

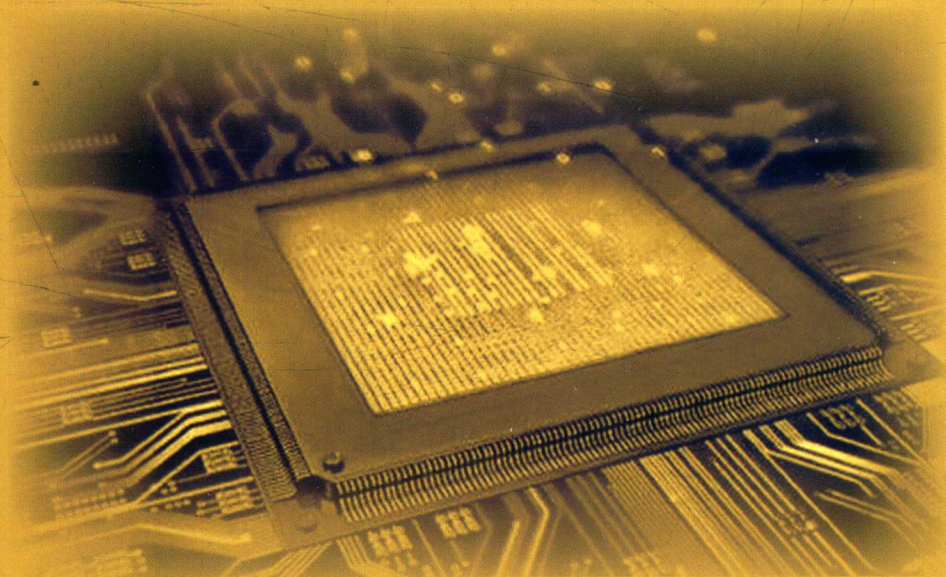
“十二五”国家重点图书出版规划项目：光通信技术丛书

光有源器件 原理与技术

主 编◎胡毅

副主编◎金琦 陈苏 龙函 郭勇 廖振宇 陶志飞 冯枫

主 审◎毛谦



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

“十二五”国家重点图书出版规划项目：光通信技术丛书

光有源器件 原理与技术

主 编◎胡毅

副主编◎金琦 陈苏 龙函 郭勇 廖振宇 陶志飞 冯枫

主 审◎毛谦



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了光纤通信网络中的相关光有源器件的原理、性能与应用。主要阐述了光纤的传输特性,发光二极管、激光器、光探测器、光放大器、光发射和光接收模块的工作原理及特性,接入网、城域网、长途干线网和数据中心的网络组成以及光有源器件在其中的应用,光有源器件的发展方向、关键技术、可靠性以及防护和使用。

本书内容新颖、概念清晰、系统性和实用性强。书中既简要介绍了光纤通信和光网络、光有源器件的原理和特性,又简单介绍了光有源器件在光纤通信网络中的应用,理论与实际相结合。

本书可供光纤通信领域的工程技术人员参考,也可以作为高等院校光电子技术、光信息科学、通信工程与技术和电子信息工程专业课参考阅读教材。

图书在版编目(CIP)数据

光有源器件原理与技术 / 胡毅主编. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5635-4809-5

I. ①光… II. ①胡… III. ①发光器件 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 161850 号

书 名: 光有源器件原理与技术

著作责任者: 胡 毅 主编

责 任 编 辑: 张珊珊

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: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17

字 数: 422 千字

版 次: 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4809-5

定 价: 35.00 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 编 陶智勇 曾 军

副主编 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,武汉光纤通信技术有限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原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

光通信器件是光纤通信系统的基础和核心,同时也是光纤通信发展的关键,是该领域中具有前瞻性、探索性和先导性的战略必争高技术,代表了光通信技术领域的水平和能力。光通信器件可分为光有源器件和光无源器件,其中,光有源器件是光纤通信系统中将电信号转换成光信号、光信号转换成电信号或光信号转换成光信号(即不同能量形式之间发生转换)的关键器件,是光传输系统的核心,把握光有源器件关键技术发展的最新趋势对我国光有源器件发展至关重要。本书力图全面介绍各种光有源器件的基本原理、关键技术、特性以及应用。

本书共分为 8 章。第 1 章为光纤通信与光电器件,对光纤通信和光网络进行了概述,并详细介绍了光纤及其传输特性。第 2 章为发光二极管和激光器,详细介绍了发光二极管、半导体激光器的工作原理和特性,并简单地介绍了几种激光器。第 3 章为光探测器,介绍了光探测器的工作原理和基本参数,并对 PIN 和 APD 两种二极管的结构、工作原理、工作特性以及参数的测试方法做了详细的介绍。第 4 章为光发射和接收模块,对光发送模块和光接收模块的基本原理和各部分基本电路作了详细的介绍,并介绍了常用光模块的分类、光模块的指标及其测试方法。第 5 章为光放大器,重点介绍了掺铒光纤放大器、光纤拉曼放大器以及半导体光放大器的工作原理、工作特性以及应用。第 6 章为光有源器件的应用,简要介绍了长途干线网、城域网、接入网和数据中心的网络组成和关键技术,以及光有源器件在其中的应用。第 7 章为光有源器件的发展方向,对光有源器件的技术和发展方向进行了简单介绍。第 8 章为光有源器件可靠性、使用和防护,着重地介绍了发光二极管、激光器和光模块的可靠性、使用以及防护。

本书在注重系统性的同时,也涉及了一些关键的基础知识。本书由武汉邮电科学研究院胡毅高级工程师主编,金琦、陈苏、龙函、郭勇、廖振宇、陶志飞、冯枫、曹珍、龚格格等参加了本书的编写,对各位同事的大力支持和帮助,作者在此深表谢意。本书主要编写人员之一胡毅高级工程师一直从事高速光电模块产品开发长达十五年,主持完成多项国家“863”项目和产业化项目,项目成果形成系列化产品和大批量商用,曾获得湖北省科技进步一等奖 2 项、湖北省科技进步二等奖 1 项、中国通信学会二等奖 1 项、国家科技部重点新产品奖励 1

项,研究团队还获取 2007 年全国“五一劳动奖状”。

本书的读者对象是光纤通信领域中关心光有源器件发展的技术人员或技术类管理人员。本书也可作为光电子技术、光信息科学、通信工程与技术和电子信息工程等专业的教材或自学参考书。

由于作者水平有限,时间仓促,书中谬误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

武汉邮电科学研究院

目 录

第 1 章 光纤通信与光电器件	1
1.1 光纤通信概述	1
1.1.1 光纤通信的发展	1
1.1.2 光纤通信的优缺点	3
1.1.3 光纤通信的应用和发展趋势	5
1.2 光网络的现状与发展趋势	6
1.2.1 光网络的概念	6
1.2.2 光网络的发展状况	7
1.3 光纤	9
1.3.1 光纤结构及工作波长	9
1.3.2 光纤分类	10
1.3.3 几种单模光纤	12
1.3.4 光器件用特种光纤	14
1.3.5 不同光纤在各种条件下的应用	17
1.3.6 光纤的主要参数	17
1.4 光网络中的光器件	20
1.4.1 光纤通信系统	20
1.4.2 常见的光器件	22
1.4.3 光纤通信器件的研究与发展	23
第 2 章 发光二极管和激光器	27
2.1 光源基本要求	27
2.2 发光机理	29
2.2.1 发光机理	29
2.2.2 光增益	31
2.3 发光二极管	32
2.3.1 选用材料	32
2.3.2 基本结构	33

2.3.3 基本工作原理	36
2.4 发光二极管特性及其测试	36
2.4.1 LED 伏安特性及测试	37
2.4.2 LED 光特性及测试	37
2.4.3 LED 热特性及测试	40
2.5 半导体激光器	41
2.5.1 选用材料	41
2.5.2 基本结构	41
2.5.3 基本工作原理	43
2.5.4 半导体激光器种类	44
2.5.5 波长可调谐半导体激光器	50
2.6 LD 工作特性及其测试	53
2.6.1 LD 的电特性及测试	53
2.6.2 LD 的光特性及测试	55
2.6.3 LD 的热特性及测试	57
2.6.4 LD 测试系统	59
2.6.5 两种光源的比较	59
2.6.6 激光器的制作	61
2.7 光纤激光器	63
2.7.1 掺铒光纤激光器	63
2.7.2 光纤光栅分布反馈式激光器	64
第3章 光电探测器	65
3.1 光电探测器	65
3.1.1 基本要求	66
3.1.2 光电转换原理	66
3.1.3 光电探测器的材料和分类	68
3.2 光电探测器的基本参数	70
3.2.1 光电转换定律	70
3.2.2 光电探测器的基本参数	70
3.3 PIN 光电二极管	74
3.3.1 PIN 光电二极管的结构	74
3.3.2 PIN 光电二极管的工作原理	76
3.3.3 PIN 光电二极管的工作特性	77
3.4 雪崩光电二极管	77
3.4.1 雪崩光电二极管的结构	77
3.4.2 雪崩光电二极管的工作原理	79

3.4.3 雪崩光电二极管的工作特性	80
3.5 PIN 和 APD 的参数测试	81
3.5.1 参数测试	81
3.5.2 产品实例	85
3.6 MSM 和 QWIP 探测器	86
3.6.1 MSM 探测器	86
3.6.2 QWIP 探测器	87
第4章 光发射与光接收模块	88
4.1 光发射与光接收模块介绍	88
4.1.1 光发射模块	88
4.1.2 光接收模块	89
4.2 发射模块基本电路	90
4.2.1 激光二极管的特性	90
4.2.2 调制特性	90
4.2.3 激光二极管的驱动电路	92
4.2.4 自动功率控制电路	93
4.2.5 自动温度控制电路	93
4.3 接收模块基本电路	95
4.3.1 前置放大电路基本原理	95
4.3.2 自动增益控制电路	96
4.3.3 限幅放大器	96
4.3.4 时钟和数据恢复电路	97
4.4 常用光模块分类及应用	98
4.5 光模块指标及测试方法	103
4.5.1 光模块总体指标	103
4.5.2 发射模块指标及测试方法	104
4.5.3 接收模块指标及测试方法	107
4.6 高速光模块发展趋势	108
4.7 光模块基本工艺流程和常用工装设备	110
4.7.1 光模块基本工艺流程	110
4.7.2 部分常用工装设备及维护	114
4.8 光迅科技光模块	117
第5章 光放大器	124
5.1 光放大器概述及其分类	125
5.1.1 光放大器概述	125

5.1.2 光放大器的分类	125
5.2 典型的光放大器	126
5.2.1 掺铒光纤放大器	126
5.2.2 光纤拉曼放大器	148
5.2.3 光纤布里渊放大器	152
5.2.4 半导体光放大器	153
5.3 光放大器的性能比较	156
5.4 光迅科技的光放大器	158
5.4.1 基于 EDFA 与 RFA 的增益可调的混合光纤放大器	159
5.4.2 数字式 Hybrid 光放大器自动调试系统	164
5.4.3 用于下一代 ROADM 网络的 EDFA 阵列	169
5.5 光放大器的发展趋势	173
第 6 章 光有源器件应用	175
6.1 长途干线网的网络组成/关键技术/光模块实际应用介绍	175
6.1.1 关键技术	176
6.1.2 光模块实际应用介绍	181
6.2 城域网的网络组成/关键技术/光模块实际应用介绍	185
6.2.1 城域网网络组成	185
6.2.2 关键技术	186
6.2.3 光模块实际应用介绍	189
6.3 接入网的网络组成/关键技术/光模块实际应用介绍	190
6.3.1 接入网的定义	190
6.3.2 接入网的定界	190
6.3.3 光纤接入网组成	191
6.3.4 关键技术	192
6.3.5 光模块实际应用介绍	194
6.4 数据中心的网络组成/关键技术/光模块实际应用介绍	195
6.4.1 数据中心及网络结构	195
6.4.2 云计算数据中心	196
6.4.3 关键技术	198
6.4.4 光模块实际应用介绍	201
第 7 章 光有源器件的发展方向	203
7.1 光有源器件技术	204
7.1.1 40 Gbit/s 光模块产品与技术	204
7.1.2 100 G 光模块产品与技术	207

7.1.3 400 G 光收发模块的技术方案	212
7.1.4 1 T 技术展望	218
7.2 光有源器件的发展趋势	218
第 8 章 光有源器件可靠性、使用 and 防护	226
8.1 光有源器件可靠性、使用 and 防护概述	226
8.1.1 可靠性概述	226
8.1.2 光有源器件的使用 and 防护	228
8.2 发光二极管可靠性、使用 and 防护	228
8.2.1 发光二极管的可靠性	228
8.2.2 发光二极管的使用 and 防护	230
8.3 激光器可靠性、使用 and 防护	233
8.3.1 激光器的可靠性	233
8.3.2 激光器的使用 and 防护	235
8.4 光模块可靠性、使用 and 防护	238
8.4.1 光模块的可靠性	238
8.4.2 光模块的使用 and 防护	239
8.5 光器件通用可靠性要求和试验方法	240
8.5.1 光器件通用的可靠性要求	240
8.5.2 光器件的可靠性试验方法	241
参考文献	253

第 1 章

光纤通信与光电器件

1.1 光纤通信概述

光纤通信的诞生与发展是电信史上的一次重要革命。人类社会的信息化建设正在加速进行,作为现代通信的主要支柱之一,光纤通信在现代电信网中起着举足轻重的作用。光纤通信技术发展所涉及的范围,无论从影响力度还是影响广度来说都已远远超越其本身,并对整个电信网和信息业产生了深远的影响。它的演变和发展结果将在很大程度上决定电信网和信息业的未来大格局,也将对社会经济发展产生巨大影响。

光纤通信,就是以光波作为信息载体,以光纤作为传输媒介实现的一种通信方式。光纤是光导纤维的缩写,是一种由玻璃或者塑料为材料制作而成的纤维。光纤中的光利用“光的全反射”原理,借助发光二极管或注入型激光二极管等装置将光信号发出,沿光纤传播,光纤的另一端则用光电二极管作为检波器接收信号完成信息传输。

在光纤通信出现之前,人们的通信主要是电子通信,电子通信是以电磁波为载波,以铜双绞线、同轴电缆和微波等作为传输介质的通信方式。但这些通信方式存在传输损耗大、信号串扰、电磁干扰等问题,针对这些问题,人们一直在寻找相干光源和合适的传输介质,以达到提高通信质量的目的。

1.1.1 光纤通信的发展

1880年,贝尔发明了一种利用光波作载波传递话音信息的“光电话”,它证明了利用光波作载波传递信息的可能性。他利用太阳光作光源,大气为传输媒质,用硒晶体作为光接收器件,成功地进行了光电话的实验。

1958年12月15日,肖洛和汤斯在美国《物理评论》杂志上发表了题为《红外和光的微波激射》论文,该论文阐述了激光器的受激辐射光放大的基本原理。

1960年,美国科学家梅曼运用固体的红宝石做实验,研制成功世界上第一台红宝石激光器。梅曼将氙闪光灯发出的光照射在红宝石上,红宝石由于受激而发射出方向高度集中的强光束——激光。激光具有单色性好、方向性好、相干性好和亮度高等优点,是光通信的理想光源,它的出现是光通信发展的重要一步。第一台红宝石激光器的发明为现代各种激

光器的研制奠定了基础。光纤通信作为一门技术,其出现、发展的历史至今不过 50~60 年,但它已经给世界通信的面貌带来了巨大的变化。

1966 年,出生在中国上海的英籍华人高锟,发表论文《光频介质纤维表面波导》,提出用石英玻璃纤维(光纤)传送光信号来进行通信,可实现长距离、大容量通信,指出了利用光纤进行信息传输的可能性和技术途径,奠定了现代光通信——光纤通信的基础。高锟预言,只要在光纤制造中消除原料中的各种杂质,制造出低于 20 dB/km 衰减的光纤就可以实现光纤通信的目的。

1970 年,美国康宁公司首次研制成功在波长为 850 nm 的损耗为 20 dB/km(光波沿光纤传输 1 km 后,光的损耗为原有的 1%)的石英光纤,它是一种理想的传输介质。同年,美国贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的镓铝砷(GaAlAs)双异质结半导体激光器(短波长)。虽然寿命只有几个小时,但它为半导体激光器的发展奠定了基础。从此,开始了光纤通信迅速发展的时代,因此人们把 1970 年称为光纤通信的元年。

1974 年,贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的方法,称作“改进的气相沉积法(MCVD)”,光纤损耗下降到 1 dB/km。

半导体激光器和光纤等光器件的成功使用揭开了光纤通信发展的历史。在之后的十几年里,光纤损耗逐渐下降到 0.2 dB/km,接近了光纤最低损耗的理论极限。伴随光纤性能改善的同时,光纤通信用的半导体激光器的使用寿命达到 10 万小时,发射波长为 1 310 nm 和 1 550 nm 的连续振荡半导体激光器也相继研制成功。

由于光电子器件、光纤技术以及系统技术的不断完善和更新,长距离、超高速、大容量的光纤通信系统乃至全光光纤通信系统从实验室逐步进入工程实施阶段。

1976 年,世界上第一个波长 850 nm 的多模光纤通信系统在美国亚特兰大的地下管道中诞生,这个通信系统的传输速率为 44.736 Mbit/s,传输距离达 110 km。

不久人们发现了光纤的第 2 个低损耗窗口,光纤系统工作在 1 310 nm 时,光纤损耗小于 1.0 dB/km,色散较低,可大大增加无中继传输距离。采用 1 310 nm 的 InGaAs 半导体激光器,实现了波长 1 310 nm、速率限制在 100 Mbit/s 以下的多模光纤通信系统,无中继传输距离可以达到 20 km。

光纤研究人员发现,光纤系统工作在波长 1 310 nm 附近时,光纤损耗不能低于 0.3 dB/km,系统无中继传输距离受到限制。而工作在光波长 1 550 nm 附近,光纤最低损耗只有 0.2 dB/km,但在 1 550 nm 有高的光纤色散,而且半导体激光器可以使光谱展宽。

20 世纪 80 年代研究发现,色散问题可以采用色散位移单模光纤等方法来解决,光谱展宽问题也可以采用单纵模激光器来克服。1981 年实现了两电话局间使用 1 310 nm 多模光纤的通信系统。1984 年实现了 1 310 nm 单模光纤的通信系统。1985 年,单模光纤通信系统经试验,传输速率达到 4 Gbit/s,无中继传输距离约为 100 km。到了 1987 年时,一个商用光纤通信系统的传输速率已经高达 1.7 Gbit/s,比第一个光纤通信系统的速率快了将近四十倍,中继器距离可以达 50 km。1991 年,工作于 2.5 Gbit/s 的 1 550 nm 单模光纤通信系统已经提供商用系统,而且中继器的间隔可达到 100 km 远。从图 1.1 中,可以清楚看从 1974 年到 1991 年间光纤通信发展的时间表。

为了克服光纤损耗的影响,增加无中继传输距离,1986 年制作成功最初的掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)。EDFA 不仅可以直接放大光信号,实现全光

中继,而且 EDFA 在波分复用(Wavelength Division Multiplex, WDM)光纤通信中应用,发挥了特殊的作用。波分复用是在一根光纤上传输多个光信道,从而充分利用光纤带宽,有效扩展通信容量。由于 EDFA 具有高增益、宽带宽、偏振无关、噪声小和接入方便等优点,解决了光纤传输衰减的补偿问题。EDFA 具有约 40 nm 的极宽带宽,可覆盖整个波分复用信号的频带,因而一只掺铒光纤放大器可以取代 WDM 所有信道需用的大量光/电/光中继器,实现全光中继。这极大地降低了设备成本,提高了传输质量。EDFA 和 WDM 的发展让光纤通信系统的容量以每六个月增加一倍的方式大幅跃进,到了 2001 年时已经达到 10 Tbit/s 的惊人速率,足足是 20 世纪 80 年代光纤通信系统的 200 倍之多。EDFA+WDM 成为高速光纤通信发展的主流,也是超大容量超长距离光纤传输系统的主要方式。

2015 年,武汉邮电科学研究院牵头承担的国家 973 项目“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”项目取得了最新成果——高达 200 Tbit/s 超大容量波分复用及模分复用的光传输实验获得成功。该成果是继 100.23 Tbit/s 超大容量传输 80 公里实验入选两院院士评出的 2014 年国内十大科技进展新闻之后的又一重要突破。

在常规的线性光纤通信系统中,光纤损耗和色散是限制其传输容量和距离的主要因素。由于光纤制作工艺的不断提高,光纤损耗已接近理论极限,因此光纤色散已成为实现超大容量、超长距离光纤通信的“瓶颈”,亟待解决。人们用了一百多年的时间来探讨,发现由光纤非线性效应所产生的“光孤子”可以抵消光纤色散的作用,利用“光孤子”进行通信,可以很好解决这个问题,从而形成了新一代光纤通信系统,也是 21 世纪最有发展前途的通信方式。

光通信在超长距离、超大容量发展进程中,遇到了光纤损耗和色散的问题,限制了其发展的空间。科学家和业内人士受自然界的启发,发现了特殊的光孤子波。人们设想在光纤中波形、幅度、速度不变的波就是光孤子波,也就是指经过长距离传输而保持形状不变的光脉冲。利用光孤子传输信息的新一代光纤通信系统,真正做到全光通信,无须光/电、电/光转换,可在超长距离、超大容量传输中大显身手,是光通信技术上的—场革命。

光具有波粒二重性,现有的光通信系统只基于光信号的波动性。在量子光通信的分析基础上,提出了基于粒子性的量子光纤通信系统,并提出了一种新的量子高速调制方式——利用光孤子调制量子态。量子光通信是光通信技术的一种,利用光在微观世界中的粒子特性,让一个个光子传输“0”和“1”的数字信息。理论上说,可以传输无限量的信息,但由于传输过程中的衰减,量子通信速度会比现在通信速度快得多。如果能把光的量子性成功用于通信,将使人类通信再次发生根本性的变革。

1.1.2 光纤通信的优缺点

由于光纤通信是利用光导纤维传输光信号来实现通信的,因此,比起其他通信方式有明显的优越性。光纤具有传输容量大、传输损耗小、重量轻、抗电磁干扰等一系列优点。

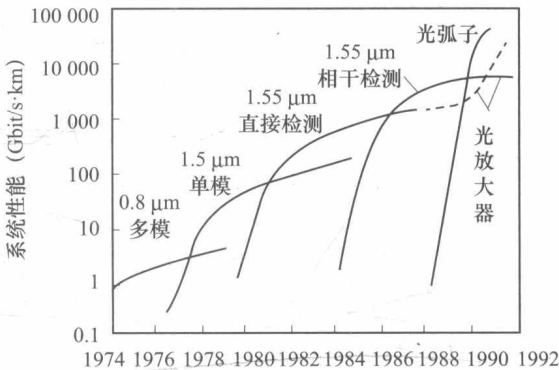


图 1.1 光纤通信发展时间表

(1) 传输容量大

光纤通信系统的传输容量取决于光纤特性、光源特性和调制特性。目前,光纤通信系统中使用的是 SiO_2 的光纤。光纤的波长范围是在近红外区,波长在 $800 \sim 1\,600\text{ nm}$,在 850 nm , $1\,310\text{ nm}$ 和 $1\,550\text{ nm}$ 附近,光传输衰减小,为光纤通信工作的三个波段。由于光纤工作频率很高,可利用的频带很宽。另外还采用各种复杂技术大大地增加了光纤传输的容量。 100 Gbit/s 的光纤通信系统已经大规模商用。在实验室中,2011 年 10.7 Tbit/s ($96 \times 112\text{ Gbit/s}$) PDM-RZ-QPSK 信号无电再生传送的最大距离已达到 $10\,608\text{ km}$;2012 年单纤最大系统容量达 102.3 Tbit/s ,传输距离 240 km 。

(2) 传输损耗小、中继距离长

目前单模光纤在 $1\,310\text{ nm}$ 波长窗口损耗为 0.35 dB/km , $1\,550\text{ nm}$ 波长窗口损耗达到 0.2 dB/km 以下,而且在相当宽的频带内各频率损耗几乎一样。因此,光纤比同轴电缆或者波导管的中继距离长得多,配以适当的光发送和接收设备,其中继距离可以达到一千公里以上。对于一个长途传输线路,由于中继站数目的减少,系统成本和复杂性可大大降低。

(3) 保密性能好

光在光纤中传输时,向外泄漏的光能很微弱,难以被窃听。因此比无线、有线通信的保密性好,信息在光纤中传输非常安全。保密性能好这一点,对军事、政治和经济都有重要的意义。

(4) 抗电磁干扰能力强

光纤原材料是由石英制成的绝缘体材料,不易被腐蚀,而且绝缘性好。与之相联系的一个重要特性是光波导对电磁干扰的免疫力,它不受自然界的雷电干扰、电离层的变化和太阳黑子活动的干扰,也不受人为释放的电磁干扰,还可用它与高压输电线平行架设或与电力导体复合构成复合光缆。这一点对于强电领域的通信系统特别有利。由于能免除电磁脉冲效应,光纤传输系还特别适合于军事应用。

(5) 光纤细小、质量轻、柔软

在传输同样信息量时,光缆的重量比其他通信电缆重量轻得多,连同等容量电缆的千分之一都不到。每根光纤的直径很小,约为 0.1 mm ,制成光缆后,8 根芯光缆的横截面直径约为 10 mm ,可以充分利用地下管道。有二次套塑的光纤,即使以几毫米的曲率半径弯曲也不会断,施工以采用与电缆相同的敷设技术进行敷设。通信设备的重量轻和体积小,对军事、航空和宇宙飞船等方面的应用具有特别重要的意义。

(6) 原材料资源丰富,节约金属材料

光纤的材料主要是二氧化硅,在地球上取之不尽、用之不竭的原材料,而制造同轴电缆和波导管的铜、铝、铅等金属材料,地球上的储存量是有限的。制造与光纤同等容量电缆的重量是光纤的千倍以上。光纤取代电缆,可以节约大量的金属材料,对合理使用地球资源有着重大的意义。

当然,光纤系统也存在一些不足。

(1) 光纤弯曲半径不宜过小

如果光纤弯曲半径太小,将引起光的传播途径的改变,光从纤芯透射到包层,甚至可能穿过包层向外泄漏。

(2) 光纤的切断和连接操作相对复杂

光纤的切断和连接需要使用专用工具来完成,其中还需要运用相应设备进行检测,光纤