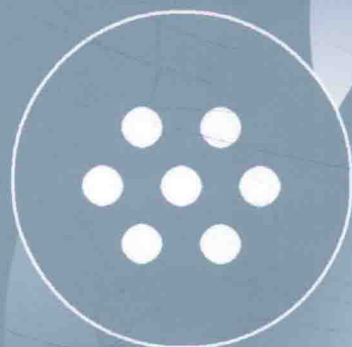
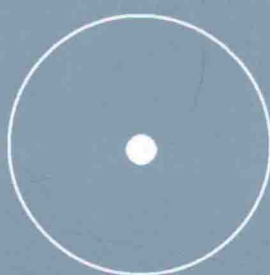
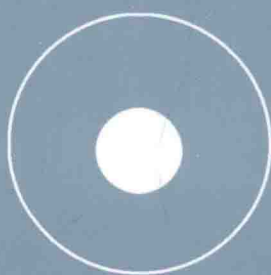


湖北省学术著作出版专项资金资助项目
光纤光缆制备技术国家重点实验室开放课题资助研究项目

Newest Researches on Communication
Optical Fibers and Their System Applications

通信光纤及其 系统应用前沿研究

◎编著 胡先志



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

湖北省学术著作出版专项资金资助项目
光纤光缆制备技术国家重点实验室开放课题资助研究项目

Newest Researches on Communication
Optical Fibers and Their System Applications

通信光纤及其系统应用前沿研究

胡先志 编著

武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

【内容简介】

本书是一部集通信光纤、传输系统、光网络和光纤系统应用为一体的学术著作。

全书内容共分为12章,作者运用光波导理论和光纤设计模型,论述了通信光纤的结构类型、性能特征和系统应用的创新历程、创新思想和创新成果;在分析不同结构类型的通信光纤在不同的光纤传输系统的传输质量要求的基础上,揭示了通信光纤的合理结构、性能特征与系统应用的研究本质和基本规律;在分析和消化国外通信光纤及其系统应用的前沿研究成果的基础上,提出了作者自己的一些新的见解,以期提高我国光纤研究学术水平和推动光纤产业快速发展。

本书可供从事通信光纤领域的科研、设计、制造和维护等方面工作的技术人员,以及高等学校通信工程、电子信息、材料科学等相关学科专业的高年级本科生、研究生和教师等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信光纤及其系统应用前沿研究/胡先志编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.7

ISBN 978-7-5629-5081-3

I. ① 通… II. ① 胡… III. ① 光导纤维通信系统—研究 IV. ① TN818

中国版本图书馆 CIP 数据(2016)第 058288 号

项目负责人:田道全

责任编辑:田道全

责任校对:刘 凯

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:21

字 数:538 千字

版 次:2016 年 7 月第 1 版

印 次:2016 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1—1000 册

定 价:65.00 元(精装)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

序

自1966年华裔科学家高锟先生(2009年诺贝尔物理学奖得主)与霍克海姆(HOCKHAM G A)先生共同提出,利用石英玻璃纤维(简称:光纤)传送光信号进行光纤通信的设想以来,在过去约50年中,研究人员在光纤、光器件、光纤传输系统和光网络等方面取得了一系列技术创新成果,由于新型光纤和新型光器件连续问世,不断地刷新了光纤传输容量的世界纪录。现在,光纤传输系统已经成为通信网络主要传输手段,在全世界范围内已经构建的拥有巨大传输容量的光网络,为与日俱增的信息流量提供了宽阔、可靠的传送平台,而且光网络资源调度已经从固定配置向着动态智能发展。

光纤的研究经历了一个由多模光纤、单模光纤到少模光纤、多芯光纤、超低损耗且超大有效面积光纤等的研究与发展的过程,推动了光纤传输系统从准同步数字体系、同步数字体系、波分复用系统到数字相干光纤传输系统的演进,促进了光网络从业务固定配置的同步数字体系传送网、波长调度的波分复用传送网、大颗粒业务配置和强大管理的光传送网到具有动态、自动实现传送、交换和建立连接功能的自动交换光网络。今天,光纤通信已经进入100 Gbit/s和超100 Gbit/s光纤传输时代,多载波调制、空分复用、相干检测和数字信号处理,加快了少模光纤、多芯光纤和光子晶体光纤等新型光纤的研究步伐,从而满足了超高速率、超长距离、超大容量和超高频谱效率的超100 Gbit/s光纤传输系统需要。

本书作者拥有30多年的光纤通信科研与教学工作经验,通过阅读大量的国外最新研究文献,再凭借他的工作经验和学习体会,撰写了这本有关光纤及其应用的专著。我相信,这部《通信光纤及其系统应用前沿研究》力作的出版,将会对我国光纤研究与应用工作起到积极的推动作用。

是为序。

中国工程院院士

赵梓森

2016年6月

前 言

今天,借助可以实现信息传输和交换的基础设施——电信网络,政府、企业和个人可以随时随地相互进行信息交流。随着电信业务的多样化、宽带化的发展,推动了电信网络向着大容量、高灵活度、低能耗方向发展,以满足人与人、人与物、物与物的信息互动要求。

电信技术研究的三个主要问题是:提高容量(速率 $\times$ 距离)、确保安全和降低成本。通信技术之所以从电缆通信、同轴电缆通信、微波通信演进到光纤通信,其根本原因是光纤通信具有巨大带宽、极高质量和极低成本等特点。自1966年华裔科学家高锟先生与霍克海姆(HOCKHAM G A)先生共同提出光纤通信设想以来,光纤、光器件、光纤传输系统和光网络的四位一体、共同进步,推动通信世界发生了翻天覆地的变化。

光纤类型经历了一个从多模光纤、单模光纤到少模光纤、多芯光纤、超低损耗且超大有效面积光纤等的研究与发展的过程,为光纤传输系统从低速率、短距离、小容量向超高速率、超长距离、超大容量发展提供了必要的技术保障。

麦克斯韦(MAXWELL J C)波动方程在阐述了光纤的导光原理的同时,也揭示了光纤传输性能与光纤折射率分布结构参数存在着极为紧密的关系。光纤设计工作的核心是为不同性能的光纤寻求性价比最佳的折射率分布结构。光纤传输性能阐述了光纤的衰减、色散、偏振模色散和非线性效应的产生原因、负面影响及其解决方法。通信光纤经历了一个从衰减、色散、工作波长、非线性效应到弯曲性能的研究历程,从而不断地推出性能不同的常用类型的光纤:G. 651 光纤、G. 652 光纤、G. 655 光纤和 G. 657 光纤等。光纤的技术参数、性能特点是决定它们适用不同传输系统的依据。

宽带光纤接入网的迅速发展,加快了高带宽、低成本光纤的研究步伐。例如,塑料光纤以大的芯径、高柔软性与价格便宜的垂直腔表面发射激光器和便于接续的简单连接器结合的一体化解决方案,正在成为高带宽、低成本的校园网和室内布线选用的技术方案之一。高带宽多模光纤、新型多模光纤,如弯曲不敏感的多模光纤、OM4 多模光纤和光互联多芯多模光纤等是实现 10~100 Gbit/s 数据通信的既可靠又经济的技术方案。

以太网传输速率的不断加快,推动光纤传输系统的单信道传输速率向着 100 Gbit/s、400 Gbit/s 和 1 Tbit/s 的方向迈进。长途干线的光传送网的光纤传输,正在向太比特(Tbit/s)级的超高速率、数千千米的超长距离、几十甚至上百太比特的超大容量的方向发展,利用多载波调制、多维复用、相干光检测和数字信号处理技术是光纤传输系统实现超高速率、超长距离、超大容量、超高频谱效率的技术保障。多载波调制和多维复用是提高频谱效率、扩大传输容量的有效措施。例如,少模光纤是以支持多个模式传输方式(模分复用)来提高光纤传输容量的方法。多芯光纤是在一个共同包层中具有多个纤芯,以多个纤芯构建的多个光通道(空分复用)来扩大光纤传输系统的传输容量。超低损耗、超大有效面积光纤则是构建超高速率、超长距离、超大容量(简称:三超)光纤传输系统选用的最佳光纤。

光纤传输技术经历了同步数字体系、波分复用系统、光传送网、自动交换光网络等几个阶段。同步数字体系,以统一光接口、业务复用与映射、强大的网络管理,推动了光纤通信在电信网络中的大规模应用。波分复用系统利用光放大器和波分复用技术赋予光纤传输系统大容量、远距离、低成本的特点,同时为建立波长选路及透明、灵活、可靠的光网络提供了技术保障。光传送网是以波长(波带或光纤)作为交换颗粒,在光域上分插复用和光交叉连接,为客户层业务提供有效和可靠的传输。自动交换光网络是通过控制平面路由和信号机制或者管理平面自动地建立或者拆除光通路,使光网络组网具有动态性、灵活性、高效化和智能化的特性。

本书以光纤光缆制备技术国家重点实验室的一些光纤研究成果为基本素材,同时集中介绍了国外光纤及其系统应用前沿研究动态。本着学以致用原则,本书的编写内容安排顺序是,在全面而系统地阐述了光纤传输理论、光纤设计思想、光纤性能特点的基础上,简明扼要地介绍光纤传输系统和光网络的特点,通过不同类型的光纤在不同传输系统应用的实例特点分析,力求使读者能够建立起光纤通信是由光纤、光器件、传输系统和光网络四位一体、彼此依靠、共同发展的立体化的学术思想。

为了使我国从事光纤通信工作的读者能够及时了解国际光纤及其应用的研究动态,本书作者撰写这本最新的有关光纤及其应用的著作,以满足从事光纤通信科研、设计和维护人员的知识更新的需要,同时也可以满足高等学校通信工程、电子信息和材料科学等相关学科专业高年级本科生和研究生的教学需要。

在本书编写过程中,作者参考了许多有关光纤、传输系统和光网络的国内外最新标准、专家著述和研究成果,在此向这些标准组织和有关专家表示真诚的感谢。作者已在本书各章末的参考文献中一一做了列举,但难免有遗漏之处,还请多加谅解。本书的编写工作,获得了长飞光纤光缆股份有限公司(光纤光缆制备技术国家重点实验室)的课题立项研究资助;本书的出版工作,获得了湖北省学术著作出版专项资金资助项目的课题立项出版资助。作者特别感谢光纤光缆制备技术国家重点实验室主任罗杰博士认真审阅书稿并提出了许多修改建议;由衷地感谢中国工程院赵梓森院士在百忙之中为本书作序举荐!

由于作者水平有限,书中难免出现一些不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2016年6月

目 录

1 光纤概论	(1)
1.1 光纤通信简史	(1)
1.2 光纤特点	(3)
1.2.1 信道容量	(3)
1.2.2 光纤特点	(4)
1.3 光纤性能	(5)
1.3.1 线性效应	(5)
1.3.2 非线性效应	(7)
1.4 光纤类型演进	(9)
1.4.1 研究历程	(9)
1.4.2 类型演进	(10)
参考文献	(19)
2 光纤波导理论	(21)
2.1 引言	(21)
2.2 光纤结构与光纤类型	(22)
2.2.1 光纤结构	(22)
2.2.2 光纤类型	(22)
2.3 光纤理论	(25)
2.3.1 射线光学理论	(25)
2.3.2 波动光学理论	(30)
2.4 光纤模式	(32)
2.4.1 光纤模式的概念	(32)
2.4.2 传导模场分布	(32)
2.4.3 归一化参数	(35)
2.4.4 模式分布	(35)
2.4.5 传导模数量	(37)
2.5 单模光纤	(38)
2.5.1 单模传输条件	(38)
2.5.2 模场直径	(39)
参考文献	(41)

3 光纤设计	(42)
3.1 引言	(42)
3.2 设计原则	(43)
3.3 折射率分布	(44)
3.4 光纤设计实例	(45)
3.4.1 多模光纤	(45)
3.4.2 单模光纤	(46)
参考文献	(52)
4 光纤传输性能	(53)
4.1 引言	(53)
4.2 光纤衰减	(54)
4.2.1 衰减	(54)
4.2.2 衰减机理	(56)
4.2.3 光纤衰减谱	(60)
4.2.4 解决对策	(62)
4.3 光纤色散	(63)
4.3.1 色散	(63)
4.3.2 色散机理	(65)
4.3.3 表示方法	(70)
4.3.4 光纤的色散特点	(73)
4.3.5 带宽与距离的乘积	(75)
4.3.6 解决对策	(76)
4.4 光纤偏振模色散	(77)
4.4.1 偏振模色散	(77)
4.4.2 产生机理	(78)
4.4.3 表示方法	(79)
4.4.4 影响作用	(80)
4.4.5 解决对策	(81)
4.5 光纤非线性效应	(82)
4.5.1 非线性效应	(82)
4.5.2 非线性机理	(86)
4.5.3 非线性相位调制	(91)
4.5.4 影响作用	(96)
4.5.5 解决对策	(97)
参考文献	(98)
5 常用的通信光纤	(99)
5.1 引言	(99)

5.2 光纤研究历程	(100)
5.2.1 多模光纤	(100)
5.2.2 单模光纤	(102)
5.3 光纤标准	(103)
5.3.1 光纤标准概述	(103)
5.3.2 光纤性能参数	(104)
5.3.3 光纤属性	(104)
5.4 光纤类型	(112)
5.4.1 多模光纤	(112)
5.4.2 单模光纤	(114)
5.5 通信光纤性能特点	(115)
5.5.1 多模光纤	(115)
5.5.2 单模光纤	(118)
参考文献	(138)
6 吉比特级塑料光纤	(139)
6.1 引言	(139)
6.2 结构与类型	(140)
6.2.1 结构	(140)
6.2.2 类型	(140)
6.3 制造方法	(140)
6.3.1 阶跃折射率-塑料光纤	(140)
6.3.2 梯度折射率-塑料光纤	(141)
6.4 光纤衰减	(144)
6.4.1 吸收损耗	(145)
6.4.2 散射损耗	(146)
6.4.3 低损耗塑料光纤	(147)
6.5 光纤带宽	(148)
6.5.1 模色散	(148)
6.5.2 模间色散	(149)
6.5.3 模内色散	(151)
6.5.4 高带宽塑料光纤	(151)
6.6 研究方向	(154)
6.6.1 应用场所	(154)
6.6.2 研究方向	(157)
参考文献	(158)
7 新型多模光纤	(159)
7.1 引言	(159)

7.2	多模光纤传输理论	(160)
7.3	多模光纤带宽	(161)
7.3.1	宽带	(161)
7.3.2	光纤特性	(163)
7.4	10 Gbit/s 以太网系统模型	(164)
7.5	新型多模光纤最新发展	(168)
7.5.1	弯曲不敏感多模光纤	(168)
7.5.2	宽带 OM4 多模光纤	(171)
7.5.3	光互连多芯多模光纤	(175)
	参考文献	(178)
8	少模光纤	(180)
8.1	引言	(180)
8.2	少模光纤波导条件	(181)
8.3	少模光纤模式结构设计	(183)
8.3.1	线性偏振模	(183)
8.3.2	分布模式耦合	(185)
8.3.3	差分群时延	(186)
8.3.4	差分群时延累积	(187)
8.3.5	非阶跃折射率分布	(187)
8.4	少模光纤结构优化	(189)
8.4.1	空分复用阶跃折射率少模光纤	(189)
8.4.2	阶跃折射率光纤结构变化	(190)
8.4.3	空分复用双模梯度少模光纤	(192)
8.4.4	向更多模数扩展	(195)
8.5	少模-多芯光纤	(196)
8.5.1	产生背景	(196)
8.5.2	设计原则	(197)
8.5.3	设计实例	(198)
8.6	少模光纤传输系统	(201)
8.6.1	少模光纤	(201)
8.6.2	关键技术	(202)
8.6.3	少模光纤 MIMO 传输系统	(204)
8.6.4	少模光纤单模工作传输系统	(205)
8.7	少模光纤研究方向	(207)
	参考文献	(208)
9	多芯光纤	(209)
9.1	引言	(209)

9.2 多芯光纤类型	(211)
9.2.1 多芯光纤分类	(211)
9.2.2 多芯光纤性能	(212)
9.3 多芯光纤设计	(213)
9.3.1 仿真模型	(213)
9.3.2 高密度纤芯排列	(213)
9.3.3 扩大有效面积	(214)
9.3.4 扩大纤芯数	(215)
9.4 制造工艺	(216)
9.4.1 工艺决定性能	(216)
9.4.2 制造工艺	(216)
9.4.3 光纤试验样性能	(217)
9.5 纤芯之间串扰	(218)
9.5.1 多芯光纤的芯间的串扰	(218)
9.5.2 耦合模方程	(219)
9.5.3 弯曲和扭转作用	(220)
9.6 串扰抑制	(221)
9.6.1 模式耦合抑制	(221)
9.6.2 相位匹配抑制	(222)
9.6.3 串扰抑制的目标水平	(223)
9.7 截止波长变化	(224)
9.8 有效横截面面积的有效利用	(225)
9.8.1 外包层厚度和外纤芯附加损耗	(225)
9.8.2 包层直径和机械强度	(226)
9.8.3 纤芯排列	(226)
9.9 大容量传输	(227)
9.9.1 关键的结构参数	(227)
9.9.2 超低串扰和超低损耗光纤	(229)
9.9.3 空分复用频谱效率	(229)
9.10 多芯光纤研究方向	(231)
参考文献	(231)
10 光纤传输系统	(233)
10.1 引言	(233)
10.2 光纤传输系统	(235)
10.2.1 发展历程	(235)
10.2.2 电信技术发展趋势	(237)
10.2.3 传输系统	(239)

10.3 光纤传输系统设计.....	(253)
10.3.1 工作波长.....	(253)
10.3.2 路由选择.....	(254)
10.3.3 系统传输容量.....	(254)
10.3.4 光纤选型.....	(254)
10.3.5 设备选型.....	(256)
10.4 光缆链路传输性能计算.....	(256)
10.4.1 衰减性能计算.....	(256)
10.4.2 色散性能计算.....	(257)
10.4.3 偏振模色散性能.....	(259)
参考文献.....	(261)
11 光网络.....	(262)
11.1 引言.....	(262)
11.2 光传送网.....	(263)
11.2.1 网络分层结构.....	(263)
11.2.2 接口结构.....	(264)
11.2.3 比特速率与传输容量.....	(265)
11.2.4 OTN 帧结构.....	(265)
11.2.5 复用与映射.....	(266)
11.2.6 技术特点.....	(267)
11.2.7 应用.....	(268)
11.3 分组传送网.....	(269)
11.3.1 技术体制.....	(269)
11.3.2 网络分层结构.....	(269)
11.3.3 关键技术.....	(270)
11.3.4 技术特点.....	(271)
11.3.5 应用.....	(271)
11.4 自动交换光网络.....	(272)
11.4.1 体系结构.....	(272)
11.4.2 关键技术.....	(274)
11.4.3 技术特点.....	(275)
11.4.4 应用.....	(275)
11.5 光纤接入网.....	(276)
11.5.1 宽带接入.....	(276)
11.5.2 接入网.....	(277)
11.5.3 光纤接入网.....	(278)
11.5.4 无源光网络.....	(279)

11.5.5 以太网无源光网络	(281)
11.5.6 下一代无源光网络	(285)
11.6 未来光网络	(288)
参考文献	(289)
12 光纤系统应用前沿研究	(291)
12.1 引言	(291)
12.2 多模光纤模分复用 25.5 Gbit/s 传输系统	(293)
12.2.1 系统组成	(293)
12.2.2 研究内容	(295)
12.2.3 特点分析	(296)
12.3 多模光纤 40 Gbit/s 传输系统	(297)
12.3.1 系统组成	(297)
12.3.2 研究内容	(300)
12.3.3 特点分析	(302)
12.4 塑料光纤 100 Gbit/s 以太网	(302)
12.4.1 系统组成	(302)
12.4.2 研究内容	(304)
12.4.3 特点分析	(306)
12.5 G.657 光纤 100 Gbit/s 传输系统	(306)
12.5.1 系统组成	(306)
12.5.2 研究内容	(307)
12.5.3 特点分析	(308)
12.6 超低损耗等光纤 1.2 Tbit/s 传输系统	(309)
12.6.1 系统组成	(309)
12.6.2 研究内容	(311)
12.6.3 特点分析	(312)
12.7 G.652 光纤 30.7 Tbit/s 相干光传输系统	(313)
12.7.1 系统组成	(313)
12.7.2 研究内容	(315)
12.7.3 特点分析	(316)
12.8 19 芯光纤空分复用 305 Tbit/s 传输系统	(316)
12.8.1 系统组成	(316)
12.8.2 研究内容	(318)
12.8.3 特点分析	(320)
参考文献	(320)

1 光纤概论

1.1 光纤通信简史

通信就是互通信息。按照国际电信联盟关于“通信”的定义,通信是指按照一致同意的约定来传递信息。按照国际电信联盟规范的关于“电信”的定义,电信则是指通过电、光或其他电磁信号来传递信息。简言之,广义上的“通信”包含电信和邮政等,狭义上的“通信”仅指电磁波通信。通信经历了由人工传递、电波传输到光波(光纤)传输的发展过程。呼叫、烽火、驿站的人工传递,其实现简单,但是费时耗力。电信技术是克服时空限制的主要手段,几乎可以瞬间将大量信息传送到遥远的某个地方^[1]。

电信技术的发展经历了一个由单业务、低速率、短距离、小容量到多业务、高速率、长距离、大容量的创新和发展的演进过程。电信技术快速发展的原动力是技术创新、理论突破和社会需求。例如,1875年,贝尔(BELL A G)发明的电话是模拟通信的先驱。1837年,莫尔斯(MORSE S F B)发明电报系统。电报系统被认为是远程通信,也是数字通信的伊始。1892年,史端乔(STROWGER A B)引入的步进开关,使电话实现自动化。电话通信方式是以相互连接的电线传输信号,所以电话的信号传输距离受到限制。1864年,麦克斯韦(MAXWELL J C)建立了电磁场理论。1887年,赫兹(HERTZ H R)实验证明了电磁波的存在。1901年,马可尼(MARCONI M G)实现了2700 km的无线通信,显示了电信技术的巨大潜力。过去认为电信就是电报和电话,电报和电话在社会进步和经济发展中起到了积极作用。

1937年,里夫(REEVES A H)提出脉冲编码调制(Pulse Code Modulation, PCM),即用脉冲调制对语音信号进行编码。PCM具有的优点是,减少累积噪声、易于压缩和加密等。但由于当时代价太高,没有进入商用。1948年,香农(SHANNON C E)提出通信系统一般模型,它既适用于电报、电话通信,也适用于其他通信形式,包括声音和广播电视等。在深入分析通信系统模型后,他提出信道容量、信息熵等概念,从而定量地揭示了通信研究的实质问题。之后香农又发表了密码理论等论文,并提出信息论。经过其他学者的共同努力,20世纪60年代创立了信息论学科。信息论是信息、信息传输和信息处理的基本理论^[2]。

1960年,美国加州 Hughes 实验室的科学家梅曼(MAIMAN T H)发明了世界上第一台红宝石激光器。由于激光器可以作为承载信息的光源,以便实现光纤通信,所以开发出承担低衰减的光信号传输媒质的光纤成为构建实用光纤通信系统的一个关键问题。为此,研

究人员提出了一些传输光信号的方法。例如,以空气为传输媒质来传输激光光束,用规则空间间隔的透镜组成共焦点的光波导,使用反射管道形成空芯光波导和介质光纤。1966年,在英国标准通信实验室(Standard Telecommunications Laboratories, STL)工作的华裔科学家高锟先生(2009年诺贝尔物理学奖得主)与霍克海姆(HOCKHAM G A)先生共同提出玻璃光纤可以成为好的信息传输媒质的光纤通信设想。在《光频介质纤维表面波导》论文中,他们提出的科学创新思想的实质是:

(1) 玻璃光纤可以承载巨大信息容量;

(2) 通过提纯方法降低石英玻璃杂质,可以制造出其光能损耗为 20 dB/km 以下的实用光纤;

(3) 提出了光纤(波导)原理与结构。

该论文指出,玻璃纤维的光能损耗主要是由杂质引起的。一旦石英玻璃纤维的光能损耗降低到 20 dB/km 以下,可以利用光纤实现大容量和高质量的信息传输。随后,美国、英国、法国和日本等国家开展了玻璃提纯研究工作^[3]。

1970年,堪称光纤通信诞生之年。在这一年,美国康宁公司(Corning Incorporated)的 MAURER R D 等利用化学气相沉积法研制出了衰减系数小于 17 dB/km 的玻璃光纤。MAURER 等使氦氖激光器产生的 633 nm 波带橘红色光,在玻璃光纤中的传输损耗降低到 17 dB/km 以下。同年,前苏联的 ALFEROV Z I 和美国贝尔实验室的 HAYASH I,分别报道研制出了世界上第一个在室温下可以连续工作的异质结半导体激光器。体积小且调制简单的半导体激光器和衰减小、柔软而径细的光纤的相继问世,为构建简单的光纤通信系统奠定了基础,推动了光纤传输系统研究从实验室进入商业应用领域。

1976年,美国贝尔实验室采用 GaAlAs 激光器作为发射光源、多模光纤作为传输媒质,构建的传输速率为 44.7 Mbit/s 的光纤传输系统,在美国的亚特兰大和华盛顿之间进行了现场传输实验,使光纤通信向实用化迈出了坚实的一步。该试验系统经过全面性能测试,很快投入商业运行。1977年,美国麻省理工学院的华裔科学家谢照金(HSIEH J J)等研制出了波长为 1310 nm、寿命可以达到 1500 h 的半导体激光器。1979年,中国武汉邮电科学研究院的赵梓森先生等研制出了中国第一根符合国际标准的实用化光纤。1982年,赵梓森先生的研究团队在中国湖北省武汉市开通了连接“汉口—武昌—汉阳”三镇的中国第一个多模光纤的 8 Mbit/s 商用光纤传输系统。

1981年,1310 nm 和 1550 nm 高效红外半导体激光器实现商用。1310 nm 波带半导体激光器是短距离传输系统中使用的最理想的光源。1550 nm 波带半导体激光器是长距离传输系统中使用的最理想的光源。半导体激光器的 1310 nm 波带和 1550 nm 波带居然与石英玻璃光纤的两个低损耗波带奇迹般地全面吻合。1983年,单模光纤问世。半导体激光器和低衰减单模光纤二者结合既降低了光纤的传输损耗,又提高了系统传输容量。1984年,美国贝尔通信研究所提出高速率、大容量和智能化的光同步传输网。1988年,国际电信联盟通过了一批同步数字传输体系。同步数字传输体系具有标准接口、组网灵活和管理强大等优点。从此,光纤通信的研究和商业应用如雨后春笋般得到迅速的发展,光纤通信逐渐担当起承载全世界海量信息的宽阔、可靠的传输平台的重任。

1987年,英国南安普顿大学的 GAMBLING W A 和 PAYNE D N 教授发明了掺铒光

纤放大器。1995年,美国贝尔实验室的华裔科学家厉鼎毅等开发出了波分复用系统,1998年,利用 8×2.5 Gbit/s波分复用系统实现了38000 km环绕40多个国家的海底光纤通信;2000年,通过采用提高激光器波长稳定性、光滤波器技术和密集波分复用技术,使光纤传输系统实现1 Tbit/s(100×10 Gbit/s)传输。2001年,日本NEC公司研究人员在纯硅芯光纤的S波带、C波带和L波带上完成了传输容量为10.9 Tbit/s(273×40 Gbit/s)的传输实验。

进入21世纪以来,通信业务从以语音为主到以数据和视频为主,用户对宽带业务需求与日俱增。目前,10 Gbit/s、40 Gbit/s的波分复用系统难以满足网络运营商的发展需求。特别是传输速率为100 Gbit/s、400 Gbit/s和1 Tbit/s的以太网发展,迫切需要单波长传输速率大于100 Gbit/s的超高速率、单根光纤波长数量大于160的超大容量、传输距离大于1000 km的超长距离的光纤传输系统承担各国干线光网络的传输任务。为此,世界各个国家研究人员积极开展了基于高阶调制、多维复用、相干检测和数字信号处理的数字相干光通信系统研究。2008年,SHIEH W等利用正交频分复用调制格式,在没有色散补偿和光放大器的情况下,在单模光纤上完成了传输速率为107 Gbit/s、传输距离为1000 km的传输试验。2012年,SAKAGUCHI J等利用空分复用-波分复用-偏振复用三维复用和相移键控调制格式,在19芯单模光纤上实现了3.648 Tbit/s ($19 \text{ 芯} \times 100 \text{ 波} \times 1.92 \text{ Gbit/s}$)的传输试验。2014年,TAKAHASHI H等在使用带有多芯掺铒光纤放大器的7芯光纤线路上实现了单纤净传输速率为140.7 Tbit/s、传输距离为7326 km、速率 $\times$ 距离=1.03 Pbit/s $\cdot$ km的传输试验。可以预测,未来光纤通信系统的主流技术,将是单信道传输速率100 Gbit/s、400 Gbit/s甚至于1 Tbit/s及其相干光通信系统的天下^[4]。

1.2 光纤特点

1.2.1 信道容量

众所周知,电信系统是指信息传递所需要的全部设施。按照信息论之父香农提出的电信(通信)系统模型,电信系统由信源、编码、信道、译码和信宿组成。信源是等待传送的信息主体。信宿则是被传送信息的接收者。信源和信宿决定了电信系统的业务性质。例如,电话电信系统传送语音信息,数字电信系统传送代表某些信息的符号。信道顾名思义是传送信息的通道。编码泛指将信源输出变换成适合信道传送的信号所需的设备,而译码就是编码的反变换所需的设备。

按照电磁波传播载体不同,电信系统中的信道可以分为无线信道和有线信道。无线信道是利用自由空间来传播信息,例如,无线电广播、微波通信和移动通信等。有线信道利用电磁波沿导线传输来传播信息,例如,对称电缆(双绞线)、同轴电缆和光纤光缆等。

电信技术研究的终端目标是提高信道容量、降低系统成本、保证网络安全。信道容量是指信道的极限传输能力,即能够传输的最大信息量。由香农信息论可以证明,在高斯

(GAUSS J C F)白噪声背景下的连续信道的容量 C , 可以用香农信道容量公式(1-1)求得^[5], 即

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-1)$$

式中 C ——信道容量, bit/s;

B ——信道带宽, Hz;

S ——信号功率, W;

N ——噪声功率, W。

式(1-1)隐含着三个重要结论:

- (1) 信道容量 C 受限于 B 、 S 和 N ;
- (2) 提高 S/N , 可以增加信道容量 C ;
- (3) 信道容量 C 随着信道带宽 B 的增大而增大。

单位时间内可以传输的信息数量的理论极限值是一定的。只要传输速率小于或等于信道容量, 总可以寻找到一种信道编码, 实现无差错传输; 若传输速率大于信道容量, 则不可能实现无差错传输。因此, 提高信道容量的途径之一是: 提高信号功率, 降低噪声。

1.2.2 光纤特点

在电信世界中, 电磁波是极为丰富的资源。它覆盖了从无线电波、光波到宇宙射线十分宽阔的频谱范围。电信业界人士始终在想方设法, 通过采用不同的技术方式充分利用电磁波来创造巨大的财富。在电信传输系统中, 信息一般不能直接传播, 信息需要被调制到电磁(载)波上才能进行传输。电磁波的频谱就是承载信息的波长或者频率范围, 即带宽。这个频谱(带宽)是无限宽阔的。电信技术发展史, 其实就是一部不断地开发和利用电磁波的巨大频谱资源的历史。例如, 电信传输系统所用的传输媒质, 从铜对绞线(铜线)、同轴电缆、微波到光纤, 就是不断地提高频谱资源利用率, 降低传输系统成本的极好的实例。

电信业内读者非常清楚, 载波频率(带宽)越高, 传输媒质损耗越小, 则可以使传输系统实现高速率、长距离、大容量和低成本传输。电信技术的研究始终如一地在追求提高载波频率、减小传输损耗、增加传输容量、降低传输成本。光纤通信可用的频谱资源如图 1-1 所示。其中, 同轴电缆使用的载波频率大约为 500 MHz, 微波传输所用的载波频率大约为 1 GHz, 而光纤通信使用的载波频率可以达到约 200 THz。这就是电信传输技术之所以从双绞线通信、同轴电缆通信、微波通信演进到光纤通信的根本原因所在。

光纤通信之所以能够如此迅速地发展, 其根本原因在于光纤本身具有的巨大频率谱资源($10^{14} \sim 10^{15}$ Hz)、极低传输损耗(在 1550 nm 波长处为 0.15 dB/km)、抗电磁干扰、尺寸小且自重轻和原料来源丰富等一系列独特的性能。今天, 光纤通信已经广泛地使用在国家长途干线光网络、城域光网络和接入光网络, 成为支撑信息网络的重要的基础设施。