古代的烽火台狼烟报警。狼烟报警的不足之处是传递的信息内容少、速度慢且无法保密。早期的光纤通信是 1920 年美国的 Clarence W. Hansell 等人以透明棒或空心管阵列传送传真或电视。这些透明棒空心管阵列光纤没有包覆玻璃或者塑料包层,它们的导光性能很差,只能作为用在传输距离为 1 m 的人体内窥镜。1965 年,美国贝尔实验室的 Stewart Miller 领导了一个研究小组进行气体透镜的研究。他们用 1960 年贝尔实验室发明的激光器发出的激光聚焦耦合至空心波导中。由于空心波导光纤存在的高衰减问题,使研究无法将激光耦合进入空心波导光纤。随后,人们又进行了大气(自由空间)激光通信的研究。在大气激光通信中,信源端的激光器发出的激光信号通过大气介质传输到信宿端。因大气环境的风、雨、雪、雾的变化无常,故通信质量无法得到长期稳定的保证。1966 年 7 月,美籍华人高锟和 George A. Hockham 根据介质波导理论提出光纤通信的概念。高锟预言,只要在光纤制造中消除金属离子杂质,制造出 20 dB/km 衰减的光纤就可以实现利用光纤的目的。自 1966 年~1970 年,美国康宁公司的 Robert D. Maurer 等人经过 4 年的研究之后,他们完全掌握了制造衰减系数为 20 dB/km 的光纤技术。这就标志着现代光纤通信技术拉开了序幕。在 1970 年~1976 年期间,美国康宁公司的研究人员始终在进行进一步光纤降低的研究工作。1975 年,光纤衰减降低到了 4 dB/km。1976 年,光纤衰减降低到了 0.5 dB/km。1986

年,日本住友公司利用轴向气相沉积法制造出的纯硅芯石英玻璃光纤(Pure Silica Core Fiber, PSCF)的衰减系数为 0.154 dB/km。创造了 PSCF 的衰减系数世界记录。2002 年,日本住友公司刷新了 PSCF 的最低衰减系数的记录,使所研制的 PSCF 在 1310 nm 和 1550 nm 的衰减系数进一步分别降低到 0.265 dB/km 和 0.1495 dB/km。该光纤在 1570 nm 的最小衰减系数为 0.1484 dB/km。

自 1976 年,美国西屋电气公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个 44.736 Mb/s 传输 110 km 的光纤通信系统的现场实用化试验以来,从事光纤通信技术工作的科技人员始终如一地将追求实现光纤通信的“高速率、大容量、远距离”为研究重点。为此,光纤通信领域中从事系统、光纤、器件、网络等方面的研究人员共同努力和彼此促进,使得光纤通信技术发展日趋成熟、完善,取得了一系列的重大研究成果,从而在今天的通信领域中形成了一个以光纤通信为主,微波、卫星通信为辅的格局。

在 20 世纪 70 年代中期,美国、日本等发达国家研制出了第一个实用的光复用器件。1977 年, Tomlinson 和 Aumiller 首先成功地开发出了第一个光栅波分复用无源器件。随后,在 20 世纪 80 年代中期,人们又发现通信用的 G.652 单模光纤在两个低衰减工作窗口,即 1.31 μm 和 1.55 μm 之间具有一个很宽的可用来传输大量信息的光谱范围(除了在 1.385 μm 附近有一个由残留的 OH⁻引起的一个很大的衰减之外)。同时, G.652 单模光纤在 1.55 μm 的最小衰减系数水平已经达到了 0.16 dB/km。G.652 单模光纤的工作波长范围一般为 1520~1620 nm。在 1987 年发明了掺铒光纤放大器(Erbium Doped optical Fiber Amplifier, EDFA)。由于激光器泵浦光源激励 EDFA 可以放大 1530~1565 nm 窗口的信号光波长,而传输用的单模光纤和色散补偿单模光纤的工作波长范围都在 1520~1620 nm 范围,从而为中-长距离的密集波分复用(Dense Wave Division Multiplexing, DWDM)传输的商用奠定了坚实的基础。

1995 年,美国启动了世界上第一个 8×2.5 Gb/s 的 DWDM 试验系统,其具有多个光分/复用接点和光交叉连接点,传输业务包括:数据、数字视频、分布有线电视等,传输距离全长为 2000 km 以上。

自 20 世纪 90 年代以来,光纤通信在我国得到了迅速发展,中国电信长途干线由链状结构逐步发展为环形网和网格网,市内中继通信线路已全部采用光纤。20 世纪 90 年代初期,我国干线通信建设全部以 G.652 单模光纤为主。20 世纪 90 年代中期,非零色散位移单模光纤得到了充分的应用。我国已建成了横穿东西、纵贯南北的“八纵八横”的光纤干线骨干通信网,同时在一些业务发达地区进行了网络扩容,采用了高速同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)技术和 DWDM 技术。省内的光缆干线也已大量建成。20 世纪 90 年代末,各地的光纤接入网也得到了迅速的发展,现在我国光缆的总长度已超过 100 万皮长千米。我国参与投资建设的亚欧陆地光缆系统、国际海底光缆系统已相继开通,中美海底光缆也即将建成,一个通达全国各地,连通世界的先进的光网络架构已经形成。

1998 年,武汉邮电科学研究院开通了中国的第一个 DWDM 工程(中国电信国家一级干线,济南—青岛, 8×2.5 Gb/s)。

光网络以其先进性、开放性及经济性,吸引了国内各大高校、科研院所,以及著名通信公司的广泛关注。为了跟踪和赶超国外在光网络方面的先进水平,加快我国信息基础结构的研究工作,形成具有自主知识产权的产品并为我国光纤通信以及相关领域的研究奠定人才基础,1999年9月,国家863项目组下发了跨世纪、跨课题的一个重大项目——中国高速信息示范网(China Information Network, CAINONET)。该项目的目的就是要在我国建立一个 DWDM 全光互联网,为所有接入业务 IP, ATM, PSTN 和 SDH 等建立一个统一的操作平台,使子网之间可以很方便地实现互连互通,即实现全光域上的互联网。

2000年,武汉邮电科学研究院又开通了第一个 32 波 DWDM 工程(中国电信国家一级干线,贵阳—兴义, $32 \times 2.5 \text{ Gb/s}$)。

2001年,日本 NEC 公司在实验室创造的 DWDM 最高传输容量已达 10.9 Tb/s ($40 \text{ Gb/s} \times 273$, 其传输的距离是 100 km)。

2002年,美国朗讯公司实现了 $40 \text{ Gb/s} \times 60$ 的 4000 km 的超长距离波分复用传输试验。

2002年,国内各大设备制造商已经成功研制出了超大容量的 $160 \times 10 \text{ Gb/s}$ DWDM 系统,标志着我国在 DWDM 光网络方面的发展与国际水平十分接近。非零色散位移光纤的使用,使得 SDH 系统向 WDM 过渡时可有效地抑制四波混频等非线性效应,为我国光纤通信系统向 WDM 全光网的发展铺平了道路,为我国大规模的 SDH 系统的改造奠定了坚实的基础。不论是 IP over ATM, IP over SDH, IP over DWDM, 还是 WDM 在城域网和接入网方面的发展,我国已建成的光网络都有坚实的基础设施,具有重大的作用和发展前景。在 21 世纪里,建设多种特色的宽带网将是我国光网络发展建设的主要战略方向。

2003年,法国阿尔卡特采用非归零调制方式,在 G.652 单模光纤上成功地进行了 $40 \text{ Gb/s} \times 40$ 的 2540 km 传输试验。

2003年,武汉邮电科学研究院推出了城域网多业务传输平台设备。全面融入多协议标签交换、链路容量自动调整、ATM 反向接口复用、智能控制等多种先进技术,可以充分应对传统传输网络向下一代光网络的平滑演进。2003年9月,武汉邮电科学研究院、北京邮电大学和北京大学共同承担了“863 计划” $40 \text{ Gb/s} \times 80$ 的 DWDM 光传输系统研究课题, 320 km 的无电再生的中继。

2004年1月, $40 \text{ Gb/s} \times 80$ 的 DWDM 光传输系统实现了 320 km 的无电再生传输试验,取得了大量试验数据,为该系统日后的商用奠定了一定基础。

2004年2月,由武汉邮电科学研究院独立研制出了“ $10 \text{ Gb/s} \times 160$ 的 3040 km 超长距离 DWDM 光传输系统”通过了国家 863 项目专家组的验收。这个系统的传输线路是由 3040 km 的 G.652 光纤组成的 ($38 \times 80 \text{ km}$),同时使用 C+L 波段、采用 50 GHz 的信道间隔,通过拉曼放大技术对 C+L 波段进行同时放大,利用 $160 \times 10 \text{ Gb/s}$ DWDM 光传输设备作为基础应用平台,配合超长传输系统的关键技术,如分布式拉曼放大、非线性效应抑制管理技术、超强的前向纠错技术、动态增益均衡技术和多种编码(如非归零码、归零码、载波抑制-归零码)等实现超长距离传输。这个超长距离 DWDM 光传输系统是国内第一个商用超长距离 DWDM