



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光通信 原理与系统

黎洪松



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光通信 原理与系统

黎洪松



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书系统讲述了光通信的基本原理和关键技术,包括光纤通信和无线光通信两部分。第1章概述光通信的系统组成、关键技术和光通信的发展;第2章讲述与光通信有关的基础理论;第3章~第6章讲述光纤通信所涉及的光纤、光通信器件、光纤通信系统和光通信网络;第7章讲述无线光通信,包括大气激光通信、卫星激光通信和水下激光通信。

本书可作为通信工程、电子信息以及相近专业本科生的教材,也可作为通信类研究生或工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光通信原理与系统/黎洪松. —北京:高等教育出版社,2008.9

ISBN 978 - 7 - 04 - 024559 - 2

I. 光… II. 黎… III. 光通信 - 高等学校 - 教材
IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 120070 号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 孙 薇 封面设计 张 楠 责任绘图 尹 莉
版式设计 张 岚 责任校对 金 辉 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京凌奇印刷有限责任公司

开 本 787×960 1/16
印 张 16.5
字 数 300 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 1 月第 1 版
2008 年 9 月第 2 版
印 次 2008 年 9 月第 1 次印刷
定 价 20.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24559-00

前言

1881年贝尔发明了光电话,开创了无线光通信的先河。1960年梅曼发明了红宝石激光器,为大容量光通信提供了理想的光源,推动了现代光学通信的发展。1966年高锟解决了石英光纤损耗问题,提出了研制低损耗光纤的可能性。1970年美国康宁公司研制成功了低损耗光纤,光通信发展进入了快车道。由于光纤通信具有巨大的传输带宽、极低的传输损耗和极高的保密性等优势,因此,自20世纪70年代以来,光纤通信成为光通信的主流,几乎完全取代电缆载波通信,已成为固定通信网干线中最重要的大容量、长距离的传输技术。随着DWDM、EDFA和光交换技术的发展,光纤通信进入了全光通信的时代。近年来,由于宽带无线接入、宽带星间链路和对潜水下通信等应用的需求不断增加,无线激光通信进入了新一轮研究热潮。总之,光通信是通信发展史中一次革命性的进步。

光通信技术是高等学校电子信息类专业最重要的专业课程之一,光通信系统更是一个城市、一个国家乃至全球最重要的信息基础设施。同时,光通信的新理论、新技术、新设备和新应用的不断涌现,推动了光通信技术的不断发展。人们越来越期望学习和掌握光通信的基础理论和技术,也希望了解光通信的新成就和新发展,本书正是顺应这一需求而编写的。

本书被教育部列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,其主要特点体现在以下3个方面:

一是近年来国内出版的光通信教材很多,这些教材都把注意力放在讲解光纤通信上,很少涉及无线空间光通信。这是因为自20世纪80年代以来,光纤通信一直是光通信的主体,目前光纤通信在主干网、接入网和其他宽带传输等方面得到了非常广泛的应用。进入21世纪,由于大气激光通信、星际激光通信和对潜光通信越来越受到业界的关注,因此本书系统讲述无线空间光通信的基本概念、原理和技术。

二是由于光纤传输涉及比较复杂的电磁学理论和光学理论,因此本书注重物理概念、基本原理和应用范例的讲解,尽可能地引用已有的理论结果而不进行复杂的数学推导和边界求解。

三是本书尽可能地收集国内外的有关成果,力求技术上的新颖性和实用性,反映当前光通信技术的新发展和新应用。

本书的第1章是光通信概述,概略介绍光通信的基本概念、光通信系统组成、主要性能指标和光通信的发展,目的是使读者在系统深入学习光通信技术之前有一个大致的了解。第2章介绍光通信的理论基础,包括光与物质的相互作用、几何光学理论基础和电磁场理论基础。第3章介绍光纤,包括光纤中光传播的基本原理、光纤的传输特性和光缆。第4章介绍光通信器件,包括光源、光检测器、光放大器等有源器件和连接器、耦合器、波分复用器、调制器等无源器件。第5章介绍光纤通信系统,包括强度调制-直接检波数字光纤通信系统、有线电视模拟光纤通信系统、波分复用系统、光孤子通信系统和相干光通信系统等。第6章介绍光网络,包括SDH光传送网、WDM光传送网、光接入网和光因特网等。第7章介绍无线激光通信,包括大气激光通信、水下激光通信和卫星激光通信。

本教材的基本教学学时数为40学时,编写本书的目的就是要为通信工程、电子信息以及相近专业的高年级本科生提供一本系统讲述光通信基本原理和关键技术的教材。本书是编者十多年来从事光通信研究、应用和教学工作的小结,在编写过程中得到了很多人的帮助。为此,编者要感谢裘晓峰老师对本书的审阅,感谢全子一老师、李承恕老师的指导,感谢周明全老师、姚力老师和同事们的大力支持,感谢高等教育出版社刘激扬老师和孙薇老师的帮助,感谢我的研究生唐建君、喻思伟、刘波、李达和徐金东的录入校对工作,同时向本书附录参考文献的作者一并致谢。

光通信技术涉及通信理论、光学、电磁场理论、半导体物理与器件、微波技术等多学科领域的基础理论和专业知识的,受限于编者的学识和视野,书中必有不妥乃至错误之处,敬请读者提出宝贵意见。电子邮箱:hongsongli@yahoo.com。

编 者

2008年3月

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@ hep. com. cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第 1 章 光通信概述	1
1.1 光波的电磁频谱	1
1.2 光通信发展	2
1.3 光通信系统组成	6
1.4 光通信系统的基本问题与主要性能指标	10
1.4.1 衰减	10
1.4.2 色散	11
1.4.3 最大比特率	11
1.4.4 带宽	11
1.4.5 传输距离	12
1.4.6 通信容量	12
习题	13
第 2 章 光通信的理论基础	14
2.1 光的波粒二象性	14
2.2 电磁场理论基础	16
2.2.1 电磁场基本方程	16
2.2.2 电磁场边界条件	17
2.2.3 波动方程和亥姆霍兹方程	19
2.2.4 均匀平面电磁波	20
2.2.5 平面电磁波的偏振状态	21
2.2.6 平面波的反射和折射	21
2.3 光学理论基础	23
2.3.1 几何光学的基本定律	23
2.3.2 光源与光谱	24
2.3.3 光的干涉与衍射	25
2.3.4 光与介质的相互作用	27
2.3.5 非线性光学效应	30
2.3.6 光在介质中传播	31
习题	31

第 3 章 光纤	33
3.1 光纤概述	33
3.1.1 光纤结构	33
3.1.2 光纤材料	33
3.1.3 光纤制造	33
3.1.4 光纤分类	34
3.1.5 光缆	36
3.2 光纤传输理论	39
3.2.1 阶跃型光纤的光线理论分析	39
3.2.2 阶跃型光纤的标量近似分析	43
3.2.3 渐变型光纤的光线理论分析	46
3.3 光纤的传输特性	48
3.3.1 光纤损耗	48
3.3.2 光纤色散	51
3.3.3 光纤可用频谱	54
3.4 常用单模光纤	54
3.4.1 常规单模光纤	54
3.4.2 色散位移光纤(DSF)	55
3.4.3 非零色散光纤(NZDF)	55
3.4.4 色散平坦光纤(DFF)	56
3.4.5 色散补偿光纤(DCF)	56
3.5 光纤的非线性效应	56
3.5.1 自相位调制与交叉相位调制	57
3.5.2 四波混频	57
3.5.3 受激布里渊散射	58
3.5.4 受激拉曼散射	58
习题	59
第 4 章 光通信器件	61
4.1 半导体激光器	61
4.1.1 半导体激光器原理	61
4.1.2 激光器的基本组成	64
4.1.3 半导体激光器的机理	65
4.1.4 制作激光器的材料	67

4.1.5 F-P腔激光器	68
4.1.6 量子阱半导体激光器	69
4.1.7 分布反馈激光器	70
4.1.8 半导体激光器的工作特性	71
4.1.9 光纤通信使用的激光器	74
4.1.10 固体蓝光激光器	74
4.2 半导体发光二极管(LED)	76
4.2.1 LED工作原理	76
4.2.2 LED工作特性	76
4.3 光放大器	76
4.3.1 概述	76
4.3.2 光放大器分类	78
4.3.3 掺铒光纤放大器(EDFA)	78
4.3.4 拉曼光纤放大器(SRA)	82
4.3.5 半导体光放大器	84
4.3.6 其他光放大器	86
4.4 光检测器	87
4.4.1 半导体的光电效应	87
4.4.2 PIN光电二极管	88
4.4.3 雪崩光电二极管	89
4.4.4 光检测器性能参数	90
4.4.5 光检测器噪声	91
4.5 其他光通信器件	92
4.5.1 连接器	92
4.5.2 光纤耦合器	94
4.5.3 光滤波器	95
4.5.4 光衰减器	97
4.5.5 光开关	98
4.5.6 光隔离器与光环行器	99
4.5.7 波分复用器/解复用器	100
4.5.8 调制器	102
习题	105

第 5 章 光纤通信系统 106

5.1 数字光纤通信系统	106
5.1.1 数字光纤通信系统的基本组成	106
5.1.2 数字光发送机	107
5.1.3 数字光接收机	111
5.1.4 强度调制-直接检波光纤数字通信系统	114
5.1.5 SDH 光纤通信系统	119
5.1.6 数字光纤通信系统设计	127
5.1.7 数字光纤通信系统的可靠性	133
5.2 模拟光纤通信系统	136
5.2.1 模拟光纤通信系统组成	136
5.2.2 模拟信号的强度调制	137
5.2.3 模拟基带直接光强调制光纤传输系统	139
5.2.4 多信道模拟光纤传输系统	142
5.3 波分复用(WDM)光纤传输系统	143
5.3.1 WDM 概述	143
5.3.2 WDM 系统的基本形式	145
5.3.3 WDM 系统组成	146
5.3.4 WDM 系统规范	147
5.4 光孤子通信系统	150
5.4.1 光孤子通信原理	150
5.4.2 光孤子通信系统组成	152
5.4.3 光孤子通信的关键技术	153
5.5 相干光通信系统	154
5.5.1 相干光通信原理	154
5.5.2 相干光通信系统组成	155
5.5.3 相干光通信的优点	156
5.5.4 相干光通信的关键技术	156
习题	157

第 6 章 光网络 158

6.1 光网络概述	158
6.1.1 通信网络的发展	158
6.1.2 通信网络分层模型	159
6.1.3 光传送网与全光网络	159

6.1.4 光传送网的分层结构	160
6.2 SDH 传送网	161
6.2.1 SDH 传送网分层模型	161
6.2.2 SDH 传送网物理拓扑结构	163
6.2.3 SDH 传送网的保护技术	164
6.2.4 SDH 组网	172
6.2.5 SDH 网络管理	173
6.3 WDM 光传送网	178
6.3.1 WDM 与光传送网	178
6.3.2 WDM 传送网的优点	178
6.3.3 光分插复用器(OADM)	179
6.3.4 光交叉连接(OXC)	183
6.3.5 光交换技术	186
6.3.6 波长转换技术	189
6.3.7 WDM 网络管理	192
6.4 光接入网	194
6.4.1 光接入网的基本概念	194
6.4.2 光接入网的分类	196
6.4.3 光接入网的拓扑结构	197
6.4.4 光纤以太网	198
6.4.5 无源光网络(PON)	205
6.4.6 混合光纤同轴网(HFC)	209
6.5 光因特网(IP over WDM)	213
6.5.1 什么是光因特网	213
6.5.2 IP over X	214
习题	216
第7章 无线激光通信	217
7.1 大气激光通信	217
7.1.1 大气激光通信概述	217
7.1.2 激光在大气信道中的传播特性	221
7.1.3 大气激光通信的关键技术	226
7.1.4 大气激光通信系统	232
7.2 水下激光通信	234
7.2.1 水下激光通信的应用	234

7.2.2 海水信道	235
7.2.3 海水信道的损耗特性	238
7.2.4 固体蓝光激光器	239
7.2.5 对潜蓝绿激光通信系统	241
7.3 卫星激光通信	242
7.3.1 卫星通信概述	242
7.3.2 卫星激光通信系统简介	243
7.3.3 自由空间的光传播	244
7.3.4 星间激光通信中的光学天线	246
7.3.5 星间激光通信中的 PAT 系统	248
7.3.6 星间激光通信系统	250
习题	251
参考文献	252

第1章 光通信概述

1.1 光波的电磁频谱

图 1-1 给出了电磁波谱图,图 1-2 给出了光的波谱图,显然光是频率极高的电磁波,光波的频率范围极宽,为 $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz。紫外线、可见光、红外线均属于光波的范畴,在通信容量上要比微波大 3 个以上数量级,其带宽可达 THz · km,因此用光来作为信息载体,可传输极宽的信号频谱。

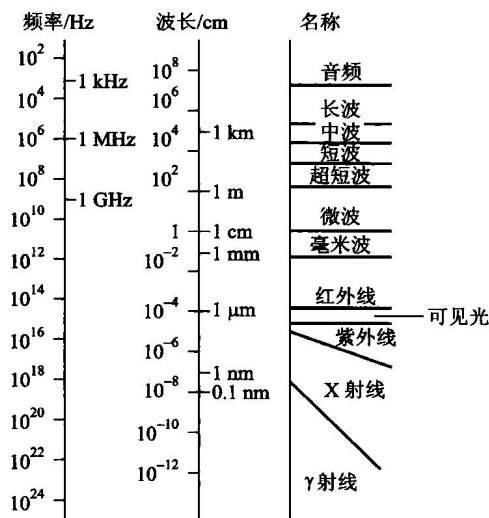


图 1-1 电磁波谱图

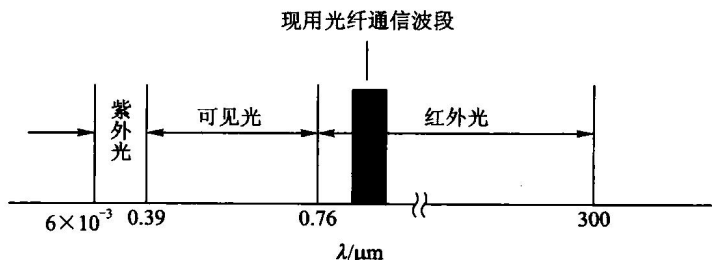


图 1-2 光的波谱图

红外线波段(波长大于 $0.76\text{ }\mu\text{m}$)的波长比人眼实际可见的光的波长要长得多,可细分为近红外(波长为 $0.76\sim 15\text{ }\mu\text{m}$)、中红外(波长为 $15\sim 25\text{ }\mu\text{m}$)和远红外(波长为 $25\sim 300\text{ }\mu\text{m}$)。该波段主要用于光波通信、红外制导、电子摄像及天文学等领域。

可见光波段(波长为 $0.39\sim 0.76\text{ }\mu\text{m}$)就是人眼实际可见的波长,像自然光源(如太阳光)和白炽灯、日光灯以及许多激光源(如 He-Ne 激光器)等装饰性的人造光源,它们发出的光都是人眼可见的光。

紫外线波段(波长小于 $0.39\text{ }\mu\text{m}$)的波长比人眼实际可见的光的波长要短得多,该波段目前很少应用于通信。

目前光纤通信采用的波长在近红外波段。已开发的有 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 三个波段。

1.2 光通信发展

光通信可追溯到 3 000 年前我国古代的烽火台。1791 年,法国人发明了信号灯,利用“灯语”的通信,曾经在欧洲风行一时。17 世纪中叶发明的望远镜,极大地延长了目视光通信的距离。至今,信号灯、旗语、望远镜都是仍在应用的目视光通信手段,严格地讲,它们还不能算是真正的光通信,与现代光通信有很大差别。

现代光通信起源于 1881 年贝尔发明“光电话”。贝尔发明的“光电话”以日光为光源,大气为传输介质,传输距离是 200 m。1881 年,贝尔发表了著名的论文《关于利用光实现声音的产生与复制》。遗憾的是贝尔的光电话始终未得到实用,究其原因:一是没有可靠、高强度的光源;二是没有稳定、低损耗的传输介质,无法实现高质量的光通信。在此后的几十年里,由于上述两个问题未能很好地得到解决,同时也由于电通信的高速发展,光通信的研究曾一度沉寂。这种情况一直延续到 20 世纪 60 年代。

1960 年,世界上的第一台激光器(红宝石激光器)问世。由于激光器可产生频谱纯度很高的光波,因此,激光器的发明重新激发了世界性的光通信研究热潮,给沉寂已久的光通信研究注入了新的活力。但由于气体激光器和固体激光器体积大、效率低,因此不适合在光通信中应用。

1962 年,半导体激光器问世。虽然这种早期的 PN 结砷化镓(GaAs)半导体激光器只能在液态氮制冷低温条件下工作很短的时间,但它给光通信光源的研究和实用带来了希望。

1970 年,首次研制出在室温下连续工作的双异质结半导体激光器,为通信光源的应用奠定了坚实的基础。

从第一台激光器问世以来,激光通信的研究是从大气光通信开始的。大气光通信以大气作为传输介质。大气光通信的缺点是传输损耗大,受气候环境影响严重,传输性能不稳定,且设备费用很高,目前在星间光通信和短距离的宽带光接入得到了广泛的应用。

在研究大气光通信的同时,人们进行了各种光波导的研究,特别是光导纤维(简称光纤)。光纤通信的原理是将光束束缚在光纤的内部,以全反射方式来实现光波的传输。但当时作为光导纤维材料的石英玻璃损耗很大。20世纪60年代中期,人们发现石英玻璃的损耗高达 $1\,000\text{ dB/km}$ 。

1966年,英国标准电信研究所的华裔科学家高锟博士发表了一篇划时代的论文,提出利用带有包层材料的石英玻璃光纤作为光通信的传输介质。并指出:光导纤维的高损耗不是其本身固有的,而是由材料中所含有的杂质引起的。如果降低材料中杂质含量,便可大大降低光纤损耗。他还预言,通过降低材料的杂质含量和改进制造工艺,可使光纤的衰减下降到 20 dB/km ,甚至更小。这为人们研究低损耗光纤指明了前进的方向。

1970年,美国康宁(Corning)公司研制出了衰减为 20 dB/km 的低损耗石英光纤。这是光通信发展史上的一个划时代的事件,从而确立了光通信向光纤通信发展的方向,开启了光纤通信发展的新时代。

20世纪70年代后,光纤通信技术成为了光通信的主流技术,90年代光纤通信得到了飞速发展。目前除了用户线以外,光纤通信已完全取代了传统的电缆通信,成为通信网的主体,由此人类进入了光通信时代。

目前光纤通信得到了极其广泛的应用,它成为国民经济各个领域(例如电信、广播、电力、交通、军事等)的主要通信手段。可以毫不夸张地讲,光纤通信已经成为现代通信的支柱。

1. 第一代光纤通信系统

1978年,第一代光纤通信系统($0.85\text{ }\mu\text{m}$ 多模光纤通信系统)正式投入商业应用。光源为半导体激光器(GaAlAs LD)或发光二极管(LED),工作波长为 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 。光电探测器硅光电二极管或硅雪崩光电二极管。信道为均匀多模光纤,其衰减系数为 $2.5\sim 4\text{ dB/km}$,信息传输速率为 $20\sim 100\text{ Mbit/s}$,最大中继距离约为 10 km ,最大通信容量约为 $500(\text{Mbit/s})\cdot\text{km}$ (通信系统的通信容量通常用信息传输速率与距离积 BL 表示。其中, B 为信息传输速率, L 为中继间距)。

2. 第二代光纤通信系统

20世纪80年代初,第二代多模光纤通信系统问世。光源为半导体激光器,工作波长为 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 。该波段是石英系光纤的第二个低损耗窗口,有较低的损耗和最低的色散。光电探测器为锗光电二极管或锗雪崩光电二极管。信道为均匀多模光纤。由于多模光纤存在模间色散,因此多模光纤通信系统的信息传输速

率低于 100 Mbit/s。由于单模光纤比多模光纤具有更小的色散和更低的损耗,因此采用单模光纤可进一步提高光纤通信系统的信息传输速率和中继距离。1987 年,第二代单模光纤通信系统(1.3 μm 单模光纤通信系统,也称为长波光通信系统)投入了商业应用,其信息传输速率高达 1.7 Gbit/s,中继距离为 50 km 左右。

3. 第三代光纤通信系统

1990 年,第三代光纤通信系统已能提供商业应用。光源为铟镓砷磷(InGaAsP)半导体激光器。光电探测器为锗光电探测器。信道为单模光纤(工作波长为 1.55 μm)。该单模光纤通信系统也称为长波光通信系统。1.55 μm 波段也是石英光纤的第三个低损耗窗口,到 1979 年,1.55 μm 波段的光纤损耗可达到 0.2 dB/km。由于在 1.55 μm 处光纤的色散比较高,且当时的多纵模常规 InGaAsP 半导体激光器的谱宽问题还未得到解决,因而推迟了第三代光纤通信系统的问世。后来,由于在波长为 1.55 μm 附近,具有最小色散的色散位移 DSF (Dispersion - Shifted Fiber) 单模光纤和单纵模激光器的研制成功,从而解决了 1.55 μm 光纤的色散问题和半导体激光器的谱宽问题,1990 年第三代光纤通信系统开始投入商业运营。第三代光纤通信系统的信息传输速率为 2.5 Gbit/s,中继距离大于 100 km。目前信息传输速率为 10 Gbit/s 的光纤通信系统正在得到广泛的发展和应用。

4. 第四代光纤通信系统

第四代光纤通信系统是指相干光纤通信系统,相干光纤通信系统是利用激光的相干性,可将电通信中采用的“外差”接收(或“零差”接收)和先进的调制方式(例如调幅键控 ASK、相移键控 PSK、频移键控 FSK)应用到光纤通信系统中。相干光纤通信系统的优点是灵敏度高(比 IM - DD 光纤通信系统约高出 20 dB)和频率选择性好,可用于长途干线通信。目前在实验室使用常规相干技术,实现了 2.5 Gbit/s、4 500 km 和 10 Gbit/s、1 500 km 的数据传输。

5. 第五代光纤通信系统

第五代光纤通信系统是指光孤子通信系统,光孤子通信是利用光纤非线性进行超大容量、超长距离的光纤通信方式。光孤子(Soliton)是一种特殊的波,在经过长距离传输后,仍能保持波形不失真,即使两列光孤子波相互碰触后,各自依然能保持原来的形状不变。

孤子这一概念首先是在流体力学中提出来的。1834 年,约翰·斯科特·拉塞耳首次观察到一种奇特的现象:一艘船在狭窄的苏格兰运河中快速行进,当其突然停止时,船头出现了一股水柱滚滚向前,水柱的形状不变,速度也不变,当它和其他幅度较低、速度较慢的波相遇时,该波也能不失真地穿过。于是,他用孤子的概念来描述这一现象。

在光纤通信系统中,光孤子是一个非常窄、强度高的光脉冲。光孤子的存在是光纤群速色(GVD)和自相位调制(SPM)平衡的结果。它的产生是由于在单模光纤中,当光的强度增加到一定程度时将出现非线性效应,其中光纤的自相位调制使光纤中传输的光脉冲波形中较高频率的分量不断积累,使波形变陡,在一定条件下,光纤中的这种非线性压缩可抵消因光纤群速色散(GVD)引起光脉冲的展宽,从而得到无畸变的光脉冲传输。此时,光脉冲的形状、宽度和速度将不再改变,故称为光孤子。

由于光孤子脉冲很窄(可达 0.2 ps),因此可实现超大容量、超长距离的光孤子通信。1973 年人们提出了光孤子通信的基本思想。1988 年贝尔实验室采用受激拉曼散射增益补偿光纤损耗,传输距离达 4 000 km,1989 年传输距离增加到 6 000 km。1989 年,掺铒光纤放大器(EDFA)开始用于光孤子放大。1990—1992 年,美国和相关英国的实验室采用循环回路方法,在数据传输速率为 2.5 ~ 5 Gbit/s 时,其传输达到 10 000 km 以上。日本的相关实验室在数据传输速率为 10 Gbit/s 时,其传输达到 1 000 000 km。1995 年,法国的相关实验室在数据传输速率为 20 Gbit/s 时,其传输了 1 000 000 km,中继距离 140 km。1995 年,线形试验将 20 Gbit/s 的数据传输了 8 100 km,40 Gbit/s 的数据传输了 5 000 km。1994 年和 1995 年,80 Gbit/s 和 160 Gbit/s 的高速数据也分别传输了 500 km 和 200 km。

6. 掺铒光纤放大器

在光纤通信发展史上另一个重要里程碑是掺铒光纤放大器(EDFA)的成功研制。1986 年英国南安普敦大学研制出了最早的掺铒光纤放大器。它是在光纤基质中加入铒粒子作激光工作物质,用氩离子激光器作泵浦源,可对 1.55 μm 光信号进行直接放大。由于氩离子激光器很笨重,因此用它作为泵浦源的光纤放大器是不可能在光纤通信中得到实用的,但它能直接对 1.55 μm 波长的光信号进行放大,这本身就对光纤通信的发展具有十分重大的意义。因为在此之前,由于不能直接放大光信号,所有的光纤通信系统都只能采用光-电-光的中继方式。即先将光信号变为电信号,在电域内进行放大和再生等信息处理,然后再变成光信号在光纤中传输。光纤放大器可直接放大光信号,这就使全光通信变得可能,其意义可与 20 世纪 60 年代用晶体管代替电子管相提并论。

当作为掺铒光纤放大器泵浦源(0.98 μm 和 1.48 μm 的大功率半导体激光器)研制成功后,掺铒光纤放大器进入了实用化阶段。掺铒光纤放大器的意义不仅在于可进行全光中继,它还在很多方面推动了光纤通信的发展,例如在波分复用(WDM)光纤通信系统中的应用。波分复用是在一根光纤上传输多个光信道,从而可充分地利用光纤的带宽资源,有效地扩展光纤的通信容量。由于掺铒光纤放大器具有极宽的带宽(约 40 nm),可覆盖整个波分复用信号的频带,因而