



普通高等教育“十二五”规划教材

光纤通信

主 编 钱爱玲 钱显忠 钱显毅



SEU 2676000



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

2676000

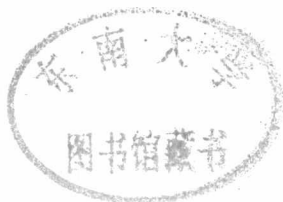
TN929.11
164



普通高等教育“十二五”规划教材

光纤通信

主 编 钱爱玲 钱显忠 钱显毅
副主编 王保成 毛建军 李青龙



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

00000000

内 容 提 要

本书系统的介绍了光纤通信的历史与现状、光纤通信的概念、光纤传输理论、光发射机、光接收机、光放大器、光纤通信网络、光调节与复用技术、光纤通信系统设计与施工、光纤测量。

本书编写时力求反映应用型本科学士、卓越工程师培养的要求和理工类专业教学特点，内容由浅入深，循序渐进，基本概念和基本知识准确清晰，突出光纤通信的应用技术，有利于培养卓越工程师专业教学使用。每章后都安排有相关阅读材料和习题，方便读者自学。

本书适应不同的读者，也可以用于高等学校理工类专业教材。

图书在版编目（C I P）数据

光纤通信 / 钱爱玲, 钱显忠, 钱显毅主编. -- 北京
: 中国水利水电出版社, 2013. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0534-6

I. ①光… II. ①钱… ②钱… ③钱… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929. 11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第004959号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 光纤通信
作 者	主 编 钱爱玲 钱显忠 钱显毅 副主编 王保成 毛建军 李青龙
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22.25印张 555千字
版 次	2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

为了贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》和《国家中长期人才发展规划纲要》的重大改革,根据教育部2011年5月发布的《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》,本着教材必须符合教育规律和人才成长规律的具有科学性、先进性、适用性,进一步完善具有中国特色的普通高等教育本科教材体系的精神和“卓越工程师教育培养计划”的具体要求,编写了光纤通信教材。

本教材具有以下特色:

(1) 符合教育部《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》的精神,具有时代性、先进性、创新性,为培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才和卓越工程师打下良好的数理基础。

(2) 特色鲜明,实用性强,方便读者自学。每章后都安排有相关阅读材料和习题,方便读者自学。将每个知识点紧密结合到相关学科、产业的应用。如第3章“光发射机”后有相关的阅读材料 ECL 电源开关在数字光发射机调制电路中的应用研究,可以提高学生学习兴趣,适应不同基础的学生自学。

(3) 重点突出、简明清晰、结论表述准确。对光纤通信中涉及的物理定律、定理不求严格证明过程,但对光纤通信中的物理模型建立讲述清晰,结论表达清晰准确,有利于帮助学生建立工程应用中的数理模型、培养学生的形象思维能力和解决实际工程的能力。

(4) 难易适中,适用面广,符合因材施教。适用不同的读者学习和参考,也有利于普通高校教学之用。

(5) 系统性强、强化应用、培养动手能力。本书在编写过程中,在确保光纤通信系统知识的基础上,调研并参考了相关行业专家的意见。特别适用于卓

越工程师培养，有利于培养实用型人才。本书有些理论推导部分，在教学时可以删除。

本书共9章，第2至3章由钱爱玲编写，第4章由钱显毅编写，第5章由王保成编写，第6章由李青龙编写，第7章由钱显忠编写，第1章、第8至9章毛建军编写，阅读材料由钱显毅编写，并由钱显毅负责全书统稿。

由于时间仓促，本书中的错误或不妥之处，恳请读者指正，需要PPT请联系QQ：1601907371。

编者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 光纤通信的概念	1
1.1 光纤通信的概念	1
1.2 光纤通信的发展历史	3
1.3 现代光纤通信技术	5
1.4 数字光纤通信系统比模拟光纤通信系统	8
习题	16
第 2 章 光纤传输理论	17
2.1 光纤的典型结构及分类	17
2.2 光纤的传输特性及主要参数	19
2.3 阶跃折射率光纤的模式理论	32
2.4 渐变折射率光纤的波动理论	48
2.5 单模光纤	60
* 2.6 光纤的制造	69
2.7 光纤的成缆	71
2.8 小结	72
习题	93
第 3 章 光发射机	96
3.1 激光原理的基础知识	96
3.2 半导体激光器	100
3.3 半导体发光二极管	123
3.4 光源的调制原理	125
3.5 光发射机和外调制器	131
3.6 小结	136
习题	144
第 4 章 光接收机	146
4.1 光接收机简介	146
4.2 光电检测器	148

4.3	放大电路及其噪声	155
4.4	光接收机灵敏度的计算	163
4.5	光接收机的组成模块	174
4.6	小结	182
	习题	187
第 5 章	光放大器	189
5.1	发光二极管	189
5.2	激光器原理	195
5.3	光放大器	208
5.4	小结	213
	习题	223
第 6 章	光纤通信网络	226
6.1	光纤通信系统	226
6.2	全光通信网	244
6.3	光纤接入网	258
6.4	色散补偿技术	263
6.5	光孤子通信技术	269
	习题	279
第 7 章	光调节与复用技术	281
7.1	光调制器	281
7.2	光复用解复用器	285
	习题	309
第 8 章	光纤通信系统设计与施工	310
8.1	数字光纤通信系统性能及测试	310
8.2	单通道数字光纤通信系统结构与设计	316
8.3	多通道数字光纤通信系统设计	322
	习题	330
第 9 章	光纤测量	332
9.1	衰减测量	332
9.2	色散测量	335
9.3	OTDR 的应用	338
9.4	眼图分析	340
9.5	光谱分析仪的应用	341
	习题	349
参考文献	350

第1章 光纤通信的概念

什么是信息？蓝色的天空，飘着白云；今天航班取消了；春天来了，我看到杨树、柳树绿叶等，都是信息。路标：前方的道路不通，请右行。这一是信息，二是一种单向的通信。

什么是通信？人们的日常生活离不开信息交换，比如语言交流、眼神和表情，这些都是通信（Communication），通信的本质就是信息的交流。本章主要介绍了光纤通信的一些基本概念，然后回顾光纤通信（Optical Fiber Communication）的历程，并对现代光纤通信技术作了总结。

耳闻不如目见，目见就是光信息。可见，光传输信息比其他方式传输信息要准、要快，容量要大。光纤通信简单的说，就是依靠光来传输信息。

1.1 光纤通信的概念

1.1.1 光纤通信

自古以来，人类的交流就是依靠各类信息的沟通，通信就是人们的最基本需求之一。这种需求不断地促使人们开始发明能将信息从一个地方迅捷、有效地传送到另一个遥远地方的通信技术。从广义的角度来说，通信就是彼此之间传递信息。

进一步讲，古时候，人们在石土、树木等上做上记号。“记号”可能是一种文字，或者是一种表示什么意义的图形，但“记号”是一种信息。这样处理信息的作用有两个意义：一是保存（信息的存储）；二是传送给后人。

现代的通信一般是指电信（Telecommunication）。（美国电气和电子工程师协会）IEEE对电信的定义是借助诸如电话系统、无线电系统、网络系统、电视系统这样的设备，在相隔一定距离的条件下进行的信息交换。在漫长的现代通信的科学发展道路中，通信经历了电通信（Electrical Communication）和光通信（Optical Communication）两个阶段。广义的电通信指的是一切运用电波作为载体而传送信息的所有通信方式的总称，而不管传输所使用的介质是什么。电通信又可分为有线电通信和无线电通信。类似于电通信，广义的光通信指的是一切运用光波作为载体传送信息的所有通信方式的总称，而不管传输所使用的介质是什么（当然也包括无介质光通信，光在真空中传播，也能进行光通信，就是无介质光通信）。光通信也可以分为利用大气进行通信的无线光通信和利用石英光纤或塑料光纤进行通信的有线光通信。人们则通常把应用石英光纤的有线光通信简称为“光纤通信”。

1970年被多数国家称为“光纤通信元年”。经过近40年的迅猛发展，光纤通信已经逐步从点对点通信向多点对多点的全光高速密集波分复用系统网络推进。从宏观来看，光纤通信主要包括光纤光缆、光电子器件及光纤通信系统设备等3个部分。光电子器件包括有源器件和无源器件。有源器件包括光源（发光二极管和半导体激光器）、光电检测器

(光电二极管和雪崩光电二极管)和光放大器(掺稀土光纤放大器、半导体激光放大器和光纤拉曼放大器等)以及由这些器件组成的各种模块等。无源器件包括光连接器、光耦合器、光衰减器、光隔离器、光开关和波分复用器等。同时还有光电集成(OEIC)和光子集成(PIC)器件。

随着电子材料科学的发展,将会有更多、更理想的光纤通信器件研制出来。

1.1.2 光纤通信系统的组成

光纤通信系统是指信号产生到信号的还原的全过程。如图 1.1 所示是典型的点对点光纤通信链路示意。其关键部分是:由光源和驱动电路组成的光发射机;将光纤包在其中以对光纤起到机械加固和保护作用的光纤;由光检测器和放大电路、信号恢复电路组成的光接收机。一些附加的元件包括光放大器、连接器、接头盒、耦合器和再生中继器(用于恢复信号形状的特性)等。

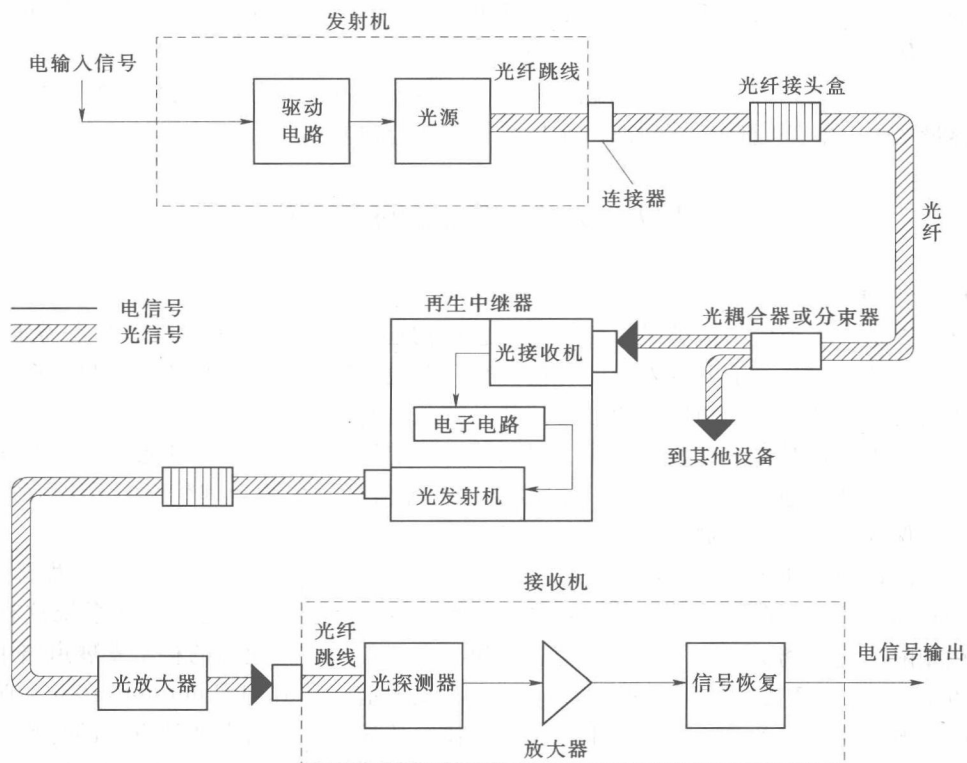


图 1.1 点对点光纤通信链路示意

从图 1.1 可以看出,光纤通信系统存在光—电、电—光的转换,即电子“瓶颈”问题,因而无法满足人们超高速、超宽带及动态通信要求。自从掺铒光纤放大器商用后,波分复用(WDM)系统颇受人们的青睐,构建基于 WDM 的全光通信网络是目前的发展趋势。如图 1.2 所示是目前一个完整的 WDM 系统。其通常包含光收发器、光耦合器、光复用/解复用器、光纤放大器、光上/下分路器、光交叉连接器、光色散补偿装置、光偏振控制装置、光开关、光波长转换器以及其他光通信器件、处理电路模块等,这些问题将在以后逐步讨论。

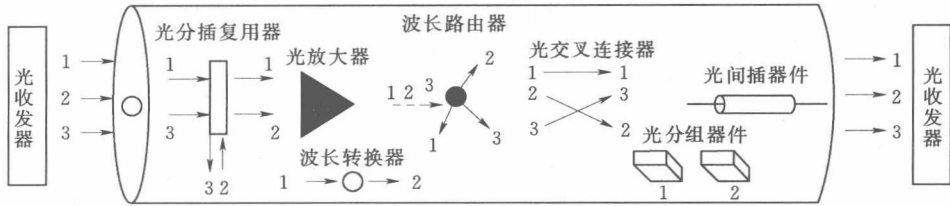


图 1.2 WDM 系统器件

1.2 光纤通信的发展历史

谈起光纤通信的发展，可以追溯到 3000 年前的烽火台。在这方面，人类的祖先是应用光通信的先驱。尽管古希腊也曾用过烽火台，但比中国晚了 200 年。后来出现的灯语、旗语和望远镜等都可以被看做是原始形式的光通信。这种传递信息的方法极为简单但信息量有限。

我国光通信可以说始于公元前 9 世纪，长城修筑的历史可上溯到公元前 9 世纪的西周时期，万里长城上的烽火台就是光通信的例子。据考证：前线观察哨，燃烧 1 处烟火，表示 1 级战斗准备。燃烧 2 处烟火，表示 2 级战斗准备。燃烧 3 处烟火，表示 3 级战斗准备，3 级表示有大战急战。

但严格来说，它们都不能算作真正的光通信。

直到 1880 年，贝尔发明光电话，才可以算是控光通信的雏形。然而贝尔的“光电话”始终没有走上实用化阶段。

究其原因有二：一是没有可靠的、高强度的光源；二是没有稳定的、低损耗的传输介质，无法得到高质量的光通信。自此之后的几十年里，由于无法突破上述两个障碍，加之当时电通信的高速发展，光通信的研究曾一度沉寂。解决光通信的出路在于找到合适的光源及理想的传光介质。这种情况一直延续到 20 世纪 60 年代。

由于当时没有理想的光源和传输介质，这种光电话的传输距离很短，并没有实际应用价值，因而进展很慢。然而，光电话仍是一项伟大的发明，奠定了光通信的基础，它证明了用光波作为载波传送信息的可行性。因此，可以说贝尔光电话是现代光通信的雏型，是光通信的基础。

1.2.1 光纤通信的里程碑

20 世纪 60 年代初期，光纤通信发展史上迎来了第一个里程碑。

1960 年，世界上第一台相干振荡光源——红宝石激光器问世。美国人梅曼 (Maiman) 发明了第一台红宝石激光器，给光通信带来了新的希望。和普通光相比，激光具有波谱宽度窄，方向性极好，亮度极高，以及频率和相位较一致的良好特性。激光是一种高度相干光，它的特性和无线电波相似，是一种理想的光载波。继红宝石激光器之后，氦-氖 (He-Ne) 激光器、二氧化碳 (CO₂) 激光器先后出现，并投入实际应用。激光器的发明和应用，使沉睡了 80 年的光通信进入一个崭新的阶段。

我国光通信技术几乎与世界同步发展，1961 年 9 月，中国科学院长春光学精密机械研究所也研制成功中国第一台红宝石激光器 (rubylight amplification by stimulated emission of

radiation, laser), 红宝石激光器可产生频谱纯度很高的光波。它的出现激起了世界性的光研究热潮, 给沉寂已久的光通信研究注入了活力。1962年PN结砷化镓(GaAs)半导体激光器出现, 尽管其还不能工作在室温下, 但它还是给光通信的实用化光源带来了希望。

在这个时期, 美国麻省理工学院利用He-Ne激光器和CO₂激光器进行了大气激光通信试验。实验证明: 用承载信息的光波, 通过大气的传播, 实现点对点的通信是可行的, 但是通信能力和质量受气候影响十分严重。由于雨、雾、雪和大气灰尘的吸收和散射, 光波能量衰减很大。例如, 雨能造成30dB/km的光波能量衰减, 浓雾使光波能量衰减高达120dB/km。另外, 大气的密度和温度不均匀, 造成折射率的变化, 使光束位置发生偏移。因而通信的距离和稳定性都受到极大的限制, 不能实现“全天候”通信。虽然, 固体激光器(例如掺钕钇铝石榴石激光器)的发明大大提高了发射光功率, 延长了传输距离, 使大气激光通信可以在江河两岸、海岛之间和某些特定场合使用, 但是大气激光通信的稳定性和可靠性仍然没有解决。

为了克服气候对激光通信的影响, 人们自然想到把激光束限制在特定的空间内传输。因而提出了透镜波导和反射镜波导的光波传输系统。透镜波导是在金属管内每隔一定距离安装一个透镜, 每个透镜把经传输的光束会聚到下一个透镜而实现的。反射镜波导和透镜波导相似, 是用与光束传输方向成45°角的两个平行反射镜代替透镜而构成的。这两种波导, 从理论上讲是可行的, 但在实际应用中遇到了不可克服的困难。首先, 现场施工中校准和安装十分复杂; 其次, 为了防止地面活动对波导的影响, 必须把波导深埋或选择在无人稀少的地区使用。

由于没有找到稳定可靠和低损耗的传输介质, 对光通信的研究再度走入了低潮。

随后人们开始寻找用于激光通信的途径。1965年, E. Miller报道了由金属空心管内一系列透镜构成的透镜光波导, 可避免大气传输的缺点, 但因其结构太复杂且精度要求太高而不能使用。而另一方面, 光导纤维的研究正在扎实进行。

早在1951年, 人们就发明了医疗用玻璃纤维。但这种早期的光导纤维损耗很大, 高达1000dB/km, 也不能用作光纤通信的传输介质。1966年, 英国标准电信研究所的华裔科学家C. K. Kao博士和G. A. Hockham, 对光纤传输的前景发表了具有重大历史意义的论文《光频率的介质纤维表面波导》。论文分析了玻璃纤维损耗大的主要原因, 大胆地预言, 只要能设法降低玻璃纤维的杂质, 就有可能使光纤的光波能量损耗从1000dB/km降低到20dB/km甚至更小, 从而有可能用于通信。这篇论文鼓舞了许多科学工作者为实现低损耗的光纤而努力。1970年, 美国康宁玻璃公司的Kapron博士等三人, 经过多次试验, 终于研制出传输损耗仅为20dB/km的光纤。这是光纤通信发展历史上的又一个里程碑。几乎在同时, 室温下连续工作的双异质结GaAs半导体激光器研究成功。小型光源和低损耗光纤的同时问世, 在全世界范围内掀起了发展光纤通信的高潮。1970年被人们定为光纤通信元年。中国的光纤通信研究开始于1974年。

1985年, 南安普敦大学的Mears等人制成了掺铒光纤放大器(EDFA)。1986年, 他们用Ar离子激光器做泵浦源又制造出工作波长为1540nm的EDFA。尽管这种用Ar离子激光器做泵浦源的光放大器显然不可能在光纤通信中得到应用, 但用掺铒光纤得到1550nm通信波长的光增益本身, 却在全世界引起了广泛的兴趣, 掀起了EDFA的研究热潮。这是因为EDFA的放大区域恰好与单模光纤的最低损耗区域相重合, 而且其具有高增益、宽频带、低噪声、增益特性与偏振无关等许多优良特性。这是光纤通信发展史上的一个划时代的里程

碑。20世纪90年代初,波长1550nm的EDFA宣告研制成功并能实际推广应用。1994年开始,EDFA进入商用。中国研究EDFA起步较晚,是从90年代开始的。

1989年Meltz G.等人首次利用光纤的紫外光敏效应(1978年Hill K.等人首次发现光纤中的光敏特性),采用两束相互干涉的紫外光束从侧面注入光纤的方法制作出谐振波长位于通信波段的光纤光栅(fiber grating)。1993年Hill K.等人提出了使用相位掩膜法制造光纤光栅,使光纤光栅能灵活地、大批量地制造成为可能。之后,光纤光栅器件逐步走向实用化。光纤光栅技术使得全光纤器件的研制和集成成为可能,从而为进入人们梦寐以求的全光信息时代带来了无限生机和希望。可以说光纤光栅、全光纤光子器件、平面波导器件及其集成的出现是光纤通信发展史上的又一个重要里程碑。

1.2.2 爆炸性发展

光纤通信是现在世界上发展最快的领域,平均每9个月性能翻一番、价格降低一半,其速度已超过了计算机芯片性能每18个月翻一番的摩尔定律的一倍。在短短的30多年间已经经历了五代通信系统的使用。

1977年,世界上第一个商用光纤通信系统在美国芝加哥的两个电话局之间开通,距离为7km,采用多模光纤,工作波长为 $0.85\mu\text{m}$,光纤损耗为 $2.5\sim 3\text{dB/km}$,传输速率为 44.736Mb/s ,这就是通常所说的第一代光纤通信系统。

1977—1982年的第二代光纤通信系统特征是:采用1310nm长波长多模或单模光纤,光纤损耗为 $0.55\sim 1\text{dB/km}$,传输速率为 140Mb/s ,中继距离为 $20\sim 50\text{km}$,于1982年开始陆续投入使用,一般用于中、短距长途通信线路,也用作大城市市话局间中继线,以实现无中继传输。

1982—1988年的第三代光纤通信系统采用1310nm长波长单模光纤,光纤损耗可以降至 $0.3\sim 0.5\text{dB/km}$,实用化、大规模应用是其主要特征,传输信号为准同步数字系列(PDH)的各次群路信号,中继距离为 $50\sim 100\text{km}$,于1983年以后陆续投入使用,主要用于长途干线和海底通信。

1988—1996年的第四代光纤通信系统主要特征是:开始采用1550nm波长窗口的光纤,光纤损耗进一步降至 0.2dB/km 。主要用于建设同步数字系列(SDH)同步传送网络,传输速率达 2.5Gb/s ,中继距离为 $80\sim 120\text{km}$,并开始采用掺铒光纤放大器(EDFA)和波分复用器(WDM)等新型器件。

1996年至今属于第五代光纤通信系统。主要特征是:采用DWDM技术组建大容量传送平台,单波长信道传输速率已达 10Gb/s 甚至更高。另外将语音、数据和图像等各种业务和接口融合在统一平台上传送,如多业务传送平台MSTP等。

今后光纤通信将朝着全光传输交换的方向发展,即全光网络,网络更具智能特性。在传送容量和传送距离等性能方面,随着各种光技术及其器件的发展会有更大的突破。

阳光给人类带来了温暖和光明,光纤通信给人类带来了信息交流和情感的沟通,为人类建设和谐社会带来了动力。

1.3 现代光纤通信技术

1.3.1 光纤通信技术特点

在光纤通信系统中,作为载波的光波频率比电波频率高得多,而作为传输介质的光纤

又比同轴电缆或波导管的损耗低得多，因此相对于电缆通信或微波通信，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来说有其明显的优越性。

1. 传输容量大

光纤通信系统的容许频带（带宽）取决于光源的调制特性、调制方式和光纤的色散特性。石英单模光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 波长具有零色散特性，通过光纤的设计，还可以把零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$ 。在零色散波长窗口，单模光纤都具有几十 $\text{GHz}\cdot\text{km}$ 的带宽。另一方面，可以采用多种复用技术来增加传输容量。最简单的是空分复用，因为光纤很细，直径只有 $125\mu\text{m}$ ，一根光缆可以容纳几百根光纤， $12\times 12=144$ 根光纤的带状光缆早已实现。

这种方法使线路传输容量数十成百倍地增加。就单根光纤而言，采用波分复用（WDM）或光频分复用（OFDM）是增加光纤通信系统传输容量最有效的方法。另一方面，减小光源谱线宽度和采用外调制方式，也是增加传输容量的有效方法。

目前，单波长光纤通信系统的传输速率一般为 2.5Gb/s 和 10Gb/s 。采用外调制技术，传输速率可以达到 40Gb/s 。波分复用（WDM）和光时分复用（TDM）更是极大地增加了传输容量。WDM 最高水平为 132 个信道，传输容量为 $20\text{Gb/s}\times 132=2640\text{Gb/s}$ ，相当于 120km 的距离传输了 3.3×10^8 条话路。

光纤具有极大的带宽，全波光纤（光纤的低损耗和低色散区在 $1.45\sim 1.65\mu\text{m}$ 波长范围）出现后，它的带宽可达 25THz 。若以其 $1/10$ 作为传输频带，则可传输约 10^{10} 路电话。因此光纤在单位面积上有极大的信号传输能力，即单位面积上的信息密度极高，传输容量极大。

2. 传输损耗小，中继距离长

目前单模光纤在 1310nm 波长窗口损耗为 0.35dB/km ，在 1550nm 窗口损耗为 0.2dB/km 。而且在相当宽的频带内各频率的损耗几乎一样，因此用光纤比用同轴电缆或波导的中继距离长得多。

石英光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长，传输损耗分别为 0.50dB/km 和 0.20dB/km ，甚至更低。因此，用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多。目前，采用外调制技术，波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的色散移位单模光纤通信系统，若其传输速率为 2.5Gb/s ，则中继距离可达 150km ；若其传输速率为 10Gb/s ，则中继距离可达 100km 。

采用光纤放大器、色散补偿光纤，中继距离还可增加。而且，传输的误码率极低（ 10^{-9} ，甚至更小）。

传输容量大、传输误码率低、中继距离长的优点，使光纤通信系统不仅适合于长途干线网而且适合于接入网的使用，这也是降低每公里话路的系统造价的主要原因。

3. 抗干扰性好，保密性强，使用安全

通信用的光纤由电绝缘的石英材料制成，信号载体是光波，有很强的抗电磁干扰能力。光波导结构使光波能量基本上限制在光纤芯子中传输，在芯子外很快地衰减。光纤光缆密封性好，若在光纤或光缆的表面涂上一层消光剂则效果更好，因而信息不易泄露和窃听，保密性好。光纤材料是石英（ SiO_2 ）介质，具有耐高温、耐腐蚀的性能，因而可抵御恶劣的工作环境。

4. 材料资源丰富，用光纤可节约金属材料

制造通常的电缆需要消耗大量的铜和铅等有色金属。以四管中同轴电缆为例， 1km 四管中同轴电缆约需用 460kg 铜，而制造 1km 光纤，只需几十克石英即可。同时制造光

纤的石英丰富而便宜，取之不竭。用光纤取代电缆，可节约大量的金属材料，具有合理使用地球资源的重大意义。

5. 质量轻，可挠性好，敷设方便

相同话路的光缆要比电缆轻 90%~50%，而光缆质量仅为电缆质量的 1/10~1/20，直径不到电缆的 1/5。另外，经过表面涂覆的光纤具有很好的可挠性，便于敷设，可架空、直埋或置入管道。光纤重量很轻，直径很小。即使做成光缆，在芯数相同的条件下，其重量还是比电缆轻得多，体积也小得多。

通信设备的重量和体积对许多领域特别是军事、航空和宇宙飞船等方面的应用，具有特别重要的意义。在飞机上用光纤代替电缆，不仅降低了通信设备的成本，而且降低了飞机的制造成本。例如，在美国 A-7 飞机上，用光纤通信代替电缆通信，使飞机重量减轻 27 磅（约 12.247kg），相当于飞机制造成本减少 27 万美元。

当然，光纤通信除了上述优点外，也存在一些缺点。例如，组件昂贵，光纤质地脆，机械强度低，连接比较困难，分路、耦合不方便，弯曲半径不宜太小等。这些缺点在技术上都是可以克服的，它不影响光纤通信的实用。近年来，光纤通信发展很快，它已深刻地改变了通信网的面貌，成为现代信息社会最坚实的基础，并向人们展现了无限美好的未来。

总之，光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性，而且在经济上具有巨大的竞争能力，因此其在信息社会中将发挥越来越重要的作用。随着传输容量的增加，由于采用了新的传输媒质，使得相对造价直线下降。因此，光纤通信将会普及到人类生活的各个角落。

1.3.2 现代光纤通信技术角色

21 世纪是光子的世纪，是光网络的世纪，通信走向全光网络必然要涉及开发一系列不同于以往传统光纤通信要求的新技术、新器件。

1. 超大容量光纤通信系统

随着计算机网络及其他新的数据传输服务的迅猛发展，长距离光纤传输系统对通信容量的需求增长很快，大约每两年就要翻一番，原有的光纤通信系统的传输容量已成为当前和未来信息业务发展的“瓶颈”，如何最大限度地挖掘光纤通信的潜在带宽已经成为亟待解决的问题。通常，解决的方法有空分复用（SDM）、时分复用（TDM）和波分复用等 3 种技术。尤其波分复用技术通过采用单根光纤传输多路光信道信号，从而使得光纤的传输能力成倍增加。目前，遍布全球的光缆通信网大都为实用常规光缆（G.652 光纤）。采用波分复用技术不仅可以充分利用光纤的带宽进行超大容量的透明传输，可以平滑升级扩容组建全光网络，还可以充分利用现成的、已敷设的光缆，从而节约了光纤资源。显然，波分复用技术已成为当前光纤通信领域的研究热点和首选技术，在未来的全光网络中，波分复用技术是实现全光波长交换和路由的重要基础。如未来能将光时分复用（OTDM）、光码分复用（OCDM）等技术跟波分复用结合起来，光纤通信容量还将有革命性的扩展。

2. 光集成器件和光电集成器件的研究

如同电子集成器件那样，也可以将许多光学器件（特别是半导体的光器件，如半导体激光器、光检测器等）集成在一个衬底上，各器件用半导体光波导互联，制成光集成器件。光电集成器件具有体积小、速度快、可靠性高等优点，发展光集成是光纤通信的必然。

3. 新类型光纤的研究

传统的 G.652 单模光纤在适应上述高速长距离传送网络的发展需要方面已暴露出力不从心的态势,开发新型光纤已成为开发下一代网络基础设施的重要组成部分。目前,为了适应干线网和城域网的不同发展需要,已出现了色散移位光纤、色散补偿光纤、无水吸收峰光纤(全波光纤)和还未成熟的光子晶体光纤等。此外,为了满足接入网方面的需要,聚合物光纤也应运而生。

4. 解决全网瓶颈的手段——光接入网

光接入网是信息高速公路的“最后一公里”。实现信息传输的高速化,满足大众的需求,不仅要有宽带的主干传输网络,用户接入部分更是关键,光接入网是高速信息流进入千家万户的关键技术。目前应用于光接入网的技术主要有 3 种,即 SDH、PDH 和无源光网络(PON)。

1.4 数字光纤通信系统比模拟光纤通信系统

数字光纤通信系统比模拟光纤通信系统具有更多的优点,也更能适应社会对通信能力和通信质量越来越高的要求。数字通信系统用参数取值离散的信号(如脉冲的有和无、电频的高和低等)代表信息,强调的是信号和信息之间的一一对应关系;而模拟通信系统则用参数取值连续的信号代表信息,强调的是变换过程中信号和信息之间的线性关系。这种基本特征决定着两种通信方式的优缺点和不同时期的发展趋势。20 世纪 70 年代光纤通信的应用和 80 年代计算机的普及,为数字通信的发展创造了极其有利的条件。目前虽有数字通信几乎完全代替模拟通信的趋势,但是模拟通信仍然有着重要的应用。

数字通信系统的优点如下:

(1) 抗干扰能力强,传输质量好。在模拟通信系统中,噪声叠加在信号上,两者很难分开,放大时噪声和信号一起放大,不能改善因传输而劣化的信噪比。数字光纤通信采用二进制信号,信息不包含在脉冲波形中,而由脉冲的“有”和“无”表示。因此,一般噪声不影响传输质量,只有在抽样和判决过程中,当噪声超过一定阈值时,才产生误码率。

(2) 可以用再生中继,传输距离长。数字通信系统可以用不同方式再生传输信号,消除传输过程中的噪声积累,恢复原信号,延长传输距离。

(3) 适用各种业务的传输,灵活性大。在数字通信系统中,话音、图像等各种信息都变换为二进制数字信号,可以把传输技术和交换技术结合起来,有利于实现综合业务。

(4) 容易实现高强度的保密通信。只需要将明文与密钥序列逐位模 2 相加,就可以实现保密通信。只要精心设计加密方案和密钥序列并经常更换密钥,便可达到很高的保密强度。

(5) 数字通信系统大量采用数字电路,易于集成,从而实现小型化、微型化,增强设备可靠性,有利于降低成本。数字通信系统的缺点是占用频带较宽,系统的频带利用率不高(注:这里没有考虑语音、视频压缩编码和多元制数字调制的作用)。例如,一路模拟电话只占用 4kHz 的带宽,而一路数字电话要占用 20~64kHz 的带宽。数字通信系统的许多优点是以牺牲频带为代价得到的,然而光纤通信的频带很宽,完全能够克服数字通信的缺点。因而对于电话的传输,数字光纤通信系统是最佳的选择,模拟通信系统除占用带宽较窄外,还有电路简单、价格便宜等优点。因此,目前的电视传输,广泛采用模拟通信

系统。另一方面，由于电视的数字化传输，要求较复杂的技术，特别是当今社会对电视频道数目的要求日益增多，要传输几十甚至上百路电视，需要极复杂的编码和解码技术，设备价格昂贵，因此目前还不能普遍使用。在这种情况下，副载波复用（SCM）模拟光纤通信系统得到很大重视和迅速发展。在这种 SCM 系统中，视频基带信号对射频副载波的调制，可以采用调频（FM）或调幅（AM）。目前，在卫星模拟电视传输中，视频信号对微波的调制采用的是调频（FM），所以连接卫星地面站的干线光纤传输系统要采用 FM/SCM 方式。

但是，世界各国模拟电视信号对无线广播载波的调制，采用的都是单边带调幅（VSB-AM），所以用于电视分配网的光纤传输系统要采用 VSB-AM/SCM 方式，以便和传输到家用电视机的同轴电缆相兼容，组成光纤/同轴混合（HFC）系统。模拟通信系统要求传输信号和信息之间具有良好的线性关系，因此需要输出光功率与驱动电流之间具有极好线性特性的激光器。幸好，目前这种激光器在技术发达国家已投入商业应用，可以传输 60~120 路质量优良的彩色电视信号。

在现有电视设备都是模拟的，而数字电视又未能普遍应用的今天和未来一段时间里，采用 SCM 模拟光纤通信系统传输多路电视，不失为一种明智的选择。

【阅读资料 1】 我国光纤光缆及光无源器件产业的现状与发展

1. 引言

自从光纤通信正式进入电信网络以来，它已经成为现代化通信网的主要支柱之一。近年来，随着光同步数字系列（SDH）、掺铒光纤放大器（EDFA）、密集波分复用（DWDM）等技术的商业化，光纤通信系统的传输容量不断扩大，光纤传输的带宽潜力和技术优越性不断得到挖掘和发挥。与此同时，由于互联网的迅速普及，世界各国纷纷把光纤接入网的发展作为战略性的国策加以重视。因此全球光纤需求量与日俱增，2000 年出现了全球性的光纤短缺。

据报道，2000 年全球光纤的耗用量超过 9000 万芯 km，比 1998 年的 4890 万芯 km 增长 84%。我国光纤光缆的铺设量发展更加迅速，到 2000 年底，全国铺设光缆的光纤总量已接近 3000 万芯 km。2000 年全国光纤耗用量 800 万 km 左右，折合成光缆约 40 万 km。据预测，未来几年全球光纤需求量将以 23% 的复合年增长率增长，到 2004 年将达到 1.8 亿芯 km。我国光纤的耗用量到 2005 年时预计也将达到 2300 万芯 km。届时，中国可望成为仅次于美国的世界第二大光纤市场。

光无源器件的销售额在光纤通信系统总投资中的比重不到 5%，但它是整个系统中不可分割的重要组成部分。主要包括光纤连接器、光纤耦合器、波分复用器、光开关、光衰减器和光隔离器等。其中市场规模最大的是光纤连接器，其次是光纤耦合器。据估计，1999 年全球单模和多模式光纤连接器的销售量在 1.5 亿套左右，销售额达 7.165 亿美元。今后几年销售额的年增长率 19%（考虑到价格下降的趋势），到 2004 年将达到 17 亿美元的市场规模。我国光纤连接器的用量及预测，平均年增长率约 30%。

光纤耦合器的销售量约为光纤连接器的 1/4。1999 年全球光纤耦合器的销售额为 3.94 亿美元，预计到 2004 年将达 9.03 亿美元，平均年增长率 18%，考虑到价格下降因素，销售量的年增长率将达 40% 左右。我国光纤耦合器 1999 年的销售量约 27.5 万套，同样面临需求迅速增长的形势。

2. 我国仅有少数几台用于光纤生产的设备在运转, 供科研试制

我国曾于20世纪80年代中期从国外引进34套光纤预制棒生产设备和17台光纤拉丝机用于光纤生产, 耗资约3000多万美元。但由于布点分散, 不能形成生产规模, 产品成本高, 加上生产质量不稳定等原因, 这些设备已相继停产。目前仅有少数几台设备还在运转, 供科研试制之用。

进入20世纪90年代, 我国光缆生产迅速形成规模, 但所用光纤绝大多数依赖进口。直到1997年, 武汉长飞光纤光缆有限公司形成了70万km的光纤生产能力, 上海朗讯科技更实现了实际产销光纤70万km, 我国才开始有了自己的光纤产业。近几年除了这两家龙头企业不断扩大生产能力和产量外, 国内又新建一批光纤生产企业。

总的来说:

(1) 我国光纤生产在过去几年中取得了长足的进步。生产厂家已达十家, 生产能力已超过700万km。2000年实际产量约566万km, 2001年预计产量可达750万km, 已能满足国内光缆生产需求量的70%。

(2) 除了武汉长飞光纤光缆有限公司具有实际的光纤预制棒业生产能力外, 其余光纤生产企业基本上都是买棒拉丝型企业。

(3) 除了现有光纤生产企业纷纷大规模扩大生产能力外, 国内还有十几家上市公司或中外合资企业正在上光纤项目, 其中有七八家准备上光纤预制棒。如果这些项目多数能够建成并正式投入生产, 估计到2005年我国光纤预制棒的生产能力可等效于2000万芯km的光纤, 拉丝能力则超过3000万芯km, 从而出现供大于求的局面。已有业内权威人士对光纤项目的投资过热现象表示忧虑。

3. 我国光缆产业的现状和发展

我国光缆生产企业约有200家, 年生产能力超过70万km。总的来说, 我国光缆产业具有以下几个特点:

(1) 我国光缆生产企业的生产能力已大大超过市场的需求。

(2) 近年来, 光缆市场的份额越来越被少数大企业所占有。以1998年为例, 按所耗用的光纤芯km数计算, 全国十大光缆生产企业的光缆产量占全国市场的70%, 1999年更达到80%。说明我国光缆产业正在逐步走向成熟。

(3) 以中外合资光缆生产企业为代表的大型光缆生产企业在过去几年中引进了一批关键的先进设备。因此总体来说, 国内光缆的生产水平已接近或达到国际先进水平。例如, 曾经依赖进口的国家一级干线用光缆, 国内不少企业已完全能够生产。国际上热门的新型光缆一旦出现, 国内基本上都能及时跟进。例如制造光纤带光缆的关键设备——光纤带成带机国内引进已达30台左右, 光纤带光缆所用光纤1998年时已达光缆耗用光纤总量的18%。用于电力线路通信的全介质自承式光缆(ADSS)已在我国光缆生产企业中遍地开花。工艺难度很高的电力线路架空地线复合光缆(OPGW)和短长度海底光缆也已有少数企业能够生产。我国光缆产品已具备一定的竞争力。以1998年为例, 我国进口光缆4166万美元, 出口光缆仅1803万美元。而2000年我国进口光缆5293万美元, 出口光缆则达到了4880万美元。

4. 我国光无源器件产业的现状和发展趋势

光纤通信的迅速发展, 特别是近年来光纤接入网越来越接近用户的发展趋势, 使光无源器件的用量以每年30%的速度在发展。