

光纤传输系统设计

张煦 等编著



● 上海交通大学出版社

光纤传输系统设计

张 煦等编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

近年来, 光纤通信技术发展十分迅速, 呈现兴旺发达的景象。本书专门介绍各种光纤传输系统的具体设计方法及有关理论, 内容包括光纤电视传输系统、光纤数据传输系统、数字光纤通信接收机、波分复用光纤传输系统、微机控制光纤多点监视系统、光纤局部区域网等。

本书可作为各类大专院校电子工程、光纤通信等专业教材, 也可供有关专业的研究、设计、技术人员作参考。

光纤传输系统设计

上海交通大学出版社出版

(淮海中路 1984 弄 19 号)

新华书店上海发行所发行

上海交通大学印刷厂印装

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 13.625 字数 302000

1988 年 7 月第 1 版 1988 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—2,000

ISBN7-313-00254-8/TN913 科技书目: 178-602

定价: 2.25 元

前 言

近年来，新兴技术“光纤通信”发展迅速，国内许多学校、研究所、工厂积极推动研究和开发工作，呈现兴旺发达的景象。上海交通大学成立了光纤技术研究所，其中一部分同志专门从事光纤传输系统和光纤局部区域网的研制、设计和推广应用，几年来积累了不少经验。很多科研项目的成果曾由专家评审复测，通过了鉴定，并已转让工厂投产，提供用户实际使用，获得良好效果。这些知识和经验确实是宝贵的，值得介绍给国内工程技术人员同行和大专院校学生，使其广为传播，促使光纤通信的新技术为更多同志所掌握，并使其在国内更普遍地发挥应有的作用。

本着这一意图，我们安排有关光纤系统和局域网的几个主要项目的主持人，根据各自的实际设计和研制经验及心得体会，分别撰写专章，统一体裁，编成一本《光纤传输系统设计》，公开出版。深信各项目主持人经过多年的辛勤努力，确实已成为光纤通信该项目的专家，他们亲自执笔，作系统性的总结，是对读者的贡献。

本书共收集七章，包括阙家溪同志的彩色电视光纤模拟传输系统设计，范戈同志的计算机数据光纤数字传输系统设计，朱志霓同志的光纤数字通信接收机设计理论，曹介元同志的波分复用光纤传输系统设计，胡家骏同志的微机控制光纤多点电视监控系统设计，屠世桢同志的光纤局部区域网设计。全书由张煦主编、整理和校核，并自己撰写光纤传

瑜系统回顾与展望一章。

总的来说,这本书是交大教师根据自己工作经验编写的。在国内外还没有出版过这样具体介绍设计方法的书。交大出版社出版这本书,应该说是国内光纤通信技术人员贡献。本书内容新颖,叙述具体,理论结合实际,而且文字深入浅出,便于自学。所有大专院校、研究所、工厂从事光纤通信技术研究、设计和开发、运用的广大技术工作者,都可参考本书。诚恳希望读者们批评指教。

张 煦

1987 年于上海交通大学

目 录

第一章 光纤传输系统的回顾与展望	1
§1-1 历史的回顾.....	1
§1-2 短波长向长波长过渡.....	6
§1-3 多模光纤向单模光纤过渡.....	9
§1-4 AlGaAs/GaAs 向 InGaAsP/InP 光器 件过渡.....	17
§1-5 数字通信与模拟通信.....	27
§1-6 长途通信与短距通信.....	32
§1-7 公用通信与专用通信.....	35
§1-8 波分复用的发展.....	38
§1-9 相干通信的发展.....	43
§1-10 光电子集成的发展.....	47
§1-11 未来的展望.....	49
第二章 光纤电视传输系统设计	54
§2-1 概述.....	54
§2-2 系统的基本构成和主要指标.....	55
§2-3 系统的分类和调制方式.....	57
§2-4 前置低噪声放大器设计.....	59
§2-5 光接收机设计.....	86
§2-6 光发送机设计.....	90

第三章 光纤数据传输系统设计.....99

§3-1 概述.....	99
§3-2 系统的分类及特点.....	100
§3-3 系统的主要技术指标及其测试.....	105
§3-4 ASK 调制的数字信号的频谱分析.....	108
§3-5 小型通用光纤数据传输系统设计.....	120
§3-6 局部区域网光纤数据传输系统设计.....	142

第四章 数字光纤通信接收机设计..... 157

§4-1 概述.....	157
§4-2 光检测器件.....	161
§4-3 预放大器.....	169
§4-4 接收机灵敏度.....	177
§4-5 动态范围.....	192
§4-6 PIN/FET 组件与 APD 接收机的比较.....	19 ⁶
§4-7 滤波和均衡.....	202
§4-8 判决再生和时钟提取.....	20 ⁸
§4-9 线路码和编解码器.....	214

第五章 波分复用光纤传输系统设计..... 220

§5-1 概述.....	220
§5-2 波分复用系统合波器和分波器的设计 方法.....	225
§5-3 波分复用合波器和分波器的典型结构 和特性.....	237
§5-4 波分复用光纤传输系统设计.....	259

第六章 微机控制光纤多点监视系统设计	285
§6-1 概述.....	285
§6-2 总体方案考虑.....	286
§6-3 系统的硬件设计.....	294
§6-4 系统的软件设计.....	301
§6-5 系统的抗干扰措施.....	309
第七章 光纤局部区域网设计	312
§7-1 概述.....	312
§7-2 总线型光纤计算机网.....	317
§7-3 环型光纤计算机网.....	378
§7-4 综合服务光纤局域网.....	398
§7-5 光纤局部区域网的设计考虑.....	418

第一章 光纤传输系统的回顾与展望

张 煦

§1-1 历史的回顾

近10年来,人们讲到世界新技术革命和即将到来的信息社会,一致承认光纤通信(或称光波通信)技术是最主要的支柱之一,它是真正的新兴技术,也是最重要的信息传输工具,它的研究成果不断被革新,开发应用的进展迅猛异常,而且富有强大的生命力,其潜在的优越性有待继续发掘。

人们回顾光纤通信技术的历史,总要提起一百年以前贝尔表演的光电话(photophone)实验,当时利用天然的太阳光束作为载波,载荷电话信号,传输距离200 m。因为当时还没有可靠的强光源,也没有低损耗的传输媒介,这种原始通信仅是实验示范,不可能得到实际应用。然而,它的基本原理正是近代实用光通信的原理,所以这个实验仍具有重要的历史意义。

激光技术对光纤通信是必不可少的。1960年,激光器的研制成功,曾被用作通信的强光源,从而在视距路程中利用周期设置的光聚焦元件组成光束波导,试验大气光通信,虽然以后没有实际应用,但对光纤通信产生了推动作用。60年代上半期,在理论上分析了光导纤维作为介质波导的性能,也曾制成真正的光纤,但其传输损耗高达1000 dB/

km, 比实际通信的要求相差两个数量级, 谈不上有什么用处。

1966 年, 首次在实验室内大胆建议用有包层的玻璃纤维作为传输媒介, 制成高纯二氧化硅的整块玻璃, 在光波长为 $0.85\mu\text{m}$ 时, 测得损耗低至 5dB/km , 这虽是实验室内的建议和尝试, 却具有极大的启发性, 后来公认这是光纤通信的首创发明。

1970 年, 国外工厂宣布, 掺杂的二氧化硅光导纤维达到了低损耗 20dB/km 。当时认为这一损耗值标志着进入通信应用的门限。同年, 半导体 AlGaAs 制成激光二极管和发光管, 发射波长为 $0.85\mu\text{m}$, 能在室温下连续工作, 这就决定了通信可使用半导体光器件。所以, 1970 年作出了光纤通信技术的两个关键性突破, 是值得纪念的。

1973~1974 年, 制造光纤的汽相沉积工艺公诸于世, 外部汽相沉积法 OVD 制成的光纤在波长 $0.8\sim 0.85\mu\text{m}$ 时的损耗低至 4dB/km , 改进化学汽相沉积法 MCVD 制成的光纤在波长 $1.06\mu\text{m}$ 时的损耗低至 2dB/km 。在那一时期, AlGaAs 激光管等光源器件的寿命已达 10^4h , 又有了 Si 雪崩管等光检测器件, $0.85\mu\text{m}$ 通信使用的发送和接收光端机和中继机也研制成功, 性能满足理论要求。而光纤熔接法的成功, 使光缆能拼接至需要长度。至此, 组成光纤系统的各项器件设备都齐全了。1976 年, 开始进行光纤通信系统的现场试验, 在光波长 $0.82\mu\text{m}$ 传输 PCM 三级群, 码速为 45Mb/s 的数字通信。这意味着光纤传输系统正式走向实用化。这种 $0.85\mu\text{m}$ 多模光纤系统在历史上称为第一代光纤传输系统。

光波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的光纤传输系统正准备开展实验时, 1975~1976 年, 发现二氧化硅玻璃光纤的材料色散在波长

1.3 μm 时最小值近于零。又发现掺锗的二氧化硅光纤在波长1.3和1.55 μm 时有更低的损耗0.5dB/km。这意味着找到了第二个传输窗口,既有最低损耗,又包含零色散波长,人们就把0.8~0.9 μm 波段相对地称作短波长,把1.2~1.6 μm 波段称作长波长。激光技术的研究工作者,成功地为长波长找到了InGaAsP半导体,制成激光管和发光管,又用同样材料制成PIN和APD。这些器件的性能虽没有短波长光器件理想,但也可正式使用。于是,1978年开始进行长波长1.3 μm 利用LD或LED和渐变折射率分布多模光纤的系统试验,传输中等码速的数字通信,并于1980~1982年公开报道。这种1.3 μm 的多模光纤系统称为第二代光纤传输系统。由于1.3 μm 的光纤损耗远小于0.85 μm 的损耗,第二代系统的传输码速和距离都优于第一代系统。因此,短波长光纤系统迅速地被长波长光纤系统所代替。

1982年起,长波长单模光纤传输系统在几个国家开始进行实验,波长仍为1.3 μm ,使用LD,可传输高码速140~600Mb/s,中继距离10~30km,陆地光缆多用这种系统,长达6.650km的越洋海底光缆也用这种系统。现在,这种1.3 μm 单模光纤系统的实用化正处于高潮,它们被称为第三代光纤传输系统。由于单模光纤的色散只有模内色散,1.3 μm 是零色散波长,所以这种系统的潜在传输带宽和码速容量极大。正由于这原因,多模光纤系统迅速地被单模光纤系统所代替。由上可见,仅仅几年时间,光纤传输系统已从第一代很快过渡至第二代,又很快过渡至第三代,飞跃似的进展,使实际通信工程的设计人员难以应付。

长波长单模光纤,色散最低固然在1.3 μm 处,约为2ps/km·nm,但损耗最低是在1.55 μm 附近,约为0.16dB/

km, 不到 $1.3\mu\text{m}$ 的一半, 尽管 $1.55\mu\text{m}$ 的色散较大, 为 $1.3\mu\text{m}$ 的十倍。人们希望充分利用 $1.55\mu\text{m}$ 这个最低损耗的波长, 预料 $1.55\mu\text{m}$ 单模光纤系统必将成为未来的第四代光纤传输系统。为了达到距离长和容量大的目的, 光纤设计和制造的研究课题是降低 $1.55\mu\text{m}$ 的色散而不相应加大损耗, 光源器件的课题是单频激光管。这样, 第四代光纤系统比第三代更为优越。第四代光纤系统目前尚在积极研制阶段, 但不久即将问世, 这是肯定无疑的。

光纤传输系统虽然主要用于数字通信, 包括二进制 PCM 数字信号和计算机数据传输, 但也可用于模拟电视图像的短距传输。当然, 在相对数量上, 数字通信占绝大多数, 模拟电视仅占极小比例。

光纤传输系统的研究和革新, 常以长途线路为主要对象, 在国际学术会议上, 往往竞相报道自己是最长距离的冠军, 或是最高码速的冠军。然而, 随着信息社会的来临, 用户要求信息服务种类多、容量大。这意味着, 光纤传输在短距宽带市内网和局部区域网可以发挥它的巨大潜在容量。在数量上, 光纤的短距应用大大地超过长途应用。

光纤传输系统主要应用于公用通信网, 包括国内长途线路、市内局间线路、用户线路, 但也非常适合于专用通信, 例如铁道、电力线、矿井、电视台、计算机网和军队, 都需要光纤系统, 有短距的, 也有长途的。1978 年公开报道的第一代光纤传输系统, 就是专为市话局间线路作现场实验, 从而揭开了光纤应用于公用通信网的序幕。其后, 全国范围市话局间线路广泛增设光缆, 而且从第一代过渡至第二代, 甚至第三代光纤系统。然而, 在有些国家, 光纤系统先应用于高压电力线路, 另一些国家先应用于军队通信, 这两个例子都

是先应用于**专用通信**，当经验成熟，再促使公用通信网仿效使用。

随着激光技术的改进，半导体单频激光管性能的完善，线宽很窄时，**有条件研究采用更复杂、更高级的传输方式**。例如波分复用 WDM，可以有效地加大一根光纤的总传输容量。又例如相干通信，调制用 FSK 或 PSK，检测用外差或零差，光纤可以象无线电通信一样有效地延长传输距离，并选择接收这些新的方式，吸引着研究工作者继续研究、探索和开拓。显然，新技术和新方式将集中于长波长，特别在 $1.55\mu\text{m}$ 波段。

在设备上，光纤通信过去是从使用分立器件开始的，而微电子学集成电路的发展不能不影响光纤通信。集成光学将用于无源器件，集成光电子学将用于无源器件与有源器件的集成化。光纤传输系统既然要广泛应用于市内用户网，势必需要小型、可靠和价廉的设备，这方面，集成光电子学将起关键作用。

在全面、历史回顾光纤传输系统的发展之后，本章准备从九个方面分别进行阐述。内容包括三个从旧向新的过渡：短波长 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 向长波长 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 的过渡，多模光纤向单模光纤的过渡，AlGaAs/GaAs 激光管、发光管向 InGaAsP/InP 光源和光检测器件的过渡；三种通信应用的分类：数字通信与模拟通信，长途通信与短距通信，公用通信与专用通信；以及三项新技术的发展：波分复用的发展，相干通信的发展，集成光电子器件的发展。最后简述光纤传输系统未来的趋向。

§1-2 短波长向长波长过渡

过去和现在通信使用的光纤，都是以石英玻璃为材料，即二氧化硅 SiO_2 ，再利用适当的掺杂，使玻璃的折射率发生微小变化。纤芯的折射率必须稍高于周围包层的折射率，才能把光局限在纤芯内部传播，成为光波导，称作光导纤维。早期的纤芯是 SiO_2 掺 GeO_2 和少量的 P_2O_5 ，使折射率提高，而包层保持为纯 SiO_2 纤芯与包层的相对折射率差 Δ 远小于 1，所以在理论上说通信光纤是弱导引的波导。

当初研制 SiO_2 掺杂多模光纤的主要目标是降低光纤的损耗-波谱特性。图 1-1 示出了 10 年来的进展，由图可见，在 70 年代上半期，仅发现 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段的传输窗口，损耗从 20dB/km 减至 4dB/km ，而且 AlGaAs 激光管和发光管正发射这一波段中的波长。所以，这一波段立即得到

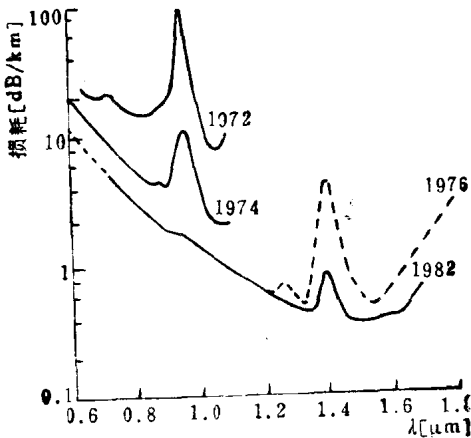


图 1-1

采用，成为第一代短波长多模光纤传输系统。70年代下半期，人们设法减少光纤的OH水份杂质，这是一个关键问题，不仅 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段的损耗进一步降低至 2dB/km ，而且发现了 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 波段更低损耗的传输窗口，它包含材料色散为零的波长 $1.3\mu\text{m}$ ，同时InGaAsP激光管和发光管也发射这一波段的波长。相对而言，从损耗和色散的观点分析， $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长都远优于短波长。所以后来第二、三、四代光纤传输系统都是利用长波长，特别是 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 两个波长。短波长必然过渡至长波长，这是明确无误的。

OH引起的吸收损耗很严重，1ppm的OH将使OH振动的二次谐波 $0.95\mu\text{m}$ 出现 1dB/km 的损耗，在OH振动基波 $1.39\mu\text{m}$ 处出现特大损耗高峰，为 $30\sim 40\text{dB/km}$ 。为此，制造光纤时要特别注意加强去水措施，例如用氯去水。1972年，OH含量约100ppm，1982年，减至10ppb，共改进了四个数量级，金属杂质含量也保持在ppb级，这就保证了长波长的低损耗优点。迄今为止，一般在 $1.3\mu\text{m}$ 处的损耗为 0.5dB/km ， $1.55\mu\text{m}$ 的损耗低至 0.2dB/km 。这是两个最重要的波长， $1.3\mu\text{m}$ 有零色散和低损耗， $1.55\mu\text{m}$ 则是最低损耗的波长。所以，第二、三代光纤传输系统用 $1.3\mu\text{m}$ ，第四代系统将用 $1.55\mu\text{m}$ 。

图1-2示出了最新的长波长单模光纤损耗-波谱特性，单模光纤的 $\angle$ 值比多模光纤的小，纤芯掺 GeO_2 浓度较少，因而瑞利散射损耗较小，结果是单模光纤的损耗比多模光纤的稍小。图示波长 $1.57\mu\text{m}$ 有最低损耗，为 $0.157\text{dB/km} \pm 0.005$ ，这个损耗值相当于光沿1km长的光纤传播，仅损失4%。人们若透过最清晰的玻璃窗看去，由于窗两面的菲涅耳反射，光损失8%。这意味着，现在光纤的损耗小于最清

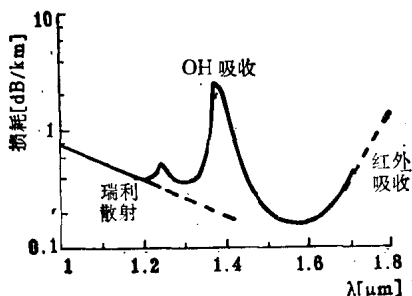


图 1-2

晰的玻璃窗。由于本征瑞利散射随 λ^4 反比下降，而红外吸收从波长 $1.7\mu\text{m}$ 起陡峭上升，两条曲线的尾巴交叉，使波长 $1.55\mu\text{m}$ 附近具有最低损耗。这也正是长途传输和相干通信决定采用 $1.55\mu\text{m}$ 单模光纤第四代光纤系统的理由。

不同的光纤制造工艺得到稍为不同的损耗-波谱特性。OVD 制成的单模光纤可能比其他方法更能得到在 $1.5\mu\text{m}$ 处最低损耗，为 0.16dB/km 。VAD 工艺能把 OH 含量减至几

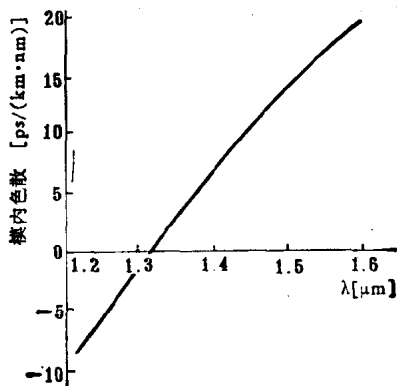


图 1-3

个 ppb, 它制成的光纤在 $1.39\mu\text{m}$ 处具有最低的 OH 吸收, 约为 1.0dB/km 。MCVD 法近年采用压低包层式, 特点是在长波长兼得低损耗, 对弯曲不灵敏和零色散波长位于 $1.3\mu\text{m}$ 等。图 1-3 示出了常规光纤的模内色散-波谱曲线, 显示零色散波长位于 $1.3\mu\text{m}$ 附近。

§1-3 多模光纤向单模光纤过渡

实际情形是, 短波长 $0.85\mu\text{m}$ 和长波长 $1.3\mu\text{m}$ 有多模光纤, 长波长 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 有单模光纤。多模光纤与单模光纤相比有很多差异, 诸如尺寸、 Δ 值、折射率分布, 更重要的差异是色散和带宽或码速容量。多模光纤的纤芯直径和包层外径是 $50/125\mu\text{m}$, 单模光纤则是 $8/125\mu\text{m}$ 。多模光纤的 $\Delta \approx 0.01$, 单模光纤的 $\Delta \approx 0.002$ 。多模光纤纤芯内的折射率分布少数是阶跃分布 SI, 更多是近似于抛物线的渐变分布 GI。单模光纤纤芯内的折射率分布本来是阶跃分布, 后因改进性能, 纤芯和包层采用各种不同的分布, 后面将要详述。多模光纤的包散主要是各个模式(常常有数百个模式)不同的群速引起的模间色散, 以及折射率随光源发射波谱的不同使波长发生变化而引起的材料色散。由此, 光纤色散的单位为 $\text{ps/km}\cdot\text{nm}$ 。但在多模光纤, 更有用的单位是保证误码率指标 10^{-9} 的带宽-距离乘积 $\text{MHz}\cdot\text{km}$ 。早先的阶跃分布多模光纤, 带宽-距离乘积只有 $13\text{MHz}\cdot\text{km}$ 。采用了近于抛物线的渐变折射率分布后, 带宽-距离乘积大大提高。最新工艺制造的多模光纤, 模间色散的限制达 $2\text{GHz}\cdot\text{km}$ 。如光源为面发光 LED, 谱宽 120nm , 材料色散确定的上限为 $2.4\text{GHz}\cdot\text{km}$ (这意味着, 对于第二代光纤系统, 利用 LED 的 $1.3\mu\text{m}$ 多模光