

(第四版)

光纤光缆 的设计和制造

Design and Manufacture
for
Optical Fiber
and Fiber Optic Cable

陈炳炎 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

光纤光缆的设计和制造

Design and Manufacture
for
Optical Fiber
and Fiber Optic Cable

ISBN 978-7-308-20172-8



9 787308 201728 >

定价：85.00元

图书在版编目(CIP)数据

光纤光缆的设计和制造 / 陈炳炎著. —4 版. —杭州:浙江大学出版社,2020.6

ISBN 978-7-308-20172-8

I. ①光… II. ①陈… III. ①光学纤维—设计②光学纤维—制造③光缆—设计④光缆—制造 IV. ①TN252②TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 068978 号

光纤光缆的设计和制造(第四版)

陈炳炎 著

责任编辑 杜希武

责任校对 汪淑芳 汪志强

封面设计 刘依群 蒋蕴颖

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址:<http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江时代出版服务有限公司

印 刷 杭州高腾印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 36

字 数 788 千

版 印 次 2020 年 6 月第 4 版 2020 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-20172-8

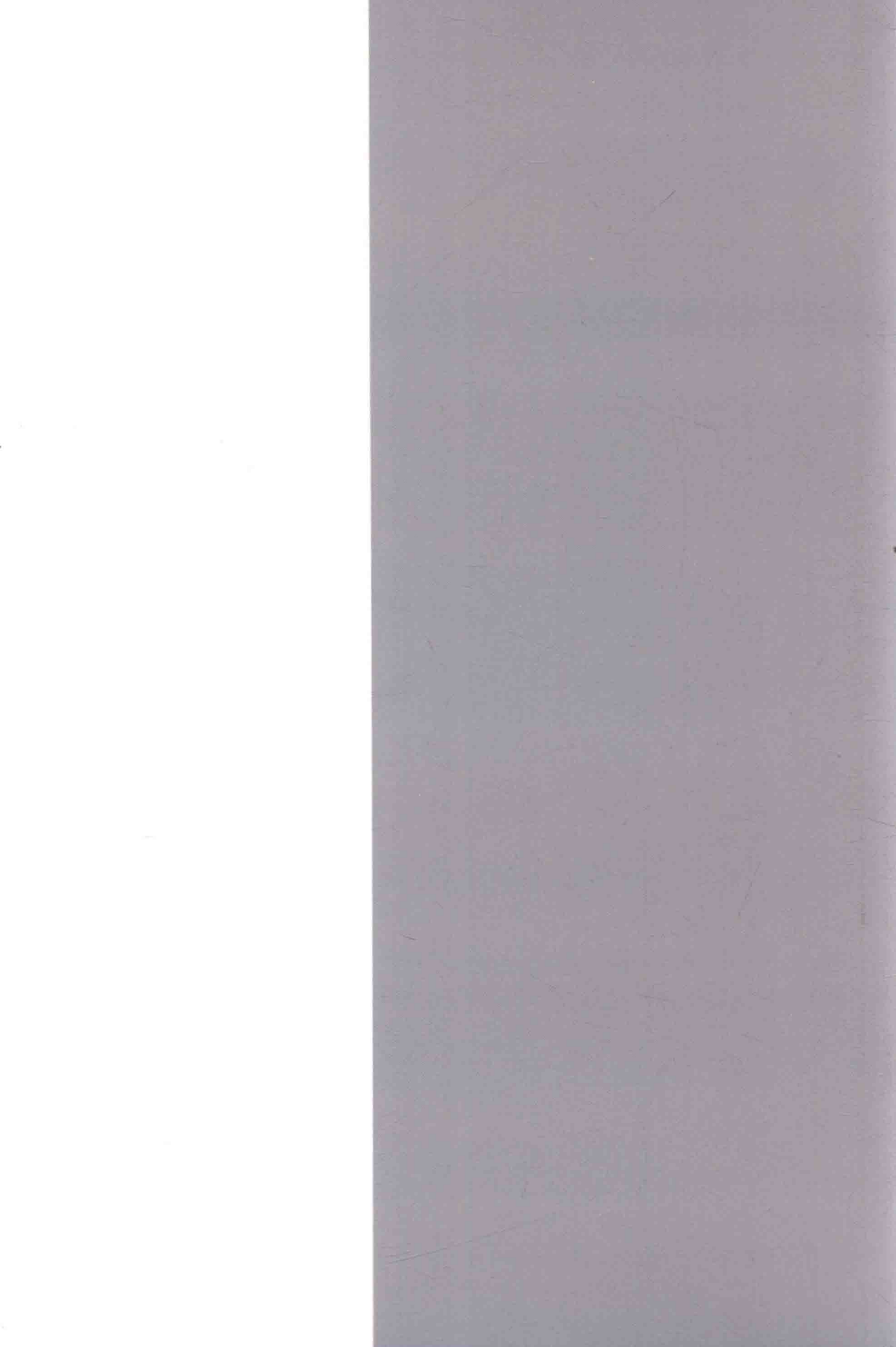
定 价 85.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式:(0571)88925591;<http://zjdxcbstmall.com>



陈炳炎 1962年毕业于上海交通大学，是我国较早从事光纤传输理论的研究者之一，我国光纤光缆技术专家，中国改革开放40年光通信行业专家荣誉获得者，中国第一批赴美访问学者，参与IEC制定《光纤国际标准》的中国首席代表。时任美国Delaware州立大学访问教授与GTE Laboratories访问学者。现任普天线缆集团光纤光缆技术总工。曾先后主持国内多家光纤、光缆企业创建工作，结合实践发表45篇学术论文，并获得100余项专利，为中国光纤光缆企业长足发展贡献了宝贵的力量。



序 言

欣闻陈炳炎先生专著《光纤光缆的设计和制造》第四版即将出版,并盼我作序,高兴之余不胜荣幸。陈炳炎先生是我国光通信理论研究极具代表性的杰出学者,也是领取光通信行业应用实践的先行者,一直为业界所敬仰。故欣然提笔,是以为序。

本书第四版结合时下技术变迁,与时俱进的增补、修订与重新编排,全书包括光纤理论篇、光纤篇及光缆篇,三篇共二十九章,内容涵盖了光纤、光缆的原理、规范、测量、设计和制造,既有深入的理论分析,又有明确的使用结论,本书是陈炳炎先生多年理论研究和生产实践的总结梳理与精华沉淀。

普天线缆集团创建于2001年,作为中国光电通信行业发展的亲历者与见证者,从第一条数字通信电缆生产线投建,到通信综合布线系统;从第一个光纤连接器,到自主研发智能布线系统;从第一条光缆生产线,到完成光纤拉丝制造;从第一个模块,到数据中心技术解决方案。普天线缆集团凭借持续的创新制造、产品与解决方案,朝向光电通信价值链多维度延伸。

令人欣慰的是2017年陈炳炎先生选择加盟本公司,我们相信,在他的主持创建下,普天线缆集团光纤光缆产业板块将得到高速发展。光纤通信技术的外溢,也将在智能布线、物联传感、消费应用等众多领域发挥作用,为中国信息通信行业的发展做出贡献。

普天线缆集团有限公司

董事长

王积芬

2020年5月8日

前 言

1966年,世人誉称为“光纤之父”的高锟先生在人类通信史上第一次揭示了“光纤通信”的概念与原理,由此开启了现代通信的新纪元。从1970年第一根光纤问世以来,短短十多年,光纤通信就已产业化。进入20世纪90年代,光纤通信在电信干线、有线电视及各种专用干线中大量应用,并向用户接入网发展。光纤通信进入了一个世界性的全方位的发展阶段。随着建立在光纤通信和卫星通信基础上的信息高速公路的建设,以及光纤到户的实施,人类进入令人神往的21世纪的信息世界。光纤通信、微电子以及计算机业已成为现代信息社会的三大技术和产业支柱。随着5G移动通信的发展,世界将进入万物互联的时代,作为5G网络基石的光纤在人类社会生活中的作用亦将发挥到极致。

笔者有幸在国内外从事光纤技术和光纤通信的研究、教学,以及光纤光缆的制造工作,凡40余载。在中国电子元件行业协会光电线缆分会的举荐下,将历年来发表的有关光纤光缆的文章,汇编成集。始于2003年出版本书,并于2011年发行第二版,2016年发行第三版。

本书从初版至今,已历时17年。有关章节中某些内容的论述和数据业已过时,光纤光缆行业的新技术也不断涌现。本书第四版将有关章节予以全面修订和增补,并重新整理编排,将全书分为三篇:第1篇“光纤理论篇”;第2篇“光纤篇”;第3篇“光缆篇”。本书第四版是笔者多年来从事光纤传输理论研究和光纤光缆生产实践的总结。限于笔者学术水平,文中错误和不当之处在所难免,敬请读者不吝指正。

为庆贺并回顾光纤通信50年的发展历程,笔者于2017年撰写了《光纤通信和光纤技术进展50年》一文,现将此文列为第1篇末章,以飨读者。

高锟先生与笔者亦师亦友,为敬贺高锟先生荣获2009年诺贝尔物理学奖,笔者曾于2010年撰写《高锟——一位以光纤通信创造历史的科学家》一文。特将此文作为本书代序,谨表对高锟先生历史功绩的敬仰。本书初版序为张煦老师所作,实乃恩师对吾辈之鼓励。惜恩师于2015年9月驾鹤西去,给笔者留下永恒的怀念。并蒙普天线缆集团有限公司王秋萍女士的大力支持,本书得以顺利出版,笔者不胜感谢。

在本书成文过程中,得到不少业内同仁的帮助,特别是陈宏达、黄俊华、龚成、王瑞春、沈江波的全力相助,还有王跃、华纪平、李扬、王寿泰、张波,韩庆荣、黄小明、张海军等,全书的编排工作由龚成协助完成。在此向他们表示衷心谢意。

陈炳炎

2020年3月1日


初版序

我国光纤光缆产业自 20 世纪 90 年代以来得到了长足发展,这中间蕴含了一批科技工作者的工作成果。他们凭借着自己的学识和专长,努力实践,不断总结提高,推动了技术的进步、产业的发展。光纤光缆技术专家陈炳炎便是他们中的代表之一。

陈炳炎同志是我国较早从事光纤传输理论的研究者之一。20 世纪 80 年代初,陈炳炎先后在美国 Delaware 州立大学和 GTE Laboratories 从事光纤技术和光纤通信的讲学和研究工作,成绩卓著。近十年来,他先后主持了多家光纤、光缆企业的创建工作,均获成功。他结合自己的实践,发表了不少论文,内容涉及光纤光缆的各个方面,既有深入的理论分析,又有明确实用的结论,对于正在从事光纤光缆生产和研究的工程技术人员极有指导意义。正因如此,这些文章一经发表,即引起广泛关注。据此,中国电子元件行为协会光电线缆分会建议陈炳炎将近年发表的论文内容作适当增补后整理成书正式出版。

本书内容紧扣光纤光缆的设计、制造、重要性能及其测量。理论分析深入、严谨,结论明确、实用。相信对从事光纤光缆设计、制造的工程技术人员,从事研究开发的科技人员,光纤通信运营系统的设计和工程技术人员,以及对从事教学工作的教师和研究生都极有参考价值。

我一向十分赞赏陈炳炎孜孜不倦的治学精神,欣然为之作序,郑重地把这本书推荐给广大读者。

中国科学院院士 

2002 年 4 月 15 日

高锟——一位以“光纤通信”创造历史的科学家

(代 序)

瑞典皇家科学院 2009 年 10 月 6 日宣布,将 2009 年诺贝尔物理学奖授予包括英国华裔科学家高锟在内的 3 位科学家。高锟先生,1933 年生于中国上海,1957 年和 1965 年分别取得英国伦敦大学电机工程学学士和博士学位,曾任香港中文大学校长。高锟为光纤通信、电机工程专家,世称“光纤之父”。

信息传输自古至今都是人们生活不可缺少的一部分,从古代社会的烽火台到邮驿,再到 19 世纪人们发明了电报、电话等通过电子媒介进行信息传输。随着人们对信息需求的不断提高,人们越来越迫切需要寻找到一种高速、便捷、传输距离长,同时还兼具制造成本低廉的信息传输媒介。1935 年,美国纽约和费城之间敷设了第一根用于长途通信的同轴电缆。在 20 世纪五六十年代,为了进一步探索未来大容量通信的传输线路,业界曾致力于毫米波 H_{01} 型模的金属圆波导管及超导同轴电缆的探索与开发,但均未获得突破。

1966 年,高锟在英国 ITT Standard Telecommunications Laboratories 工作期间,发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文,开创性地提出了光导纤维在通信上应用的基本原理,描述了长途及高信息量光通信所需介质纤维的结构和材料特性。当时,主流学者的共识是玻璃中光损耗太高,光纤虽然可用在短短的胃镜导管上,但用于长距离通信根本不可能。高锟先生却不信其邪。他对通信系统详细分析后指出:当光损耗下降到 20dB/km 时,玻璃纤维就有实用价值。他对光在玻璃纤维中吸收、散射和弯曲损耗的机理深入分析后得出结论:只要解决好玻璃纯度和成分等问题,用熔石英制作的光学纤维可以成为实用的光通信传输媒质。这一设想提出之后,有人认为匪夷所思,也有人对此大加褒扬。但在争论中,高锟的原创性工作在全世界掀起了一场光纤通信的革命。

高锟的这篇具有历史意义的论文于 1966 年发表时,人们还无法制造出可以达到高锟要求的那种“超纯净玻璃”,所以高锟提出利用高纯度的玻璃——光纤来传送讯息,人们认为这简直是天方夜谭。试想如果当年他因此而放弃的话,便没有今日的光纤技术,更没有能给我们的生活带来如此巨大变化的互联网了。科学的价值,往往就在于揭示出某种技术的极限,如果这种极限是可以实现的,那就意味着为新技术开启了一扇通向成功的大门。

在高锶原创性理论的推动下,4年后,美国康宁公司的工程天才 Robert D. Maurer 于 1970 年设计和制成世界上第一根低损耗石英光纤(损耗为 20dB/km,波长为 $0.63\mu\text{m}$)。他采用的方法是在一根芯棒上气相沉积石英玻璃,随后抽去芯棒,将玻璃管烧缩成光棒后拉成光纤。气相沉积时通过改变玻璃组分,形成高折射率的纤芯和低折射率的包层的光纤波导结构,此光纤波导结构被一直沿用至今。

1974 年美国贝尔实验室的 John MacChesney 开发出 MCVD(改良的化学气相沉积)工艺,成为世界上第一个商用制棒技术,迅速被世界各国采用,及时地推动了光纤通信的实用化。

鉴于高锶、Robert D. Maurer 和 John MacChesney 在光纤技术方面的奠基性工作和巨大成就,1999 年他们三人成为工程界最高奖项的 NAE Charles Stark Draper 奖的共同得主。

他们的获奖词反映了他们对光纤技术发展的历史性贡献,摘录如下:

“For the conception and invention of optical fiber for communications and for the development of manufacturing processes that made the communications revolution possible.”

在高锶原创性理论的推动下,光纤波导传输理论在 20 世纪 70 年代也得到长足的发展,从而为光纤技术的发展和实用化奠定了理论基础。光纤波导理论源起于 20 世纪 20 年代初 Debye(1921)的介质波导理论,但由于光在光纤中的损耗机理、光纤波导的弱导性、微小的光纤截面尺寸,以及其他传输特性均与微波介质波导不相同,故光纤波导理论是一门独立的理论。一大批学者为此做出了原创性的贡献,有关文献浩如烟海。这里仅撷数例,以窥一斑:Snyder A. W. (1969) 和 Gloge D. (1971) 基于光纤波导的弱导性,即 $(n_1 - n_2) \ll n_1$ (n_1 和 n_2 分别为光纤纤芯和包层的折射率),将经典的模式(两重和四重)简并为线性偏振(LP)模,从而大大简化了光纤波导的理论分析;KecK D. B., Olshansky R. 和 Petermann K. 等学者对光在光纤中各种损耗机理的理论研究为制造低损耗光纤提供了理论依据;Jeunhomme L., Marcuse D. 和 Gambling W. A. 等学者对光纤波导的色散性能的研究则为 G. 655, G. 656 等色散位移光纤的开发奠定了理论基础。

光纤制造技术也在 20 世纪 70 年代得到长足的发展,继美国贝尔实验室的 MCVD 制棒技术后,美国康宁公司的 OVD(管外气相沉积)、日本 NTT 公司的 VAD(轴向气相沉积)以及荷兰飞利浦公司的 PCVD(等离子化学气相沉积)制棒技术相继开发成功。光纤损耗在 1979 年已降低到 0.2dB/km(波长为 1550nm 时),这已接近由瑞利散射损耗所决定的极限值了。现在,高效率的单模光纤的制棒技术均采用 PCVD/OVD, OVD/OVD, VAD/OVD, VAD/套管等复合的纤芯/包层光棒工艺。而 MCVD 工艺主要用于多模光纤、保偏光纤、光敏(传感)光纤和其他特种光纤的制作。

在华盛顿和波士顿之间的世界上第一条商用光纤通信系统于 1981 年建成。短短几十年间,光纤网络已遍布全球,至今已在全球敷设了数亿公里,成为互联网、全球信息通信的基础。光纤的发明不但解决了信息长距离传输的问题,而且极大地提高了效率并降低了成本。今天,二氧化硅光纤已成为通信系统的基石,就如同硅集成电路是计算机的基石一样。

因高锟的理论而催生的产业庞大得无法估计：从光纤光缆的制造到光纤网络通信系统，从通信网、电视网到互联网，光纤已成为整个人类信息社会的基础。诺贝尔奖评委会如此描述神奇的光纤：“光波流动在纤细的光纤中，它携带着各种信息数据传递向每一个方向，文本、音乐、图片和视频因此能在瞬间传遍全球。”

这次高锟先生以“光通信领域涉及光纤传输的突破性成就”荣获诺贝尔物理学奖。众所周知，诺贝尔奖向来只颁给基础科学，而非应用科学。而高锟凭借应用科学成果，且是 43 年前的成果获奖，其中固然有诺贝尔奖自身谋求改革的原因，恐怕更重要的是光纤支撑起的通信产业，已经在人类社会中扮演起极其重要、不可替代的角色。正是在这样的背景下，高锟先生 43 年前的智慧，在今天看来依然熠熠生辉。

◆ ◆ ◆

光纤的发明改变了我们的生活，带动了整个通信业的大发展，光纤通信发展至今已有几十年的时间。高锟先生以其在光纤通信领域开创性的成就，终于获得了 2009 年诺贝尔物理学奖的殊荣，这是对高锟先生杰出贡献的最高褒奖。然而，这个奖来得太迟了。高锟先生在获得如此巨大荣誉之际，却不幸身陷疾病之痛。回忆起高锟先生长期来对笔者的提携和帮助，令人不胜唏嘘。

1979 年当笔者获得第一批公派赴美访问学者的资格时，远在英国的高锟先生的父亲，高君湘老先生得知在亲属中竟然也有从事光纤行业的人，十分欣慰，来信建议笔者去高锟所在的 ITT, EOPD (ITT 电光产品部) (Roanoke, Virginia) 做研究工作。但因 ITT, EOPD 从事光纤的军事应用研究，笔者无法成行。赴美后，笔者应邀去 ITT, EOPD 参访，从此开始了与高锟先生的交往。1981 年，笔者结束了在美国 Delaware 州立大学的研究项目后，高锟先生举荐笔者去纽约的 SIT (史蒂芬森理工学院) 参加一个由 ITT, EOPD 资助的“光纤模式复用”研究项目。后因上海交通大学张煦老师来信，推荐笔者去了 GTE Laboratories 做研究项目，SIT 未能成行。

高锟先生对我国光纤事业十分关心。1996 年他以香港生产力促进会名义向我国国家科委提出了发展我国光纤事业的建议书。同时，高锟先生不顾年事已高，还身体力行，在 1996 年退任香港中文大学校长职务后，创立高科技公司“高科桥”，其宗旨是作为高科技公司的桥梁。他初时以顾问工作为主，为世界各地科技公司提供专业意见，包括国内的光纤制造公司，进而以香港为基地，合资开设了一家光纤制造公司，其初衷并不在于谋求商业利益，而是为了取得光纤预制棒的实际制作经验，使香港成为科技转移中心，来助推内地光纤制造事业的发展。这充分反映了他关心祖国发展的赤子之心。

◆ ◆ ◆

光纤技术正在向两个方向发展：第一是光纤通信技术，第二则是随之而来的光纤传感技术。光纤通信技术历经 30 余年的发展，日臻成熟；光纤传感技术则是方兴未艾。后者也正在借助光纤通信技术的成果而处于迅速发展中。

光纤通信技术的发展令人目不暇接，笔者也感同身受。20 世纪 80 年代初，欧美、日

本等国兴起光纤相干通信技术的研发热潮,旨在扩展光纤通信系统的距离和带宽。笔者也有幸躬逢其盛,1981—1982年,在美国 GTE Laboratories 做光纤相干通信研究项目,项目名称为“Binary ASK, FSK, PSK Coherent Transmission and Heterodyne Detection for Optical Fiber Broad-band Communications”。相干系统与 IM-DD 系统相比有两大优点:(1)它有更高的接收的灵敏度,这是因为相干系统只受限于被接收信号的光的量子噪声,在外差相干系统中采用二进制 PSK 调制,达到 10^{-9} 误码率,每比特只要 18 个光子;而 IM-DD 系统中接收机灵敏度受限于 APD 倍增噪声和负载电阻的热噪声,达到 10^{-9} 误码率,每比特光子数要几百,甚至几千个。(2)相干系统可增加接收机的选择性。工作在 FDM 方式时,可利用置于外差后的微波滤波器用电的方式进行通道选择,这就允许在频域中更密集安排通道,旨在开发光纤的巨大带宽潜力。进入 20 世纪 90 年代后,由于光纤放大器及光纤波分复用技术的迅速发展,相干系统的优点黯然失色,光相干系统的开发只能期待新的技术突破,否则难以与光纤放大器及光纤波分复用技术相匹敌。波分复用技术的迅速发展,也使 G. 653 光纤迅速被 G. 655, G. 656 光纤所取代。目前,单一波长的传输容量已从 2.5Gbit/s, 10Gbit/s, 发展到 40Gbit/s。从 2006 年起,已开始 120Gbit/s 的研究,这类超大速率的传输系统的技术瓶颈在于研究解决色散补偿和偏振的时变效应(如一阶和二阶 PMD、PDL 等)。DWDM 的波长间隔已从 1.6nm, 0.8nm, 减小到 0.4nm (50GHz), 0.2nm (25GHz), 未来甚至还可能到 0.1nm (12.5GHz)。在 C 波段(1530~1565nm)上,采用 10Gbit/s 速率及 25GHz 的波长间隔,已可实现 1.6Tbit/s (160 路光通道×10Gbit/s)容量的商用长途通信线路。通信波段还在向短波段 S 波段(1460~1530nm)及长波段 L 波段(1565~1625nm)扩展,拉曼放大技术在 S、C、L 三个波段均能使用。全波光纤的技术突破,使 1385nm 波长的水峰损耗消失,遂令第五波段(1360~1530nm)“天堑变通途”,使单模光纤的有效使用波段扩展到从 1280~1625nm 的石英光纤低损耗区的全部波段。可以想见,在一根光纤上同时传送千万路电话已不再是人类的梦想了。

与传统的传感技术相比,光纤传感器的优势是本身的物理特性而不是功能特性。光波在光纤中传播时,表征光波的特征参量——振幅、相位、偏振态、波长等,因外界因素如温度、压力、位移、电场、磁场、转动等的作用而直接或间接地发生变化,因而可将光纤用作敏感组件来探测各种物理量,此即光纤传感器的基本原理。而光纤本身又是光波的传输媒质,这种“传”“感”合一的特征所带来的优势,堪称无可匹敌。基于瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射原理的 OTDR, BOTDR 及 ROTDR 一类的分布式光纤传感器以及基于双光束干涉的光纤传感干涉仪,如马赫—曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪、迈克尔逊(Michelson)干涉仪、萨格奈克(Sagnac)干涉仪等,其光纤传感臂上的每一点既是敏感点又是传输介质。即使对于基于多光束干涉的准分布式光纤法布里—珀罗(Fabry-Perot)传感器,以及近年来发展最为迅速的光纤光栅传感器而言,前者的工作原理是通过两个光纤端面作为反射面之间的距离变化来测量被测量物理量的变化;后者则是利用光纤材料的光敏性,即外界入射光子和光纤纤芯内锗离子相互作用引起折射率的永久性变化,从而在光纤纤芯内形成空间相位光栅,因此光纤光栅是在光纤纤芯中形成。两

者均是光纤本身的一个集成部分。与光纤的可熔接形成低插入损耗的连接,此类光纤传感器的在线(in line)特征,使其与光纤传输有天然的兼容性,可以替代传统的分立和薄膜型光无源器件,从而为全光通信系统和光纤传感网络提供巨大的设计灵活性。

以互联网为代表的计算机网络技术是 20 世纪计算机科学的一项伟大成果,它给人们的生活带来了深刻的变化,然而在目前,网络功能再强大,网络世界再丰富,也终究是虚拟的,它与人们所生活的现实世界还是相隔的,在网络世界中,很难感知现实世界,很多事情还是不可能的,时代呼唤着新的网络技术。光纤的这种神奇的、在线的传感、传输特性以及与以光纤为高速信道的互联网的结合,正迎合时代的需求,可以构成全新的物感网技术。光纤传感网络,就是把光纤传感器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种重大工程设施中,通过光缆连接,形成所谓的“光纤传感网络”,然后将此与现有的互联网整合起来,构成“光纤物感网”,即“光纤(有线)物联网”。它与无线物联网组合在一起,实现人类社会与物理系统的整合——“物联网”(the Internet of Things)。在这个整合的网络当中,存在功能强大的中心计算机群,采集和存储着物理的与虚拟的海量信息,通过分析处理与决策,完成从信息到知识,再到控制指挥的智能演化,进而实现整合网络内的人员、机器、设备和基础设施,实施实时的管理和控制。在此基础上,人类可以以更加精细和动态的方式管理生产和生活,达到“智慧”状态,从而提高资源利用率和生产力水平,改善人与自然间的关系。在这“智慧地球”的建设过程中,这种三网合一的、新的光纤传感网络将为之做出革命性的贡献,从而使光纤技术的发展再一次迈向新的高峰。



高锟先生曾接受过香港《文汇报》的采访,在回答记者的问题“现在您经常谈及新时代中新生活的新工具,您预计在多长的时间内,光纤会被另一种新工具取代?”时,向来不以高姿态说话的高锟,充满自信地回答说“我相信一千年内不会”。这绝不是哗众取宠的说辞,而是一个精辟的科学论断。我们知道,一个通信线路最主要的两个性能是损耗及带宽。光纤的低损耗,加上光纤放大器和波分复用等技术的进一步发展,将使光纤通信线路的这两项性能的优势发挥到极致。即使未来常温超导材料出现,也无法撼动光纤的地位,因为电的频率比光的频率小好几个数量级,任何电传输介质的通信容量根本无法比肩于光传输介质。更有甚者,与传统的导电材料铜不同,铜是不可再生资源,再过几十年,地球上铜矿必将开采殆尽。自从西门子公司开发出第一根铜质通信电缆至今,已逾一百年,再也没有另外一百年的铜资源可资利用了。而光纤的材料:二氧化硅及其掺杂材料,均是地球上取之不尽、用之不竭的物质,是大自然恩赐于人类的无穷的财富。光纤的价格之低廉也是任何其他传输媒质无法比拟的。每公里 G. 652 光纤价格已从初期的上千元下降到目前的 70 多元人民币,光纤的材料价格在光纤生产成本中所占比例很低,光纤生产成本主要由原材料提纯、生产设备折旧和工艺成本所决定。因此,随着光纤制造工艺水平的进一步发展和提高,生产规模不断地扩展,光纤价格还有相当的下降空间。高锟先生“一千年内光纤不会被取代”的精辟论断向我们指出,光纤产业在一个相当

长的时期内是一个朝阳产业,它将“独领风骚一千年”。

高锟先生开创的光纤时代发展之迅速,涉及领域之广泛,对人类社会生活影响之深远,实在是无人能预料。今天,应用最广泛的 G. 652 光纤,其结构(阶跃射率剖面,匹配型包层)之简单,传输性能之优越,价格之低廉已无有能望其项背者。G. 657 光纤的出现,也将原先人们对光纤“脆弱易折”的观感一扫而空。光纤到户(FTTH)正在走进千家万户。我国光纤光缆技术和产业历经三十多年的成长和发展,已经步入世界光纤制造大国,以前,光纤制造中最关键的制棒技术被美国和日本所垄断,近年来,我国光纤技术的不断发展与突破,促使日本各大光纤制棒龙头企业纷纷与国内光纤厂商合资光棒产业,这将大大加速我国光纤制造事业的发展。我们务必顺应其势,加大研发投入、持续技术创新,努力使我国早日成为光纤制造、光纤通信、光纤传感技术和产业发展的强国,让高锟先生开拓的光纤事业在其祖国不断发展壮大,为人类做出更大贡献。

(本文撰写于 2010 年 2 月)

目 录

序 言

前 言

初版序

代 序 高锟——一位以“光纤通信”创造历史的科学家

第 1 篇 光纤理论

第 1 章 光纤波导中的场和模	(3)
1.1 柱面电磁波, 场的模式展开和正交性	(3)
1.1.1 光纤波导中的柱面电磁波	(3)
1.1.2 场的本征模式展开和正交性	(4)
1.1.3 电磁场的纵、横场矢量的分解	(5)
1.1.4 波函数的平面波展开	(6)
1.2 光纤波导中的本征模	(6)
1.2.1 光纤波导中的本征模	(6)
1.2.2 单模光纤	(9)
1.2.3 单模光纤的损耗机理	(10)
1.3 光纤波导中的线性偏振模	(12)
1.3.1 光纤波导中的线性偏振模(LP 模)	(12)
1.3.2 LP 模的截止频率	(12)
1.3.3 LP 模的功率分布	(13)
1.4 光纤波导中的轨道角动量模式	(14)
1.4.1 光子轨道角动量(OAM)的概念和应用	(14)
1.4.2 光纤波导中的 OAM 模式	(15)
1.4.3 用以传输 OAM 模式的光纤结构	(16)

1.4.4 环状折射率分布的 OAM 光纤	(16)
1.5 光纤波导中的辐射模	(17)
1.6 光纤波导中的漏泄模	(20)
参考文献	(26)
第 2 章 单模光纤成缆前后的截止波长	(28)
2.1 单模光纤的截止波长	(28)
2.2 成缆光纤的截止波长	(30)
2.3 截止波长的测量原理	(32)
2.4 短光缆的截止波长	(35)
参考文献	(36)
第 3 章 单模光纤的波长色散及其补偿原理	(37)
3.1 光纤的折射率、群折射率、群延时和色散	(37)
3.2 单模光纤的波长色散	(42)
3.3 啁啾脉冲的基本概念	(44)
3.4 单模光纤波长色散的补偿	(46)
3.4.1 单模光纤波长色散的补偿原理	(46)
3.4.2 色散补偿光纤	(46)
3.4.3 线性啁啾光纤光栅及色散补偿	(48)
附录 单模光纤传输响应的近似表达式	(49)
参考文献	(51)
第 4 章 单模光纤的偏振模色散及其测量原理	(53)
4.1 单模光纤的本征偏振模及模式耦合	(53)
4.2 单模光纤的主偏振态(PSP)	(56)
4.3 偏振模色散和光纤长度的关系	(59)
4.4 用实验方法求主偏振态的 PMD(琼斯矩阵本征分析法)	(62)
4.5 用固定分析器方法测量偏振模色散(极值计算法)	(64)
4.6 用主偏振态(PSP)方法测量偏振模色散	(67)
4.6.1 波因卡球方法	(67)
4.6.2 偏振态(SOP)方法	(68)
附录 I 偏振模色散的有关定义	(69)
附录 II 二阶偏振模色散	(71)
参考文献	(71)
第 5 章 偏振模色散对系统性能的影响	(73)
5.1 偏振模色散对于光传输系统性能的影响	(75)
5.2 偏振模色散对于光传输距离的影响	(76)
5.3 光纤光缆标准规范中偏振模色散的表示方式	(77)

参考文献	(79)
第 6 章 多模光纤的进展、带宽测量及其规范	(80)
6.1 多模光纤的进展	(80)
6.1.1 62.5/125 μm 渐变折射率多模光纤(OM1,OM2)	(80)
6.1.2 50/125 μm 渐变折射率多模光纤(OM1,OM2)	(80)
6.1.3 OM3 光纤	(81)
6.1.4 OM4 光纤	(81)
6.2 多模光纤的带宽测量	(82)
6.2.1 DMD 模板(DMD Mask)法	(83)
6.2.2 有效模式带宽计算(EMBc)方法	(84)
6.3 弯曲不敏感多模光纤	(89)
6.4 多模光纤的技术规范	(92)
6.5 OM5 宽带多模光纤	(97)
6.5.1 OM5 宽带多模光纤	(97)
6.5.2 多模光纤的波长色散	(97)
6.5.3 OM5 宽带多模光纤的技术规范	(98)
6.6 VCSEL 激光器	(102)
6.6.1 垂直腔面发射激光器(VCSEL)的结构	(102)
6.6.2 VCSEL 激光器的特点	(103)
6.6.3 结语	(104)
参考文献	(104)
第 7 章 平面光波导技术及其发展	(105)
7.1 平面光波导概述	(105)
7.2 平面光波导传输原理	(108)
7.2.1 三层介质平板波导	(108)
7.2.2 弱导对称平板波导	(109)
7.2.3 矩形平板波导	(110)
7.2.4 对称矩形平板波导	(112)
7.3 PLC 产品开发情况简介	(112)
7.3.1 光分路器	(112)
7.3.2 量子哈达玛(Hadamard)门	(114)
7.3.3 平面波导阵列光栅(AWG)	(115)
7.3.4 光开关	(117)
7.3.5 可变光衰减器	(118)
7.3.6 光梳(Interleaver)	(119)
7.3.7 PLC 电光调制器	(119)
7.3.8 掺铒波导放大器(Erbium Doped Waveguide Amplifier, EDWA)	(120)