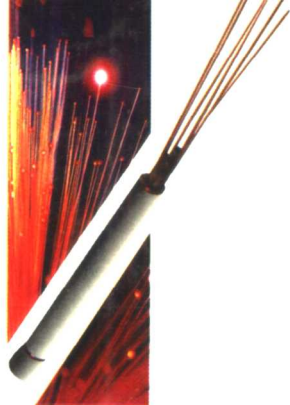


光纤通信新技术

丁么明 著

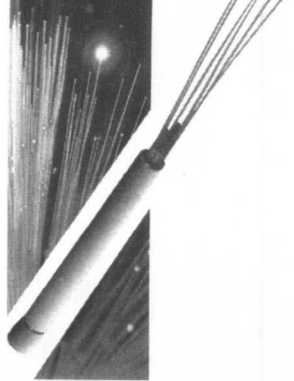
GUANGXIAN TONGXIN XINJISHU

湖北科学技术出版社



TN929.1
15

光纤通信 新技术



丁么明 著

GANGXIANDONGXINGXINJISHU

湖北科学技术出版社

内 容 简 介

本书以波导光学为线索,着重介绍了 20 世纪 90 年代中期发展起来的光纤通信新技术、新器件和新型系统,系统阐述了集成光电子学、光波分复用技术、阵列波导光栅复用器件、光时分复用技术、光孤子通信技术、全光通信网络等。书中反映了世纪之交光通信技术的最新研究成果。本书力求理论上的系统性,技术上的时效性。

本书可作为相关专业高年级大学生和研究生相关课程的教学参考书,也可供有关专业技术人员、涉足交叉学科的大学教师 and 科技工作者参考。

前 言

光导纤维是现代通信网络中传输信息的最佳媒质。光纤通信是信息社会的支柱,近 10 年来,光纤通信有了长足的发展,在人类向信息化社会过渡的过程中扮演着十分重要的角色。正如有关权威人士所说:纵观影响当今电信业的主要技术,很少有像光纤和光波传输系统那样能够引发如此剧烈的变革。光纤通信的发展和应用,从一开始就显示出了无比的优越性,获得了迅速的发展,光纤通信的新技术不断涌现,使通信行业发生了翻天覆地的变化。

20 世纪 90 年代中期以前推出的光波系统是以电时分复用为基础的单信道系统,借助于这样的系统,将速率每 5 年提高了 9 倍。WDM 技术和 EDFA 的实用化使之如虎添翼,面目一新。1996 年首次实现了太比特每秒的传输,同时也使建立以波长路由为基础、具有高度灵活性和生存性的 WDM 全光通信网成为可能。光交叉连接,光波分复用的概念应运而生,并很快进入了 WDM 光网络的现场试验。与此同时,新型的光电器件、新兴的复用技术和新型的传输系统也层出不穷,获得了迅速的发展。

作者从攻读硕士开始一直从事光纤通信技术的研究,近几年公开发表 20 多篇论文,其中该方向论文 10 多篇。为了能够反映光纤通信当前的发展水平,跟踪世界光纤通信新技术的发展,比较系统地介绍光纤通信技术、器件的最新成果,及时与广大科学研究人员和高等院校师生交流,作者经过一年多的艰苦工作,终于完成

了本书,并以此献给对光纤通信新技术感兴趣的读者。

本书共6章。第1章作为本书的基础部分,简略介绍了光纤通信系统的构成,光纤传输的特性,非线性光学效应及光电子集成技术。第2章至第5章着重讨论了光波分复用新技术、光时分复用新技术、复用新器件和光孤子通信系统,结合作者几年来的研究,突出了AWG在光复用技术中的应用。第6章介绍了全光通信技术,主要讨论了WDM、TDM等在全光通信中应用的理论及实际问题。

本书在撰写过程中得到了博士后张国平教授的具体指导,他为本书提供了部分国内外最新的研究资料;华中科技大学叶嘉雄教授、北京工业大学张凤言教授为本书的撰写提出了许多有益的指导性意见,对提高本书的质量起了十分重要的作用。作者准备书稿的过程中得到了孝感学院院系领导的大力支持。我的多位同事与作者多次讨论书稿事宜,为本书的顺利出版做了大量的工作。

景文萍、李良庭两位同志为本书的文字、部分图表的计算机录入和校对做了大量工作。湖北科学技术出版社李海宁先生不仅对本书的编辑做了大量的工作,而且对书稿提出了改进和修正意见。

孝感职业技术学院林风华同志参与了本书的第1章的部分内容和附录的编写工作。

在此,对以上所有同志谨致以最衷心的感谢!

由于光纤通信技术的发展十分迅速,加之撰写时间有限,作者知识的缺陷,书中不足及错误之处,敬请专家和读者批评指正。

丁么明

2001年7月

目 录

第 1 章 光纤通信引论	(1)
1.1 光纤通信的发展	(1)
1.1.1 光纤通信的进程	(2)
1.1.2 光纤通信的发展趋势	(4)
1.2 光纤通信系统	(6)
1.2.1 光纤通信系统组成	(6)
1.2.2 光纤通信主要器件介绍	(8)
1.3 光纤传输特性	(10)
1.3.1 光脉冲传输的基本方程	(10)
1.3.2 带宽和色散	(12)
1.3.3 光纤的损耗	(16)
1.4 光纤通信的非线性光学效应	(18)
1.4.1 非线性光学效应	(18)
1.4.2 受激散射及其对光纤通信的影响	(21)
1.4.3 非线性折射率调制引起的非线性光学效应	(26)
1.5 光纤的色散补偿技术	(28)
1.5.1 负色散光纤补偿	(29)
1.5.2 预啁啾技术	(31)
1.5.3 色散支持传输法	(33)
1.5.4 频谱反转法	(33)

1.5.5	啁啾光栅滤波器	(36)
1.6	光电子集成技术	(37)
1.6.1	光电子集成技术	(37)
1.6.2	砷化镓光电子集成工艺	(38)
1.6.3	铟化铅光电子集成工艺	(39)
1.6.4	SiO ₂ 光波导集成器件工艺	(40)
1.6.5	完全集成的 OEIC	(42)
1.6.6	OEIC 的应用前景	(43)
第 2 章	光波分复用技术	(44)
2.1	光波分复用系统	(44)
2.1.1	WDM 系统的基本形式	(45)
2.1.2	WDM 系统的构成	(46)
2.1.3	WDM 技术的主要特点	(47)
2.1.4	波分复用、密集波分复用与光频分复用	(49)
2.2	波分复用器件	(50)
2.2.1	F—P 腔型光滤波器	(50)
2.2.2	马赫—泽德型光滤波器型光滤波器	(58)
2.2.3	光栅波分复用器	(61)
2.3	WDM 系统的解复用与信道串音	(65)
2.3.1	信道选择光滤波器的参数设计和选择能力	(66)
2.3.2	直接光解复用光放大 WDM 系统中的串音	(67)
2.3.3	相干解复用密集 WDM 系统中的串音	(71)
2.4	WDM 多信道光波系统的非线性串音	(73)
2.4.1	受激喇曼散射(SRS)	(73)
2.4.2	受激布里渊散射(SBS)	(75)
2.4.3	交叉相位调制(XPM)	(76)
2.4.4	四波混频(FWM)	(77)
2.5	副载波复用(SCM)光波系统	(78)
2.5.1	副载波复用的特点	(79)

2.5.2	模拟 SCM 光波系统	(80)
2.5.3	相干 SCM 光波系统	(87)
2.5.4	多波长 SCM 光波系统	(92)
2.6	WDM 系统的技术规范	(95)
2.6.1	集成式和开放式系统	(96)
2.6.2	工作波长区的选择	(98)
2.6.3	光接口分类	(99)
2.6.4	光接口参数	(101)
2.6.5	性能要求	(101)
2.6.6	光监控通路(OSC)要求	(102)
2.6.7	WDM 系统的保护	(103)
2.6.8	安全要求	(104)
2.6.9	单纤双向传输	(106)
第 3 章	阵列波导光栅波分复用器	(107)
3.1	阵列波导光栅复用器构成及工作原理	(107)
3.2	阵列波导光栅理论	(112)
3.2.1	阵列波导光栅的色散	(112)
3.2.2	自由光谱范围	(114)
3.2.3	频率响应	(115)
3.3	阵列波导光栅复用器传输特性	(117)
3.3.1	阵列波导光栅的串音	(117)
3.3.2	插入损耗	(119)
3.3.3	脉冲展宽	(121)
3.4	平面阵列波导楔形优化设计	(124)
3.4.1	优化数学模型的建立	(124)
3.4.2	Bloch 模的传播能	(128)
3.4.3	优化设计	(131)
3.4.4	实例及结论	(137)
3.5	4×4 阵列波导光栅波分复用器的设计与分析	(138)

3.5.1	4×4AWG 设计	(138)
3.5.2	工作波长的选择	(140)
3.5.3	AWG 特征参数	(141)
3.6	阵列波导光栅的应用	(143)
3.6.1	光上路/下路器 ADM	(143)
3.6.2	光分束器/路由器	(145)
第 4 章	光时分复用技术	(148)
4.1	光时分复用系统复用基本原理	(148)
4.1.1	取样和光发射	(149)
4.1.2	定时	(149)
4.1.3	复合	(151)
4.2	光时分复用系统解复用原理	(152)
4.3	光时分复用系统高比特率传输技术	(155)
4.3.1	超窄光脉冲的产生与调制技术	(155)
4.3.2	光全定时提取技术	(156)
4.3.3	时分复用传输帧效率	(158)
4.4	光时分复用高比特率传输实验	(159)
4.5	光时分复用系统的新进展	(162)
第 5 章	光纤孤子通信	(166)
5.1	光孤子及其特性	(166)
5.1.1	非线性薛定谔方程	(167)
5.1.2	NSE 的解及其性质	(168)
5.1.3	暗孤子	(170)
5.2	光纤损耗与光孤子能量补偿放大	(173)
5.2.1	损耗导致的脉冲展宽与面积定理	(173)
5.2.2	光纤损耗的补偿放大与全光中继	(175)
5.2.3	延长放大器间距的预加重方法	(178)
5.3	光孤子系统的通信容量及其限制因素	(180)
5.3.1	ASE 噪声与光孤子系统的通信容量	(181)

5.3.2	孤子相互作用与通信容量	(183)
5.3.3	光孤子源频率啁啾的影响	(186)
5.3.4	高阶效应对光孤子传输的影响	(189)
5.4	光纤孤子的传输控制	(191)
5.4.1	ASE 限制的频域滤波控制	(192)
5.4.2	光孤子传输的时域控制	(195)
5.5	多信道光孤子系统	(198)
5.5.1	多信道光孤子通信系统的特点	(198)
5.5.2	多信道光孤子的碰撞长度	(200)
5.5.3	多信道光孤子通信系统	(201)
5.6	光纤孤子通信系统的组成与实验进展	(204)
5.6.1	光孤子通信实验系统组成	(205)
5.6.2	光孤子的测量	(209)
5.6.3	光纤线路直接实验传输系统	(211)
5.6.4	循环光纤环路传输实验系统	(214)
5.7	OTDM 孤子信号色散位移光纤传输实验	(220)
5.7.1	实验系统	(220)
5.7.2	测试结果	(223)
第 6 章	全光通信技术	(227)
6.1	三代通信网络介绍	(228)
6.2	光交换方式	(230)
6.2.1	空分光交换(光空分开关)	(231)
6.2.2	时分光交换	(234)
6.2.3	波分光交换	(235)
6.2.4	复合光交换	(236)
6.3	WDM 全光通信网	(237)
6.3.1	光传送网的分层结构	(238)
6.3.2	波长通道和虚波长通道	(239)
6.3.3	光交叉连接的节点结构	(240)

6.3.4	全光波长变换器	(246)
6.3.5	全光光纤网络容量	(249)
6.3.6	国内外典型的光网络	(251)
6.4	WDM 全光网中的同频干扰	(253)
6.4.1	OXC 的结构与同频串扰的产生	(253)
6.4.2	同频串扰的理论研究	(255)
6.5	第三代全光网络介绍	(256)
附录 1	电磁波频率与波长的换算	(260)
附录 2	dBm 与 mW 换算表	(260)
附录 3	百分损耗 (%) 与分贝 (dB) 损耗换算表	(260)
附录 4	ITU—T 关于波分复用系统波长安排的 建议草案	(261)
附录 5	光波长区的分配	(264)
附录 6	英汉缩略术语汇编	(271)
参考文献		(281)

第 1 章 光纤通信引论

光纤是通信网络的优良传输介质,尤其以石英(SiO_2)系光纤得到的应用最为广泛,与电缆相比,光纤具有信息传输容量大,中继距离长,不受电磁场干扰,保密性能好和使用轻便等优点。随着技术的进步,光纤价格逐年下降,应用范围不断扩展。20 世纪 90 年代后,光纤通信成为一个发展迅速、技术更新快,新技术不断出现的技术领域。光时分复用(OTDM)、光波分复用(OWDM)、光孤子传输,特别是为密集波分复用(DWDM)提供支持的 EDFA 和光无源器件迅速实用化,为高速率、大容量信息的长距离传输提供了易于实现的方式,也为以波长选路为基础的全光通信网的发展提供了可能。本章从应用的观点概述光纤传输特性、光纤通信系统的组成、目前主要光无源器件及光纤通信的发展趋势。

1.1 光纤通信的发展

20 世纪,伴随着全球电信网络的发展,电通信系统不断出现新的技术,用同轴电缆代替双绞线,使系统的容量大大增加。由于通信系统的带宽受限于其载波频率,导致了微波通信系统的产生,1948 年第一个微波通信系统投入使用。此后同轴电缆通信系统和微波通信系统都得到了较大的发展,到了 1970 年,通信系统的容量就基本上限定在这个水平上。

纵观通信技术的发展过程,可以看出一个明显的特点:其工作

频率由低频端向高频端扩展。从长波、中波、短波、超短波到微波,这期间平均每 6 年频率递增一个数量级。20 多年前通信技术从微波越过很宽的频率跨度,一举进入光纤通信时代。

1.1.1 光纤通信的进程

光纤通信经过 20 余年的发展,已经历了四个发展阶段,如图 1.1 所示。

第一代光纤通信的工作波长为 $0.85\mu\text{m}$,属短波波段,传输光纤为多模光纤。光源使用铅镓砷半导体激光器,光电检测器为硅材料的半导体 PIN 光电二极管和半导体雪崩二极管,这一代光通信以 1977 年美国芝加哥进行的码率为 44.736Mbit/s 的现场实验为标志。

第二代光纤通信出现在 80 年代早期,工作波长为 $1.3\mu\text{m}$,中继距离超过了 20km ,但由于受多模光纤中模式色散的影响,速率被限制在 100Mb/s 以下,1981 年在实验室验证了传输距离为 44km 、速率为 4Gb/s 的单模光纤系统。1987 年实现了中继距离为 50km 、速率为 1.7Gb/s 、波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的第二代商用化光纤传输系统。

第三代光纤传输系统的中继距离受限于光纤在 $1.3\mu\text{m}$ 波长上的损耗(典型值为 0.4dB/km)。光纤的最小损耗位于 $1.55\mu\text{m}$ 波长附近,1979 年实现了在该波长位置上 0.2dB/km 损耗的光纤,但由于在 $1.55\mu\text{m}$ 波长上光纤具有较大的色散,使得第三代光纤通信迟迟实现不了。由于单模光纤解决色散问题,1985 年在实验室实现了速率为 4Gb/s ,传输距离超过 100km 的结果。1990 年,工作在 $1.55\mu\text{m}$ 波长、速率为 2.4Gb/s 的第三代光纤通信系统实现商业化。

第四代光纤通信系统,以波分复用(WDM)增加容量速率和使用光放大器增加中继距离为标志,可以采用直接检测方式,已实现了在 2.5Gb/s 速率上传输 $4\ 500\text{km}$ 和 10Gb/s 速率上传输 $1\ 500\text{km}$

的结果。利用环型结构,已经证实在 2.4Gb/s 速率上传输 $21\,000\text{km}$ 和 5Gb/s 速率上传输 $14\,300\text{km}$ 的可能性。从 1990 年开始,在一根光纤上传输多个光信道,从而充分利用光纤带宽,有效扩展通信容量的光纤 WDM 方式,正引起光纤通信领域发生着一次变革。

目前,人们已涉足第五代光纤通信的研究和开发,它基于光孤子的概念,即由于光纤非线性效应与光纤色散相互抵消,使光脉冲在无损耗的光纤中保持其脉冲形状不变地传输的现象。

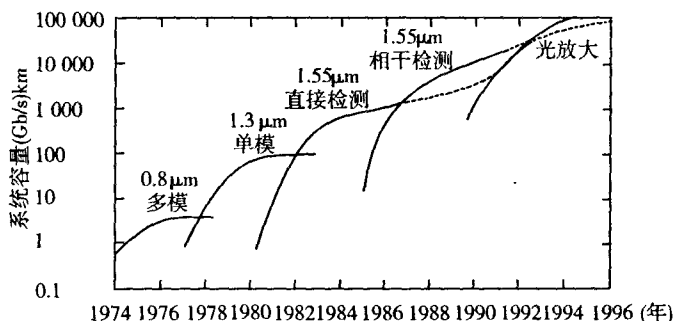


图 1.1 五代光纤通信的发展情况

光纤通信问世 20 多年来已构成现代传输网的主体。我国已初步建成了覆盖全国的、世界上规模最大的光纤通信网。1999 年初, $8 \times 2.5\text{Gb/s}$ 密集波分复用系统设备,成功地应用于我国第一条最高传输速率的国家一级通信干线“济—青工程”上,使济南至青岛的光纤通信容量扩大了 8 倍。紧接着,第一条采用国产设备的、海口至三亚 322km 的 2.5Gb/s 同步数字体系的光纤通信试验工程于同年 4 月正式开通运行,可允许 3 万对电话直接通话。目前,我国已基本掌握了 10Gb/s 的同步数字体系高速光通信系统技术,多种复用技术应用到同步数字体系高速光通信系统中的光放大器生产技术等。

1.1.2 光纤通信的发展趋势

光纤通信以光代电并不仅仅是传输手段和形式上的变化,而是电信史上的一场深刻的革命。它不仅为电信网提供了几乎无限的带宽资源,而且触发了一系列观念上的重大转变。到1990年为止,全世界已敷设了约 1.6×10^7 km 的光纤,可以绕地球的赤道400圈。然而,在大量实际使用中,传统光纤通信也暴露出了一些固有的弱点,例如复用结构缺乏灵活性,光路上无法互通,难以组织统一有效的监控网和支持现代网络管理,不便于引进宽带新业务,光纤带宽资源利用率很低等等。显然,要想圆满地在原有技术体制和技术框架内解决这些问题是事倍功半,得不偿失的。惟一的出路是从体制上,从器件技术和系统技术上进行全面革新。为此本书选择了光时分复用技术、光波分复用技术、光孤子通信技术、全光通信等五个新领域进行讨论。在介绍这些新技术之前,先对光纤通信发展的一般趋势作简要说明。回顾过去,展望未来,可以看出光纤通信发展的几个明显特点:

(1) 传输速率的高速化。当光纤系统采用时分复用(TDM)方式时,每当传输速率提高4倍,传输每个比特的成本大约下降1/3到2/3,因而高比特率系统的经济效益大致按指数规律增长,这是为什么在过去十几年内传输速率一直在不断地按指数规律提高的根本原因。理论上,用时分复用方式的传输速率还可以进一步提高到20~50Gb/s,但考虑实际技术经济性能后,进一步扩容的手段可能将转向波分复用等其他方式。

(2) 工作区的长波长化。光纤衰减谱的基本趋向是随着波长的4次方关系而反比例下降的。最初的光纤系统主要工作在短波长窗口,即850nm附近,此时光纤的衰减系数大致为2.5dB/km左右,目前光纤系统大多工作在长波长窗口至1310nm附近,光纤衰减系数可进一步降低至0.3~0.4dB/km,有了很大改善。将来的光纤系统逐渐移向长波长窗口至1550nm附近,光纤衰减系数可

进一步降低至 $0.18 \sim 0.25 \text{ dB/km}$, 使再生的距离可长达几百公里, 例如法国 140 Mb/s 海缆系统的无中继传输距离可达 220 km , 意大利 565 Mb/s 海缆系统的无中继传输距离可达 180 km 。如果采用氟化物玻璃光纤, 则工作波长可以继续延长至红外区 ($2.5 \mu\text{m}$), 那里的光纤衰减系数可达 0.01 dB/km , 无中继传输距离可长达几千公里, 十分有吸引力, 但遗憾的是尚未找到一种技术能制造出可实用的长光纤来, 而且光纤与接收器件也不配套, 因此尚不能实用化。

(3) 联网应用的普及化。传统的 PDH 系统是用来进行点到点传输的, 而实际网络调整的结果即表明, 只有少量信号是真正做到点到点传输的。大多数信号的传输需要一次以上的转接。因此数字网迫切需要一种新的适于联网的传输体制, 这就是同步传输网 (SDH 网) 体制。可以相信, 随着 SDH 的引入, 特别是分插复用器和数字交叉连接设备的引入, 联网应用越来越普及, 网络的效益和灵活性也将随之越来越高。

(4) 系统的集成化。超大规模集成电路 (VLSI) 技术的迅速发展, 已经使得单个芯片的集成度越来越高, 例如采用亚微米 CMOS 集成电路已经可以在单个芯片上集成 100 万个等效电路, 这就为整个系统集成在一块芯片上创造了条件。目前在 PDH 系统中, 利用 $1.5 \mu\text{m}$ CMOS 技术已能将整个复用器集成在一块芯片上。在 SDH 系统中, 利用亚微米 CMOS 技术已能将映射、开销处理和指针调整等十分复杂的功能 (6 万—7 万个等效门电路) 实现单片集成。

随着传输速率的越来越高, 波长与元器件尺寸及连线已经可以比拟 (例如 10 GHz 时, 波长仅 1 cm), 为避免宽带范围的匹配问题, 需要采用混合集成电路 (HIC) 和光电集成电路 (OEIC), 两者的基本差别在于元件间连线的耦合阻抗不同, 前者主要为感性, 后者主要为金属和半导体之间连线的电阻, 因此 OEIC 工作稳定, 波形好, 是主要发展方向。目前采用半隔离砷磷基底, 用光电二极管和结型场效应管已制成 1.2 Gb/s 的芯片, 面积仅 $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$, 传输距离达 52.5 km 。实现低成本、高可靠的 OEIC 已成为大规模开发

光纤用户网和局域网的关键之一。

(5)电信网的光纤化。从通信发展的历程看,电信网的光纤化已成为不可逆转的大趋势。以长途网为例,目前世界上最大的三个长途电信公司——美国的 AT&T 公司, MCI 公司和 SPRINT 公司的光纤化程度已分别高达约 100%、88% 和 100%。主干电缆段的光纤化正以每年 35% 左右的速率增长,基本实现光纤已为期不远。而配线部分和引入线部分将成为全网的“瓶颈”,这一“瓶颈”部分的解决有赖于光纤用户网技术的进展。可以预计再过 10 年左右时间,多数发达国家的电信网将基本完成全网光纤化的转变,电信线路将进入全光网络时代,成为“光信网络”。

1.2 光纤通信系统

1.2.1 光纤通信系统组成

目前实用的光纤通信系统都是采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式。强度调制是在发送端用所需传送的电信号去改变光信号的强度;直接检测是指在接收端用光检测器把调制的光波变为原来的电信号。

图 1.2 给出了几种典型的光纤通信系统方框图。

图 1.2(a)为单信道光—电—光中继数字通信方框图。图中的电端机就是一般的电通信设备,如数字脉冲编码调制(PCM)发射机、接收机。光发射端机的主要作用是将电信号转换成光信号,即电/光(E/O)转换,而后将光信号耦合到光纤中去。发射机的主要器件是光源,它采用半导体发光二极管(LED)或半导体激光器(LD)。光接收机的作用是将由光纤传输来的光信号转换成电信号,即光/电(O/E)转换。光接收机的主要部件是光电探测器(PIN 光电二极管或 APD)。在收发之间常加若干光中继器,它包括光接收和光发送设备。在这里,光信号先变成电信号进行电处理(如整