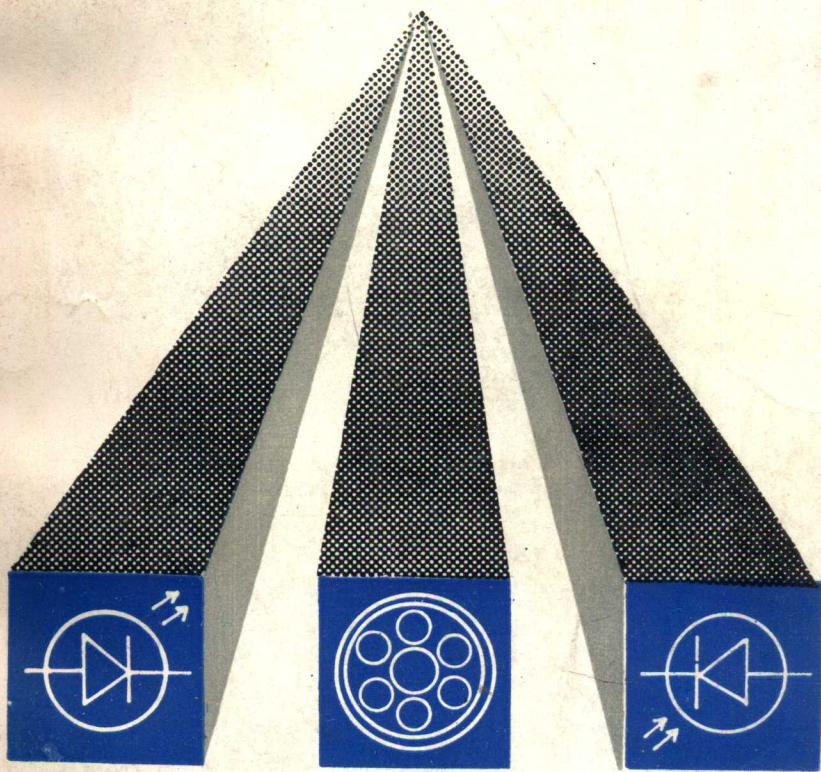


光纤通信技术

杨同友 编



中国通信学会通信科普读物研究会主编

光纤通信技术

杨同友 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书在简要介绍光纤、光电器件原理的基础上，从实用的观点出发，介绍了光纤的测试方法、光缆敷设、光端机、光纤通信监控系统和设计光纤通信系统应考虑的一些问题。同时，还介绍了未来的几种新型的光纤通信系统。

本书可供从事光纤通信实际工作的技术人员，以及中等专业学校的师生参考。

光 纤 通 信 技 术

杨同友 编著

责任编辑：李树岭

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河南省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1986年8月第一版
印张：11 12/32 页数：182 1986年8月河南第一次印刷
字数：261千字 印数：1—5,000册
统一书号：15045·总3222—有5469
定价：2.35 元

前 言

通信科学技术普及读物的编辑出版方针是面向生产、面向群众、面向基层。它不仅包括知识性的图书，而且以实用性的图书为重点，同时也出一些介绍新技术的读物。

通信科普读物的主要读者对象是从事通信工作的干部、工人以及关心通信事业的广大读者。根据他们的特点和需要，在内容和选材上力求密切联系通信科研、生产、使用、维护和管理上的需要；在叙述上力求通俗易懂、概念清楚、结合实际、生动活泼，以帮助读者学习钻研通信科学技术，为培养一代新人、提高全民族的科学文化水平作出贡献。

由于我们缺乏经验，难免存在不足之处，欢迎广大读者提出意见和建议。

中国通信学会科普读物研究会

作 者 的 话

光纤通信是一门新兴的科学技术，它的发展异常迅速。目前，以短波长（ $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ ）的半导体光源和多模石英光纤为代表的第一代光纤通信系统，技术上已很成熟，并已在中小容量、中短距离的通信线路中推广应用；以长波长（ $1.0\sim 1.6\mu\text{m}$ ）光源和单模光纤为代表的第二代光纤通信系统也已日臻成熟，正在向长距离的通信线路上推广、应用。在我国，短波长光纤通信系统已投产使用，长波长光纤通信正进入场地试验阶段。除了在公用通信中正顺利发展外，在专用通信以及其它许多领域中正在日益得到更广泛的应用。

本书为适应读者要求，在简要介绍光纤、光电器件原理的基础上，从实用的观点出发，着重介绍光纤的测试方法、光缆敷设、光端机、光纤通信监控系统和设计光纤通信系统应考虑的一些问题。同时，还介绍了未来的几种新型的光纤通信系统。

本书是在作者使用多次的讲稿和发表的文章基础上加工整理而成，初稿经陶作民同志审阅。在写作过程中得到了谢玉堂、周顺钦、苏斌、冯佩珍、李先源等同志的大力支持，在此表示深切的感谢。

由于作者水平有限，可能有不少缺点和错误，希各位读者批评指正。

杨同友

1985年4月于武汉

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 从光电话到光纤通信.....	(1)
第二节 光纤通信的特点.....	(8)
第三节 光纤通信系统的基本组成.....	(13)
第四节 光纤通信系统实例.....	(21)
第二章 通信用光纤和光缆	(31)
第一节 光纤传输的基本原理.....	(31)
第二节 光纤的种类和特性.....	(44)
第三节 光纤测量技术.....	(64)
第四节 光纤光缆制作技术.....	(82)
第五节 光纤连接与光缆敷设技术.....	(90)
第六节 光缆维护技术.....	(107)
第三章 光纤通信用光电器件	(113)
第一节 光电器件的一般工作原理.....	(113)
第二节 光纤通信用光源.....	(117)
第三节 光电检波器.....	(133)
第四节 无源器件.....	(152)
第四章 光端机	(160)
第一节 光发送机.....	(160)
第二节 光接收机.....	(174)
第三节 光中继器.....	(220)
第四节 光端机的测试.....	(225)

第五章 实现光纤通信系统的一些考虑	(232)
第一节 中继距离的考虑.....	(233)
第二节 接口与线路码型的考虑.....	(255)
第三节 模式噪声的考虑.....	(265)
第四节 光脉冲占空比的考虑.....	(275)
第五节 发送端光功率的考虑.....	(276)
第六节 系统性能的考虑.....	(280)
第七节 经济性的考虑.....	(285)
第六章 光纤通信线路的监视与控制	(289)
第一节 监控系统的监控方式与基本组成.....	(290)
第二节 监控系统的主要功能.....	(293)
第三节 监控信息的传输.....	(298)
第七章 光纤模拟系统	(302)
第一节 光纤模拟系统的基本组成.....	(302)
第二节 单视频信号的光纤模拟系统.....	(311)
第八章 未来的光纤通信系统	(325)
第一节 波分复用系统.....	(325)
第二节 超长波长光纤通信.....	(337)
第三节 外差光纤通信.....	(341)
第四节 全光通信系统.....	(351)
附录一 K. C. Kao 1966 年发表的论文(节录)	(354)
附录二 光纤数字通信系统成本计算	(354)

第一章 概 论

第一节 从光电话到光纤通信

一、贝尔的光电话

三千多年前，我国周朝就有利用烽火台的火光传递信息的方法，但那是一种利用普通光的视觉通信。而我们今天所指的光通信与这种视觉通信完全不同，它是利用光波作载波传递信息的通信方式。从这个概念出发，光通信的历史只能从电话发明家贝尔发明的“光电话”算起。

1880年，贝尔发明了一种利用光波作载波传送话音信息的“光电话”，如图1·1·1所示。利用太阳光或弧光灯作光源，光束通过透镜I聚焦在话筒的振动镜片上，当人对着话筒说话时，振动镜随着话音振动，从而使反射光的强度随着话音的变化而变化。此时，反射光就被话音所调制，传送到接收端的光波就是已调光波。接收端设有一面抛物面反射镜，把从大气中传送来的已调光波反射到硅片上，硅片将光能转变成电流，把电流送到听筒就可以听到发送端讲话的声音。

、贝尔的光电话曾受到人们的注意和重视，贝尔本人也很称赞地说：光电话是我一生最伟大的发明。但是，由于当时各种技术条件的限制，这种光电话的传输距离很短，实用意义不大，只能说是光通信的雏型。在光电话问世后一段漫长的时间

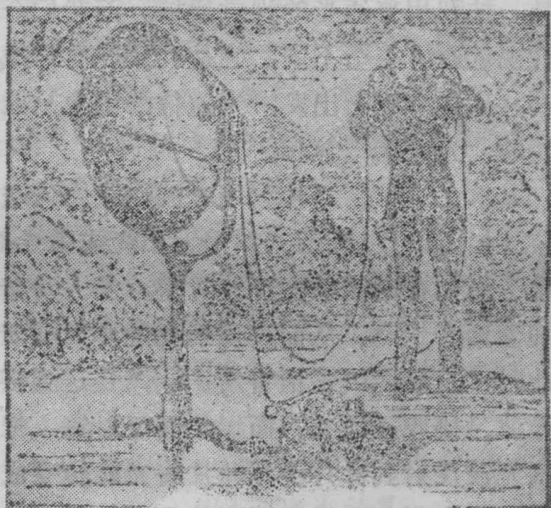
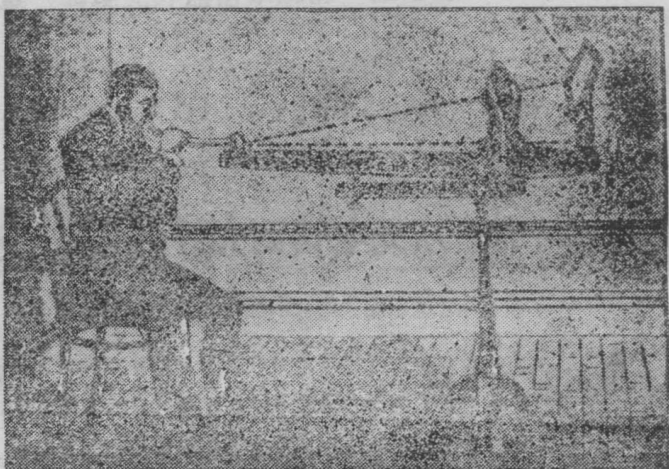


图 1.1.1 贝尔的光电话

里，光通信进展很慢，其主要原因是没有理想的光源和传输介质，这就使光通信沉睡了80年。但是，光电话的发明的确是很伟大的，它证明了利用光波作载波传递信息的可能性。

二、激光器的诞生和光波大气通信

1960年7月8日，美国科学家梅曼（Maiman）发明了第一个红宝石激光器。激光器发出的激光与普通光相比，谱线很窄，方向性极好，亮度极高，是一种频率和相位都一致的相干光，其特性与无线电波相似，它是一种理想的光载波。因此，激光器的出现使光波通信进入了一个崭新的阶段。

激光是“LASER”的译名，“LASER”是由英文“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”中每个单词的第一个字母组成，其意思是“受激发射的光放大”。由于激光与无线电波的性质相似，而频率又比一般的无线电波高得多，我们今天用于光通信的光波频率一般约为 10^{14} Hz，它比频率为 10^{10} Hz的微波和频率为 10^{11} Hz的毫米波高几个数量级，因此，激光的出现，相当于从毫米波向更高频率的发展，它可以极大地增加通信容量，从而引起了通信研究工作者的极大兴趣，使激光很快在通信领域里得到了应用。在红宝石激光器发明后不久，各种不同材料的激光器相继出现，如氦—氖激光器、二氧化碳激光器等。紧接着，美国麻省理工学院利用氦—氖激光器和二氧化碳激光器，模拟无线电通信进行了激光大气传输试验。反复试验的结果表明，在晴朗天气，通信稳定可靠，距离较长，但在不良天气，通信极不稳定甚至中断，不能做到“全天候”通信，这点是一个好的通信系统不能允许的，它反映出这种以大气作为光波传输介质，“靠天吃饭”的通信方式的致命弱点。

大气光波通信不稳定的因素很多，但主要原因是光波在大气中传输受到大气层中变化无常的气候条件的影响，光波能量

损失严重。例如，大气湍流（大气层中，因各处的大气密度不均，温度不同，使传播速度发生变化而造成的旋涡似的流动现象）、雨、雾、雪，大气灰尘和自然辐射对光波能量的吸收和散射，使光波在传输过程中能量迅速衰减，严重影响通信的稳定性和可靠性，天空中的鸟类和各种飞行物都是光波传输路线上的“拦路虎”。

由此可见，光波在大气层中的传输是很不顺利的，光波大气通信不是人们为了追求长距离大容量的一种理想的通信方式。然而，光波通信的许多优越性驱使人们去进一步探索新的传输介质。

三、光波通信转入地下

为了使光波不受大气层中各种因素的干扰，人们将光波的传输转入了地下，进行了光波地下传输的各种试验，这就是透镜波导和反射镜波导的光波传输系统。

透镜波导是在金属或水泥管道内，每隔一定距离安装一个玻璃透镜，通过透镜的作用将光波限制在管道内传输以达到光波通信的目的。这种传输方式完全可以消除大气对光波传输的

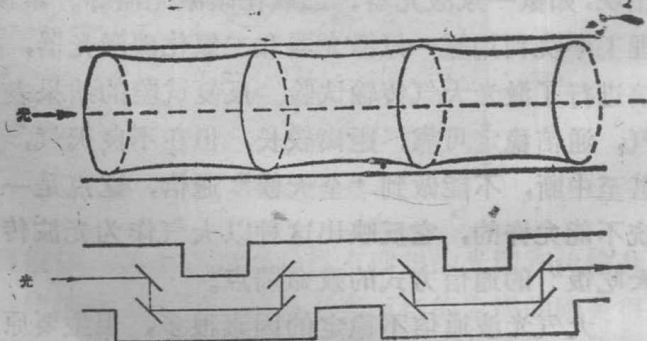


图 1.1.2 透镜波导和反射镜波导

各种干扰。反射镜波导的原理与透镜波导相似，不同之处是一个用会聚透镜，一个用反射镜，如图1.1.2所示。

从理论上说，这两种波导都是可行的，但是，在人们的大量研究和实践以后发现，在实际应用时，这种传输方式将遇到许多不可克服的困难。例如，现场施工十分复杂，对每个透镜或反射镜要进行严格的校准和牢固的安装；为了防止地面对波导的影响，除了采取必要的措施以外，还要尽可能将波导深埋，或选择人、车稀少的地区；在波导路由转弯时，需要增加透镜或反射镜，弯度越大，增加的透镜或反射镜数也越多，光能的损耗也就越大，自然使系统造价昂贵，调整、测试、维修都很困难。由此可见，这种地下的透镜波导和反射镜波导是无实用意义的。

在“天空”和“地下”都不能理想地传输光波的情况下，有人对光波通信产生了悲观情绪，甚至有人主张放弃光波通信的研究。1965年左右，光波通信的研究转入低潮，成了不为人们所重视的“冷门”。

四、光纤技术的发展

“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”，正在光波通信由于传输介质问题而出现低潮的时候，1933年出生于上海的英籍华人高锟(K. C. Kao)博士，在前人大量研究工作的启发下，通过他自己的大量工作，对光波通信作了大胆的设想，他认为，电可以沿着导电的金属导线远距离传输，光也应能沿着可以导光的玻璃纤维传输。1966年，高锟首次利用无线电波导通信的原理，提出了低损耗的光导纤维(简称光纤)的概念(见附录一)。在当时最好的玻璃，其损耗还处于每km为

1000dB左右(即光波沿着光纤传输1 km后,其光能只有原来的 10^{100} 分之一)的情况下,他预见到,只要设法消除玻璃中的各种杂质,可使光的吸收减到非常小,生产出一种有实用意义的低损耗光纤是完全可能的。在高锟所提出的理论的指导下,美国康宁公司马勒博士等三人的研究小组,经过大量的研究和试验,终于在1970年8月首次研制成功损耗为20dB/km(光波沿光纤传输1 km后,光能损耗为原来的1%)的石英光纤。这种光纤直径很小,只有人的头发丝那么细,并且柔软可挠。它的出现,既克服了地下透镜波导或反射镜波导存在的问题,又能防止大气对光波的干扰,是一种理想的传输介质。

就在光纤损耗获得巨大突破的同一年,美国贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的半导体激光器。与气体激光器相比,半导体激光器体积小,耗电少,又能直接用电流调制,使用方便,这就为光纤通信技术的发展创造了更为有利的条件。

半导体激光器室温连续振荡是光源研究的重大突破。在研究初期,曾采用了增加注入电流密度的方法,使电流密度高达每平方厘米数万安培,因而引起器件的严重发热,致使器件损坏。为此,需将它置于很低的温度(-200°C)下工作,或要求器件脉冲式工作,因此,这样的器件对通信来说是无实用意义的。室温下连续振荡半导体激光器初期的寿命很短,有的几小时,甚至几秒钟就损坏了,即使如此,它仍为半导体激光器的发展奠定了基础。1977年,贝尔实验室研制成功室温下外推寿命为100万小时的GaAlAs半导体激光器。至此,可以说推进光纤通信实用的两大障碍都得到了满意的解决。此后,各种光纤通信系统犹如雨后春笋般地发展起来。

1974年,贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的方法,称作改进的化学汽相沉积法(MCVD),光纤损耗下降到1 dB/km;

1976年，日本电话电报公司研制出更低损耗光纤，损耗下降到 0.5dB/km 。

在光纤通信系统方面，美国于1976年在亚特兰大成功地进行了码速为 44.7Mb/s 的光纤通信系统试验；日本电报电话公司开始了 64km 、 32Mb/s 、突变折射率光纤系统的室内试验，并研制成功 $1.3\mu\text{m}$ 波长的 InGaAsP 半导体激光器。

1977年，美国开始在芝加哥电话局进行码速为 44.7Mb/s 光纤通信系统的场地试验；日本电报电话公司发明光纤轴向沉积(VAD)法。

1978年，日本开始了码速为 32Mb/s 和 100Mb/s 、渐变折射率多模光纤通信系统的现场试验。

1979年，美国电报电话公司和日本电报电话公司研制成功 $1.55\mu\text{m}$ 连续振荡半导体激光器；日本电报电话公司研制出 0.2dB/km 的极低损耗石英光纤，同时进行了 $1.3\mu\text{m}$ 长波长光纤通信系统的试验。

1980年，美国标准化FT3(码速为 44.7Mb/s ，渐变折射率光纤)光纤通信系统投入商用；日本 400Mb/s 、单模光纤通信系统现场试验。

1981年，日本F—32M和F—100M光纤通信系统商用。

目前，以短波长($0.8\sim 0.9\mu\text{m}$)半导体光源和多模石英光纤为代表的第一代光纤通信系统，技术上已很成熟，并已在中小容量、中短距离的通信线路中推广应用；以长波长($1.0\sim 1.6\mu\text{m}$)光源和单模光纤为代表的第二代光纤通信系统也已成熟，正在向长途干线推广应用；以超长波长($2\mu\text{m}$ 以上)光纤、光集成和外差通信技术为代表的第三代光纤通信系统正在迅速发展，光纤通信技术正在许多领域推广应用。

第二节 光纤通信的特点

光纤通信与电通信相比，主要区别有两点，一是以很高频率的光波作载波；二是用光纤作为传输介质。基于以上两点，光纤通信有以下的优点和缺点：

优点：（1）传输频带很宽，通信容量大；（2）中继距离长；（3）不怕电磁干扰；（4）保密性好，无串话干扰；（5）节约有色金属和原材料；（6）线径细、重量轻；（7）抗化学腐蚀、柔软可挠。

缺点：（1）强度不如金属线；（2）连接比较困难；（3）分路、耦合不方便；（4）弯曲半径不宜太小。

应该指出：光纤通信的三个缺点，从技术上说都是可以克服的，不影响光纤通信的实用。下面，我们着重介绍光纤通信的优越性和它的应用领域。

一、传输频带很宽，通信容量大

随着科学技术的迅速发展，人们对通信的要求越来越多。为了扩大通信容量，有线通信从明线发展到电缆；无线通信从短波发展到微波和毫米波，它们都是通过提高载波频率来扩大通信容量。因为光纤中传输的光波要比无线通信使用的频率高得多，所以，其通信容量也就比无线通信大得多。

目前，光纤通信使用的频率范围一般为 3.5×10^{14} Hz（波长为 $0.85 \mu\text{m}$ ），如果我们利用它的带宽的一小部份，并假设一个话路占4 kHz的频带，则一对光纤可以传送10亿路电话，即一对光纤可供全国10亿人每人装二部电话，它比我们今天所

使用的所有通信系统的容量还大许多。然而实际上,由于光纤制造技术和光电器件特性的限制,一对光纤要传送10亿路电话是有困难的。目前的实用水平为每对光纤6250个话路(400Mb/s);现场试验水平为每对光纤25000个话路(1.6Gb/s)比目前从北京到上海的1800路中同轴电缆的容量大得多;实验室水平为30720个话路,32个数字电视(2.24Gb/s)。

如果像电缆那样把几十根或几百根光纤组成一根光缆(即空分复用),其外径比电缆小得多,传输容量却成百倍地增长,如果再使用波分复用技术(见第九章),其传输容量就会大得惊人了,这样,就可以满足任何条件下信息传输的需要,对各种宽频带信息的传输具有十分重要的意义。光纤通信与其他通信线路的容量比较见表1.1。

二、中继距离长

我们知道,信号在传输线上传输,由于传输线的损耗会使信号不断衰减,信号传输的距离越长,衰减就越严重,当信号

表 1.1 各种传输线路容量的比较

传 输 线 路	传输话路数(估计)
平 衡 电 缆	3,000
微 波	50,000
同 轴 电 缆	100,000
毫 米 波 导 管	300,000
光 纤 光 缆	2,000,000*

• 相当于800Mb/s × 100芯 × 4波长
 ↓ ↓ ↓
 电复用 空分复用 波分复用

衰减到一定程度以后，对方就接收不到信号了。为了长距离通信，往往需要在传输线路上设置许多中继器，将衰减了的信号放大后再继续传输。中继器越多，传输线路的成本就越高，维护也就越不方便，若某一中继器出现故障，就会影响全线的通信。因此，人们希望传输线路的中继器越少越好，最好是不要中继器。

减小传输线路的损耗是实现长中继距离的首要条件。因为光纤的损耗很低，所以能实现很长的中继距离。目前，实用石英光纤的损耗可低于 0.5dB/km ，这比目前其它任何传输介质的损耗都低，见图 1.2.1。由石英光纤组成的光纤通信系统最

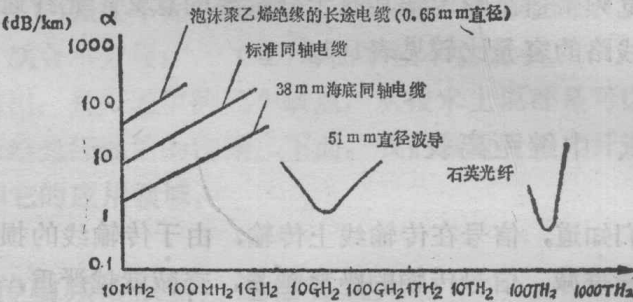


图 1.2.1 各种传输介质的损耗特性

大中继距离可达161km，而现有的电通信，中同轴电缆系统最大中继距离为 6 km，最长的微波中继距离也只有50km左右。如果将来采用非石英系极低损耗光纤，其理论分析损耗可下降到 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{dB/km}$ ，则中继距离可达数千，甚至数万千米。这样，在任何情况下，通信线路都可以不设中继器了。它对降低海底通信的成本、提高可靠性和稳定性具有特别重要的意义。