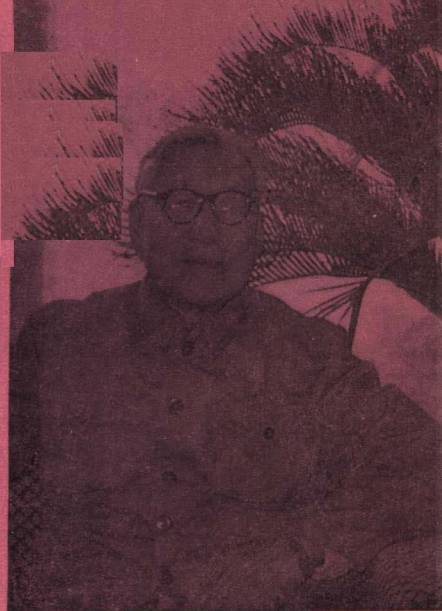


○ 张 煦

光纤通信技术

当代学科前沿文库

中国科学技术出版社



光纤通信技术

○ 张 煦

OPTICAL FIBER COMMUNICATION TECHNOLOGY

● ZHANG XU

CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科学技术出版社

(京)新登字 175 号

光纤通信技术

当代学科前沿文库

张 煦 著

中国科学技术出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

责任编辑:高 建

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂印刷

封面设计:胡焕然

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 5.375 字数: 140 千字

技术设计:赵丽英

1992 年 2 月第 1 版 1992 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—2 000 册

ISBN 7-5046-0606-5/TN·4

定价: 3.90 元

活跃学术思想

发展科学技术

王汉斌

出版前言

一百多年以前，马克思“把科学首先看成是历史的有力杠杆，看成是最高意义上的革命力量”（《马克思恩格斯全集》，第19卷，第375页），高度评价了科学技术在人类历史上的伟大作用。这一远见卓识已为20世纪的历史性进步所证实。众所周知，20世纪以来，尤其是第二次世界大战之后，科学技术的突飞猛进如此深刻地改变了整个世界的面貌；不仅全球的自然环境和社会环境发生了天翻地覆的巨大变化，而且连包括当代科学技术在内的整个人类文化体系本身（从细节到整体、从形式到内容）也都处于日新月异的发展之中。正是在这样一种深广的历史背景之下，近30年来狂飙突起的新科学技术革命的浪潮，日益强烈地震荡和冲击着世界的每一个角落。当今世界，无论是发达国家，还是发展中国家，都同样面临着这一新科技革命的严峻挑战。

基于对上述形势的分析与总结，邓小平同志于1988年提出了“科学技术是生产力，而且是第一生产力”。这一科学论断，本质地揭示了科学技术对当代生产力发展和社会经济发展的第一位的变革作用，这对于指导我国的社会主义现代化建设，显然具有十分紧迫而又深远的意义。应该看到，依靠科学技术的进步来推动经济政治的发展和综合国力的提高，已经成为目前国际社会的共识，越来越多的国家都以此作为自己的基本国策或长期发展战略。因此，面对世界新科技革命的挑战，我们的紧迫任务是必须努力增强全民族的科技意识，必须大力发展我国的科学技术事业。

如果说,上个世纪末,一些站在科技发展前沿的有识之士曾经从不同的角度分别对现代科技作出过总结,深刻地揭示了有关学科乃至整个科技体系的发展特征和态势,并因此而有力地影响了20世纪科技发展;那末,在行将跨入21世纪的今天,我们不仅应该清醒地认识到当代科学技术的发展已经并将继续强烈地改变人类社会生活的各个方面(其中包括生产方式、生活方式以至经济、政治、军事、文化等诸多领域),而且更必须增加紧迫感和危机感,自觉地思考与总结近百年来有关科学技术发展的方方面面,抓住机遇,争取时间,努力使我们的伟大事业在世界新科技革命的大潮中蓬勃向前,兴旺发达。推进我国的社会主义现代化建设和改革开放,必须高度重视和充分依靠科学技术;因此,大力发展科学技术已经成为实现我国“八五”计划和十年规划的关键。有鉴于此,我们决定组织力量编辑《当代学科前沿文库》,并于今年起陆续出版。

《当代学科前沿文库》是一套综合性的学术文库,特约请海内外各方面的学者就其实际工作的专业领域进行回顾与展望,旨在及时反映活跃于当代各门学科、各个研究领域前沿的专家或学科带头人的有关思考和总结,及时反映他们对当今科学技术发展所进行的科学分析,从而为发展科学技术作出积极的贡献。一些科技界的老前辈十分关心和支持《当代学科前沿文库》的编辑出版工作,他们再三指出,面临21世纪世界新科技革命的挑战,我国科技界亟需审时度势,认真分析国情,认真分析当今世界科技发展的历史、现状和趋势,努力跟踪和赶超世界先进水平。他们或亲自执笔,或推荐有关专家,或牵头组织班子,积极撰写书稿,并充分强调这是一项既有现实意义、更有历史意义的基础性工作,表示有责任从历史的高度积极写出中国学者的答卷,不仅造福子孙后代,而且还贡献于世界人民。社会各界的许多有识之士也纷纷呼吁,认真写好并及时出版这一套综合性学术文库,对于我国决策和领导的科学化,对于建设我国高水准的研究队伍,对于全国人民增强科技意识、掌握科技知识、参与科技实践,对于提高我国的综合国力以及

促进国际科技-文化的交流，无疑是大有裨益的，大家应该努力把这项工作做好，并把它提到战略高度来加以认识。

“一个民族想要站在科学的最高峰，就一刻也不能没有理论思维。”（《马克思恩格斯选集》，第3卷，第467页）我们相信，在各方面专家学者的大力支持下，通过社会各界的共同努力，《当代学科前沿文库》一定能够以一系列丰富多彩力作，进一步活跃学术思想、推动学科建设、增加文化积累、发展科学技术，从而为振兴中华民族、为建设社会主义现代化，谱写出无愧于时代、无愧于历史、无愧于人民的灿烂篇章！

主编 吴之静

一九九一年六月

序

光纤通信技术是一项具有美好前途的新兴通信技术。自 70 年代后期开始,迄今仅短短十余年,光纤通信技术进展速度迅猛,越来越令人信服地显示它的无比优越性。现在,光纤通信系统的发展经历了第一、二、三代,正在进入第四、五代,已经被公认为现代通信和信息传输最有发展前途的工具。在我国“八五”和今后十年规划建设期间,应当对光纤通信技术的最新研究成果和推广、应用趋势予以密切关注,积极推动有关的研究、开发、生产制造和工程设计、安装运用的工作,充分发挥这项新技术在加速我国现代化建设进程中的重大作用。

本书凡 8 章,分章概述光纤通信的发展过程和应用前途、光纤与光缆、光源与光检测器件、以及常规通信与相干通信系统近几年的新进展,最后试对光纤通信技术的新动向作一介绍。限于作者水平,书中内容可能有不周或不当之处,敬请国内同行专家们多多指正。

在本书编写过程中,曾得到国际第一流光纤通信技术专家、美籍华裔厉鼎毅博士、李天培博士、高锟博士的热情和大力支持,他们所提供的文章和讲稿资料,以及相互交谈时所给予的启发,使作者获益匪浅。英国伦敦大学 John Midwinter 教授和西德柏林工大 Klaus Petermann 教授曾先后来交大讲学,并有很多接触机会,使作者扩大了知识面。贝尔的 S.D.Personick 博士、Ira Jacobs 博士、R. A. Linke 博士、B. L.Kasper 博士、J. B.MacChesney

博士,康宁的 W.A.Bhagavatula 博士,古河的 H.Murata 博士、佐友的 T. Nakahara 博士等专家,也先后提供详细的专门资料和图表,使作者在编写时得到宝贵的依据。在此,作者对于这些专家特别表示衷心的感谢。

本书初稿承著名专家赵梓森同志审核,谨表感谢。

目 录

序	
第 1 章 光纤通信的发展过程和应用前途	1
1.1 引言	1
1.2 通信发展简史	1
1.3 光通信的早期历史	4
1.4 光纤通信的迅猛进展	5
1.5 光纤通信的优越性	9
1.6 光纤通信的应用范围	11
第 2 章 光纤、光缆的设计和性能	18
2.1 引言	18
2.2 光纤中的导波传播	18
2.3 光纤的损耗和色散	22
2.4 多模光纤的设计和性能	24
2.5 单模光纤的设计和性能	25
2.6 光缆的结构和性能	32
2.7 光纤接续	34
2.8 结语	37
第 3 章 光源、光检测器件的结构和性能	40
3.1 引言	40
3.2 III-V 半导体	41
3.3 发光管 LED	43

3.4	激光管 LD	44
3.5	单频激光管	45
3.6	PIN 光检测管	49
3.7	雪崩管 APD	51
3.8	光电子集成与多量子阱器件	53
3.9	结语	54
第 4 章	常规光纤通信系统设计和应用	56
4.1	引言	56
4.2	光检测器的量子限度	57
4.3	接收机前端的设计	59
4.4	接收机灵敏度	60
4.5	数字系统全程设计	62
4.6	模拟传输系统设计	65
4.7	数字通信应用进展	65
4.8	结语	72
第 5 章	相干光纤通信技术的进展	74
5.1	引言	74
5.2	相干光纤通信的发展过程	74
5.3	检测方式的选择	77
5.4	调制方式的选择	78
5.5	频移键控外差系统	79
5.6	对激光管的要求	80
5.7	平衡混频器的利用	82
5.8	相干光纤系统实验进展	83
5.9	在市内网应用的设想	87
5.10	结语	87
第 6 章	光纤通信网技术的发展趋向	90
6.1	引言	90
6.2	通信网技术总的发展趋向	91
6.3	骨干网和区域网	96

6.4	光纤多址区域通信网	105
6.5	光纤通信在市内网的应用	116
6.6	综合业务局部区域网的发展	118
6.7	异步转移方式技术的发展	120
6.8	结语	126
第7章	光波通信与微波通信的协调建设	128
7.1	引言	128
7.2	卫星通信的技术进展	129
7.3	微波接力通信的过去和将来	130
7.4	微波通信与光波通信特点比较	132
7.5	微波通信与光波通信配合运用	132
7.6	无线接入光纤交换网的发展可能	132
7.7	星际光波通信线路的初步设想	136
7.8	结语	139
第8章	光纤通信技术的新动向	141
	参考文献	146
	附录: 英语缩词汉译	154

第 1 章

光纤通信的发展过程和应用前途

1.1 引言

光纤通信是当今新兴的高技术,作为信息传输的主要工具,它进展迅猛,前景美好。本章对光纤通信的发展和前途作一综合性的评述。在简要回顾一般通信和一般光通信发展过程的基础上,较详细地讲述光纤通信十多年来的进展、光纤通信比其它信息传输工具的优越之处、以及光纤通信在公用通信和专用通信实际场合的应用范围。

1.2 通信发展简史

早期的通信方式主要是电话和电报。通信信号的传输,可分为有线和无线两大类:市内电话是依靠有线电;长途电话和电报则既有有线电,又有无线电;国际通信是无线电报和电话,也有越洋海底电缆;广播主要利用无线电,局部地区广播也用有线电。有线电是利用金属导线、分架空明线、对称电缆和同轴电缆等几种。无线电则按工作波长分中波、短波、超短波和微波等几种。本世纪二三十年代,真空电子管对通信技术的发展曾经有了了不起的作用。电子管的晶体振荡器和大功率放大器相继诞生使短波无线电台能实现远距离国内、国际的电报和电话通信,这当然是通过天空电离层的作用。在三四十年代,明线 3 路、12 路,电缆 24 路,同轴电缆 600 路等几种单边带调制 (SSB) 和频分复用 (FDM) 的载波电话,依靠带通滤波器和强负反馈群放大器等设备的优良性能,成为

长途有线通信的主要工具。40年代末,半导体晶体管的发明是电子技术的另一里程碑。自60年代起,晶体管淘汰了电子,从而被广泛应用于长途通信的模拟多路载波电话。70年代中期制成同轴电缆10800—13200路电话的宽带载波通信系统,当时一根同轴电缆含有22根同轴管,总传输容量为13200路电话,中继间隔1.6km,成为长途通信的干线。这是模拟有线通信的最好成绩,传输质量令人满意。另一方面,50年代起,陆地上建立微波接力线路,也传输多路载波电话,直至70年代末,曾在每个微波载波的20MHz带宽内传输1800路电话,线路总容量19800路,接力段间隔50km,也作为长途通信的干线,并为电视台长途传输电视节目。这是模拟无线通信的最好成绩,传输质量也属上乘。70年代起,卫星通信兴起,建立了地面站和大型抛物面天线,也是利用微波传输,对国际通信和电视节目传输发挥重大作用,传输质量可靠,后来设备改进,天线缩小,也用于国内通信。从此,微波无线电淘汰了过去的短波无线电通信。

60年代下半期起,集成电路(IC)的成功实现,成为电子技术发展至微电子技术的重要里程碑。晶体管和集成电路使数字通信能够得到真正实际应用,主要是脉码调制(PCM)和时分复用(TDM)订立了标准系列,即:2Mb/s(30路数字电话,每路64kb/s)、8Mb/s(120路)、34Mb/s(480路)、140Mb/s和400—560Mb/s能够在电缆上传输。70年代下半期起,大规模集成(LSI)和超大规模集成(VLSI)陆续成功实现,进一步加快了数字通信的发展和推广:微波接力线路转向数字通信,卫星通信向时分多址(TDMA)和星上数字处理。这表明,不论有线传输或是无线传输,都从模拟通信过渡至数字通信,从FDM过渡至PCM,而在这一过程中,IC和VLSI起了决定性作用。

市内电话交换机在初期为人工磁石式和共电式,后来改装自动电话,用机电式,有步进制、旋转制和纵横制,它们逐步淘汰了人工交换机。近年来,由于集成电路的成功实现,电子计算机功能及其软件技术突飞猛进,随之,计算机贮存程序控制(SPC)交换

机便大量问世,其制式设计方法众多。现在新装市内和长途交换机,甚至用户小交换机(PABX),几乎全是数字时分的程控交换。这表明,计算机与通信结合(C+C),硬件与软件并用,对数字通信的发展更加有利。

过去使用模拟通信,组成模拟通信网,近年过渡至数字通信,并必然趋向于组成市内和长途数字通信网,以及局部区域计算机数据通信网,而且将所有信息(语音、数据和图象)都编成二进制数码,在同一通信网中传输和交换,成为综合业务数字网(ISDN)。ISDN中的交换方式,可能既有电路交换,又有分组交换。最初设想的ISDN是以一路数字化电话的码速64kb/s为基础,近年趋向于更宽频带,以2Mb/s或更高码速为基础,以便包括可视会议电话等图象信息业务,这就成为宽带综合业务数字网(B-ISDN)。这是当今各国通信研究、规划和讨论的热门专题,也是现代化通信网的必然趋向。同时,长距离的电视节目传输可依靠长途通信线路,市内或局部区域的电视广播(CATV)可依靠市内用户或局部区域的线路,使通信与广播相结合,这也是今后发展的趋势。

随着数字通信和电子计算机及软件技术的飞跃猛进,由计算机承担信息处理的一种新型通信方式(Message Handling Service)便应运而生。这种通信对公众应用来说,近于电子信函业务(El-

通信的发展

表 1-1

-
- 1) 模拟通经过渡至数字通信——载波电话(FDM)过渡至脉码调制(PCM)。集成电路起决定性作用。
 - 2) 有线传输——金属导线,从架空明线、对称电缆、发展到同轴电缆,正在过渡至光纤光缆。光电子技术起决定性作用。
 - 3) 无线传输——短波过渡至微波,有卫星通信地面站和陆地微波接力线路。
 - 4) 交换——人工交换过渡至自动交换,有步进制、旋转制和纵横制。机电式自动交换过渡至程控交换。电子计算机和软件技术起决定性作用。
 - 5) 通信网——向宽带综合业务数字网(B-ISDN)发展。通信与广播结合。电子计算机信息处理的通信方式(MHS)正在加速研究与发展,实现三C结合。
-

ctronic Mail), 在国防应用中也称指挥、控制和通信三结合 (C³) 系统, 其特点是充分利用电子计算机的处理和存贮功能。可以有把握地说, 这是信息时代的必然产物, 在不久的将来定会见诸现实。

表 1-1 示通信的发展阶段, 由此可以看到现代通信的大体轮廓: 一是数字通信, 二是卫星微波与光纤配合传输, 三是程控数字交换, 四是宽带综合业务数字网, 通信与广播结合, 五是电子计算机信息处理的通信, 实行电子计算机与通信和控制结合。

1.3 光通信的早期历史

光通信的历史记载可追溯到 1880 年, 当时英国《自然》杂志上发表贝尔介绍他发明的“光电话”设备和实验, 传输语音信号距离 200m, 但由于缺乏可靠的强光源, 又没有可靠的低损耗传输媒质, 所以未能得到实际应用。1960 年, 激光技术的诞生使激光器成为一个可靠强光源, 于是以大气作为传输媒质, 即能实现通信。然而, 大气有气候变化, 雨、雪、雾的出现, 使光束难于顺利传输。实践表明, 利用强大的激光源, 例如 CO₂ 激光器, 可以在某些场合实现点与点间通信, 但不完全可靠, 不能作为正式公用通信网的组成部分。

60 年代, 微波波导管的理论和实践已积累了不少经验。曾经把它推广至光介质波导, 并利用周期性聚焦透镜作这种光束波导传输的试验, 但因透镜设备复杂, 见效甚微, 不久就放弃不用。那几年里, 圆柱形介质波导的理论研究有所开展, 如光纤纤芯的折射率稍大于包层的折射率, 光波可受到导引, 并局限于纤芯内部传播, 称为光纤波导, 或光导纤维。然而那时玻璃光纤呈现的传输损耗高达 1dB/m, 即 1000dB/km。且半导体激光管只能在冷却环境的很低温度下工作, 不合实际需要。

后经过世界各地科学研究工作者集中精力, 攻克一个又一个的难关, 光纤通信终于实现和实用化, 而且显示这种光通信形式完全可靠, 能够作为陆地和海底的通信线路, 作为正式通信网的主要传输工具。巨大的潜在传输容量, 使光纤通信具有旺盛的生命力

光电话	1880 年	示范表演
大气光通信	1960 年迄今	个别使用
光波导通信	1964 年	放弃
光纤通信	1970 年迄今和将来	越来越兴旺发达
宇宙星际光通信	将来	很可能实用

和广泛发展前途,所以被公认为信息时代的主要传输工具,并是当今世界新技术革命的主要支柱之一。

至于大气光通信,虽在陆地上不完全可靠,但在空间卫星通信飞跃进展的时代,作为卫星与卫星间的通信方式,却能提供令人满意的传播性能。因此,可以预测,在不久的将来,星际光通信必能真正实际应用。

表 1-2 示光通信过去和将来的发展梗概。

1.4 光纤通信的迅猛进展

光纤通信系统是现代化通信网中传输信息的媒质,即在头发般细的玻璃纤维内部导引受过信息调制的光波。光纤通信之所以能够成功地发展至实用化,主要得力于超纯石英玻璃纤维材料和半导体激光管两大项目的研制成功。第一个半导体激光二极管是 1962 年试验成功的,第一个预测有包层的玻璃光纤可以用于通信是 1966 年在实验室作出的。这两项发现为光纤通信技术奠定牢固的基础。

1970 年是光纤通信显示有实际希望而正式揭开序幕的重要一年。因为正是这一年,第一根低损耗光纤(从 1000dB/km 降低至 20dB/km,这是实际通信的重要标志,因为发送与接收两端机间损耗 40dB,相当于中继间隔 2km,与同轴电缆的相等)拉制成功,和第一个适合于光纤通信使用的半导体激光管(从必须冷却至很低温度而改进到能在室温连续工作)研制成功。从此,光纤通信迅速进入应用研究阶段。

1976~1977 年,实际制成光纤的损耗再度降低至 4dB/km,半