

光纤通信

上

〔美〕S·E米勒 A·G 楚诺委斯 主编

目 录

第一章 光通信的发展..... (1)

A. G. Chynoweth 及 S. E. Miller

1.1 光源及检测器 (1)

1.2 传输媒质—光纤波导的发展 (4)

1.3 光纤通信系统 (9)

1.4 光通信系统的其他方面 (12)

参考文献..... (16)

第二章 早期光纤：光纤类型的发展..... (18)

Enrique A. J. Marcatili

2.1 本章目的及同其它各章的关系 (18)

2.2 光纤内的光传播 (18)

2.3 损耗机理 (26)

2.4 光纤内的色散 (29)

2.5 光纤类型及它们的发展 (33)

参考文献..... (37)

第三章 光纤的传播特性..... (38)

Dietrich Marcuse, Detlef Gloge 及 Enrique

A. J. Marcatili

3.1 模的概念 (39)

3.2 阶跃型光纤 (41)

3.3	梯度型光纤	(47)
3.4	包层效应及漏泄波	(55)
3.5	由恒定光纤曲率引起的损耗	(63)
3.6	光纤间的串音	(66)
3.7	光纤的激励	(68)
3.8	光纤末端的近场及远场	(72)
3.9	接续损耗	(75)
3.10	耦合模理论	(82)
3.11	模混合效应	(90)
3.12	随机弯曲引起的辐射损耗	(94)
	参考文献	(100)

第四章 光纤的色散特性..... (102)

Detlef Gloge, Enrique A. J. Marcatili,

Dietrich Marcuse 及 Stewart D. Personick

4.1	引言	(102)
4.2	单模光纤内的脉冲失真	(104)
4.3	多模光纤内的单个模	(107)
4.4	理想多模光纤内的脉冲失真	(111)
4.5	激励、损耗和模耦合的影响	(116)
4.6	光纤的频域特性	(120)
	参考文献	(125)

第五章 光纤的非线性特性..... (127)

Rogers H. Stolen

5.1	引言	(127)
5.2	受激喇曼散射 (SRS)	(129)

5.3	受激布里渊散射 (SBS)	(135)
5.4	随光强度而变的折射率	(138)
5.5	相位匹配参量相互作用	(143)
5.6	损伤	(148)
5.7	未来的方向	(149)
5.8	结论	(150)
附录: 受激喇曼散射 (SRS), 受激布里渊散射(SBS)		
	和自相位调制 (SPM) 的临界功率 (P_c)	(150)
	参考文献	(152)

第六章 光纤设计要点 (155)

Detlef Gloge 及 Wiliam B. Gardner

6.1	引言	(155)
6.2	光纤直径	(156)
6.3	包层厚度	(156)
6.4	合成散射和折射率差	(159)
6.5	LED系统的注入损耗	(160)
6.6	微弯损耗	(162)
6.7	低毕特率系统	(165)
6.8	高毕特率系统	(166)
6.9	工作波长	(168)
6.10	光纤参数的容差	(169)
	参考文献	(170)

第七章 材料的性质与选择 (171)

Brian G. Bagley, Charles R. Kurkjian,

James W. Mitchell, George E. Peterson 及 Arthur R.

Tynes

7.1 引言	(171)
7.2 材料各方面的一些基本考虑	(171)
7.3 材料各方面的特性表征	(197)
参考文献.....	(234)

第八章 光纤预制棒的制备..... (240)

*William G. French, Raymond E. Jaeger,
John B. Macchesney, Suzanne R. Nagel,
Kurt Nassau 及 A. David Pearson*

8.1 引言	(240)
8.2 多组分玻璃及纤维的制备	(241)
8.3 高二氧化硅块料玻璃	(249)
8.4 用汽相沉积法生产的高二氧化硅纤维	(256)
参考文献.....	(267)

第九章 光纤的拉制与控制..... (271)

*Raymond E. Jaeger, A. David Pearson,
John C. Williams 及 Herman M. Presby*

9.1 引言	(271)
9.2 玻璃的馈送	(279)
9.3 热源	(283)
9.4 拉丝机构	(288)
9.5 直径的均匀性	(289)
9.6 涂敷与加套	(300)
9.7 综合设备	(301)
参考文献.....	(303)

第十章 涂层和套层..... (307)

Lee L. Blyler, Jr., Bernard R. Eichenbaum

及 *Harold Schonhorn*

- 10.1 涂层的作用..... (307)
- 10.2 对涂层的要求..... (309)
- 10.3 二氧化硅的表面处理..... (314)
- 10.4 涂层的涂敷技术..... (326)
- 10.5 聚合物包层光纤..... (338)
- 参考文献..... (349)

第一章

光通信的发展

光纤通信有着许多来源。在A.G.贝尔(*Bell*)发明电话后不久(1880年),他曾通过一束光线在长达数百米的距离上传送过话音。但是由于当时采用的技术并不能实现这个新奇的概念,所以后来没有什么进展。十九世纪四十年代和五十年代在贝尔研究所还曾作过一些利用可见光进行通信的试验,最后的一次曾经要求采用相干光源以便得到高效率的信息传输(*Kompfner*, 1972)。

一切形式的光通信都需具备三项内容:(1)可见光或近红外光的光源,它被载有信息的信号所调制;(2)传输媒质;(3)检测器,它把调制波恢复为同该系统输入信号实际上完全相同的基带信号。

1.1 光源及检测器

激光器的发明和实验论证给光通信前景带来了新生命,并促使人们尽极大努力来获取使它成为现实所必需的科学和技术。激光器(*Schawlow*及*Townes*, 1958)是相干光源,从原理上讲,它有可能把适用于微波领域中的全套通信技术都用在光波领域。激光器功能的实验室验证,首先是红宝石激光器(*Maiman*, 1960),其后是气体激光器(*Javan*等人, 1961),给这种可实现性提供了直接论据。数年后,氦氖气体激光器成为光通信研究中的主力;如果没有它,光通信是不会得到后来的进展的(*Gordon*及*White*, 1964)。虽然如此,但是首次暗示出具有实用的低成本的光通信,并具有通常固体器件所带来的小型化和高可靠性的巨大潜力的却是半导体激光器(*Hall*

等人, 1962; Nathan等人, 1962)。

作为人们广泛寻求着的高效率电光器件(发光二极管)技术的合乎逻辑的发展, 第一批单 p - n 结砷化镓半导体激光器出现了。但它们只能在短时间内工作, 并且只能在液态氮的温度下利用脉冲激励来工作。人们曾经不得不进行相当大量的努力以求得到能在常温下连续运行的激光器。

向着满足这些要求而迈出的关键性的头几步是有关异质结构造的概念和技术。在通常的 p - n 同质结中, 结的两侧采用相同的基质半导体材料(例如GaAs)。在异质结中, n 侧的基质材料不同于 p 侧的基质材料。人们早已知道(Alferov及Kazarinov, 1963; Kroemer, 1963), 异质结构造的势垒有可能更好地束缚和集聚那些注入的电子和空穴, 同时还为建立激光作用而提供必要的基本光学空腔结构。

从GaAlAs材料系的单异质结构造的验证得知, 为建立激光作用而需要的阈值电流有所降低, 这就首次证明了这种异质结构造的正确性(Hayashi等人, 1969; Kressel及Nelson, 1969)。稍后, 在室温下“连续”工作的双异质结试验也取得了成功。在这种双异质结中, 载流子被限制在一种夹心构造的势阱里, 夹心构造是把一层薄的较窄的能隙材料夹在稍高能隙的 n -型材料和 p -型材料的中间而构成的(Hayashi等人, 1970; Alferov等人, 1971)。

对于早期的验证来说, 能连续工作一个多小时左右, 就可被证明是成功的。但是对于实用的通信系统来说, 则需要具有平均一百万小时或更长的寿命时间。许多科学家和工程师们进行了大量的研究活动以便能鉴别出一些缺陷和限制激光器寿命的其他因素。“暗线缺陷”(之所以这样称呼, 是因为它们在显微镜下用红外图象变换器才能显现)的发现是一项特别重要的惊人进展。这些暗线缺陷逐渐迁移并扩散到二极管激光器的动作区内, 最后使激光作用消失(DeLoach等人, 1973; Petroff及Hartman, 1974)。它们看来是与“应变感应型”位错有关联的, 而它们的迁移可用下述新发现的现

象来说明，即：在杂质处的电子—空穴再结合能量发生局部无辐射倾卸现象而使杂质扩散速率大大增加(Kimerling等人, 1976)。研究并改进使二极管内的应变减到最小的制作方法，到现在为止仍然是制成百万小时级激光器的主要关键(Hartman等人, 1977)。

使用激光器作为光通信光源的主要吸引力在于激光器的发射谱线宽度很窄，而且还在于它具有方向性以致比较容易得到同传输媒质间的高耦合效率。当光源同接收器之间的距离很长时，这些性能使激光器更加具有吸引力。但是在许多情况下，这些距离是不那么长的；因而人们很早就认识到，在这些情况下作为光源可以采用发光二极管。虽然现在就来肯定发光二极管的潜在优点即将成为现实还为时过早，但是作为潜在性优点发光二极管的制造费用要比激光器便宜，而且也比较容易获得长寿命。在短距离光链路中（例如在交换机中）采用这种最简单的结型构造时，人们研制出一种具有很高发光性能和很高的二极管——光纤耦合效率的发光二极管，它们依据不同的调制频率而用在长达一公里左右的中等距离上(Burrus及Miller, 1971)。

在对用作通信光源的半导体激光器和发光二极管进行大力研究的同时，对其他的可能成为光源的探索性工作也在继续进行。这些光源包括基于各种玻璃基质或晶状基质中的铒离子的光泵激光器；铒激光器提供很窄的谱线宽度并且在 1.1 至 $1.3\mu\text{m}$ 波长范围内发射激光，在这个波长范围内玻璃纤维具有低的损耗和低的色散，因而是很吸引人的。这种激光器还可以利用GaAlAs发光二极管作为泵源，这样就能制成全固态的部件。采用铒——钇铝石榴石晶体纤维单端泵的小型掺铒激光器已经试验成功(Stone及Burrus, 1978)。

工作在玻璃纤维损耗和色散都最低的红外波长范围内的光器件，具有明显的吸引力。最近，这样的激光器已经研制出来，它由镓、铟、砷、磷的半导体材料系构成(Shen等人, 1977)。虽然这种激光器的早期研制成果是相当鼓舞人心的，但是要知道能否生产出高效率、可靠而又成本低的这种材料系的激光器和发光二极管，

尚为时过早。发展适宜的检测器是另一项挑战，它也可能同样采用镓、铟、砷、磷的半导体材料系，而且也工作在同样的一段波长范围里。在这段波长范围内，硅器件已不能有效地工作，而可替代硅器件的锗器件，这时也由于存在背景暗电流而灵敏度较低。

如上所述，硅光电检测器用在GaAlAs发光器件的发射波长范围内是适宜的。实际上，相对成熟的硅器件技术已可较为容易地研制出这段波长范围内的实用检测器。检测器有两种类型：(i)p-i-n二极管，它的输出信号大约相当于每一个入射光子产生一个电子；(ii)雪崩光电二极管，它工作在接近击穿的负偏置状态，并提供出内部增益，它的输出信号大约相当于每一个入射光子产生10至100个电子。p-i-n二极管适用在不需很高灵敏度的短距离光链路上，但在多数情况下却优先选用雪崩光电二极管，它要比p-i-n优越得多。对于雪崩光电二极管的关键性要求是应避免结构性缺陷以及其他的一些缺陷，这些缺陷可引起微等离子区，从而造成电气上的不稳定。要解决这一问题对硅器件来说并不是一件容易的事，再加上还必须弄清楚在发展波长更长的红外检测器时，尚有哪些必须克服的困难。

1.2 传输媒质——光纤波导的发展

一项新的传输系统是否具有吸引力，取决于它所能采用的发送器、传输媒质以及接收器的特性如何。因此，系统研究工作是随着这些构成要素的发展与革新而前进的。当然，它们双方面是互相影响的，新的系统激励着新部件的发展，而反过来，后者对前者也是这样。

在激光器的实验室验证工作完成后，贝尔研究所便立即在下列两方面：(1)光束波导传输媒质(Kompfner, 1965)及(2)大气无线光波传输方面，开始了基础相当宽广的研究工作。研究人员利用古代天文学方面的知识，研制出适合于通信用途的新传输结构，他们

已能把发送的光能量束缚在一条光束内，这束光几乎全部能被接收器所接收，在很宽的可见光或近红外光波段内的损耗可为 1dB/km 的数量级。一种利用可见光或近红外光的相干光载波技术，在理论上能够被庞大的信息量所调制，这是我们的努力目标。但是，要实现这点还需付出很多的代价。对于大气传输，在从 $0.63\mu\text{m}$ 一直到 $10\mu\text{m}$ 的波长范围内，由于大雾和下雪将造成严重的损耗 (Chu 及 Hogg, 1968)。因此，大气光传输能够行得通的唯一场所，就只是些 $100\sim 300\text{m}$ 长的专用链路或者是“碰上好天气”时的通信应用方面。

现已证明，由每隔 100m 左右配置的透镜或成对潜望镜所构成的光束波导传输技术是完全实用的。这种透镜波导能够放在直径小于 15cm 的地下管道内，这样便可不受天气变化的影响。得到通信界一致好评的另一项技术发明是气体透镜波导，它能使激光波束沿着半径为几百米的曲线弯曲传输。这样一来，便有可能把玻璃透镜波导从直线安装的必要条件下解放出来。但是，所有形式的光束波导的安装费用都是很昂贵的，它们只有在能够提供上百万条或更多的电话通路时才具有经济上的吸引力。在一条单透镜波导上同时传输许多条激光波束的技术是有着巨大通信潜力的，也是非常经济的。如果需要，这项技术在将来是可以正式使用的。

在开展光束波导研究工作的同时，许多国家的研究机构探索了另外一种激光波导技术。这就是我们现在所熟悉的光纤传输。它是由英国标准电信研究所首先提出来的 (Kao 及 Hockham, 1966)。虽然当时最好的光纤具有 1000dB/km 以上的损耗，Kao 和 Hockham 却推测出损耗低到 20dB/km 是应该做得到的；他们还进一步提出：这样的光纤将在通信方面有用处。记录上还没有哪一个材料方面的专家曾经预言过能够实现低到 20dB/km 的光纤损耗，但是许多集团开始了探索这种潜在可能性的研究工作。对多组分玻璃系和高二氧化硅玻璃系都进行了探讨。多组分玻璃吸引人的地方在于较低的操作温度，因而减少了污染的机会，但是原材料的提纯及玻璃的均匀性

却成为它的严重技术障碍。即使如此，它仍然取得了给人印象深刻的进展，尤其是在日本、英国和美国进展较大。在日本，日本板玻璃公司和日本电气公司联合发展了一种后来叫做“自聚焦(Selfoc)”的光纤，这是第一条通信用的光纤。它具有梯度折射率剖面，但它的损耗超过 100dB/km (Uchida等人, 1969)。在英国，英国邮政总局同大学、工厂里的力量共同进行多组分玻璃纤维的研制工作。经过这些国家的辛勤努力，终于使多组分玻璃光纤的损耗降到 $4\sim 7\text{dB/km}$ 范围内，这的确是一项卓越的成就(参见第8章)。

与此同时，在美国，康宁玻璃公司研究了可供光纤用的高二氧化硅玻璃。贝尔研究所在发现多组分玻璃的使用困难性已变得愈来愈明显以后，便开始把注意力更多地放在高二氧化硅玻璃系方面。康宁公司首次宣告它们制成了一种低损耗光纤，它是1970年由R.D. Maurer参加的小组做出来的(kapron等人, 1970)：这条光纤是单模光纤，长度有数百米，损耗在 20dB/km 以下，稍后，这个小组又成功地把损耗降低到 4dB/km 以下。简短地说，康宁公司采用的方法是所谓的“烟灰法(Soot method)”它借助于气体组成成分的火焰高温分解，在圆柱形心棒周围形成一层纯净的或掺杂的高二氧化硅粉状玻璃沉积物。然后经过细心控制的时间和温度周期，沉积物被固化为一层结构均匀的玻璃。当拿掉中间的心棒以后，可把这条固化了的玻璃预制棒烧缩成实心棒，并拉制成光纤。由于这些气体组成成分的合成物在沉积过程中可以随时间长短而任意变更，所以能使沉积物的折射率做成沿着径向而变动。如果一开始先做成掺锗的二氧化硅沉积物，然后逐渐减少锗的含量，就可得到从预制棒中心轴线沿半径向外逐渐减小的折射率。值得庆幸的是当把预制棒拉制成光纤时，预制棒的圆柱对称性仍然能保持完整，这样就使得光纤中的折射率径向分布正好成为预制棒中有意形成的折射率分布的小型复制品。

贝尔研究所的高二氧化硅玻璃研制工作从一项发现中首次获得了巨大动力。这项发现是：经过适当热处理的掺硼二氧化硅玻璃能

够获得比单纯二氧化硅玻璃更低的折射率(*van Uitert*等人, 1973)。在Kao之后人们已经知道, 纯二氧化硅具有已知的最低光学损耗, 又由于芯子要传导光能量的大部分, 所以纯二氧化硅是用做光纤芯子的最理想材料。剩下的问题便是需要一种折射率比它更低的包层材料。由上述发现中得到的掺硼二氧化硅便是这种材料。贝尔研究所的科学家们研究探索了各种制备纯二氧化硅和掺硼二氧化硅的具体方法。他们的工作是独立地进行的, 但却总结出一套与康宁公司发明的方法略有不同的方案。首先准备好一条商用的熔凝二氧化硅空管, 然后把组成所需玻璃沉积物的气体成分输送到这条管子的内部; 这些气体在适当温度下发生反应而在管内沉积成玻璃。如同康宁公司的制作过程那样, 气体的成分可以事先安排好, 以便得到预计的玻璃沉积物折射率径向分布。把管子烧缩成实心棒后, 即可进行拉丝而得到光纤。使这个制作过程更加实用化的主要突破措施是Mac Chesney提出来的, 他沿着管子来回移动外部火焰以便加速高温分解沉积过程——这就是改良的化学汽相沉积法(MCVD)(Mac-Chesney等人, 1974 a, b)

采用MCVD法已制出一些光纤, 它们的传输损耗等于或者更优于康宁公司制出的光纤(*French*等人, 1974), 而最近日本的一个小组又制作出损耗在1dB/Km以下的光纤(*Horiguchi*及*Osanai*, 1976)。MCVD法事实上已被更多的研究单位所采用, 但是其他制作方法的探索工作仍在继续进行。

这样一来, 在实用而又经济的光纤探索和竞赛中, 我们看到了一系列国际性活动, 许多地区的人们按照最好的科学传统在前人工作的基础上做出了不少贡献。现在让我们暂停一下这节的介绍性叙述, 而改用图形来总结光通信发展早期阶段中的两项关键性标志项目的进展情况。图1.1简单地给出有关这两个项目取得的进展: 一项是光纤损耗的降低, 另一项是半导体激光器平均寿命的增加。图中还标示出在光通信系统能够真正实用之前所必须达到的大致水平。对于数公里或更长的无中继段, 每公里的光纤损耗必须低于几

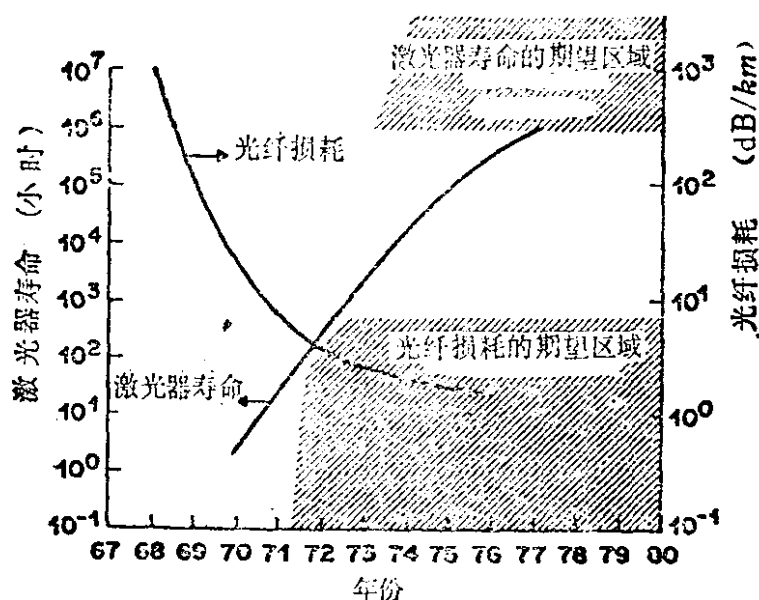


图 1.1 说明两项关键性标志项目所取得的进展曲线，光纤损耗和半导体激光器寿命。如不具有少于每公里几个分贝的光纤损耗以及一百万小时或更长的激光器寿命，光纤通信系统就难于同常规传输系统相竞争。光纤的这项指标于七十年代早期已达到，然后大约五年以后，激光器的这项指标也取得了突破。

个分贝；而如果一个寿命统计的实际损坏率可以容许不计，则激光器到损坏为止的平均寿命必须为 10^6 小时数量级。

低损耗并不是对光纤波导的唯一要求，在较短的传输距离内，一个光脉冲如果不致展宽到完全识别不出的程度，那么光纤还必须具有低的色散。这种脉冲展宽限制了传输媒质的带宽，但小心地控制折射率的径向分布（前面已叙述过康宁公司和贝尔系统的制作方法都具有这项能力）是能够缩小这种展宽程度的。

拉制成的光纤必须具有足够的机械强度。刚刚拉出来的光纤是具有很高强度的，但是如果它的表面没有受到保护的话，则强度将会迅速地降低。关于玻璃纤维强度降低的详细机理尚有很多地方没有弄清楚，但是人们发现，如果在拉出光纤后立即在其表面涂上一层适宜的物质，则它的强度将会下降得缓慢得多。¹ 贝尔研究所和其他单位经过深入细致的研究试验，已找到这种物质以及在拉丝过程中把它同时涂敷到光纤上去的方法，这样便获得了为保持实用光缆的机械完整性所必需的高强度。

实验室中得到的低损耗光纤，距现场实用的光缆还有一大段距离。这里，研究出一种实用的光纤和光缆的接续方法是有十分重要的意义的。这种方法在实际通信系统中经常碰到的恶劣的自然条件下也应能够施行得通。因此，接续技术是光纤通信系统发展阶段中的一项重要组成部分。许多研究所已找到了解决这个问题的方法，而且也得出设计光纤和光缆连接器的方法。剩下的问题是需要观察一下，在这些不同的设计方法中究竟哪一个能被证明是最有效、最方便、而且成本最低；同时还应注意到，那些只在实验室中重复得到约0.1dB损耗的连接和接续技术却往往是不容易实际奏效的。

与接续技术同等重要的还有光缆本身的具体设计问题。贝尔研究所研制出最多包含144根光纤的光缆，其中所有的光纤都封装在塑料扁带内并且在最外面还包以加强的塑料护套。按照这种设计方法，在通过管道牵拉光缆时或者在光缆敷设完毕后都不会使光纤受到应力。这样的一条光缆的通信容量，连同安装的电子设备一道，相当于大约45,000条双向电话通路，可是它仍然有更大容量的潜力。图1.2表示出有关光纤系统巨大潜在容量的一些设想，图中把光缆同其他几种等效容量的贝尔系统传输媒质进行了比较。

1.3 光纤通信系统

当低损耗的光纤波导（现在常简称为“光导”）达到可用程度时，人们就考虑到它在对称电缆或同轴电缆使用地区的实用性。最初设想出的系统是采用单模、大容量光纤并配合以激光器作为光源。但不久，人们就认识到多模光纤同发光二极管(LED)或激光器光源相结合也是具有重要地位的。单模光纤可提供最大的带宽特性（其毕特率·中继距离乘积接近50,000Mbit·km），但是它需要单模激光器和在接续时必须具有微米级的精度。用LED作光源时，为了能传输有实际意义的功率则需要采用多模光纤。多模光纤要求的接续偏差不太严格，而且如能精细地设计出其折射率分布后，理论

西电公司铜线电缆同光缆的比较 (数字表示市区中继双向电话通路)

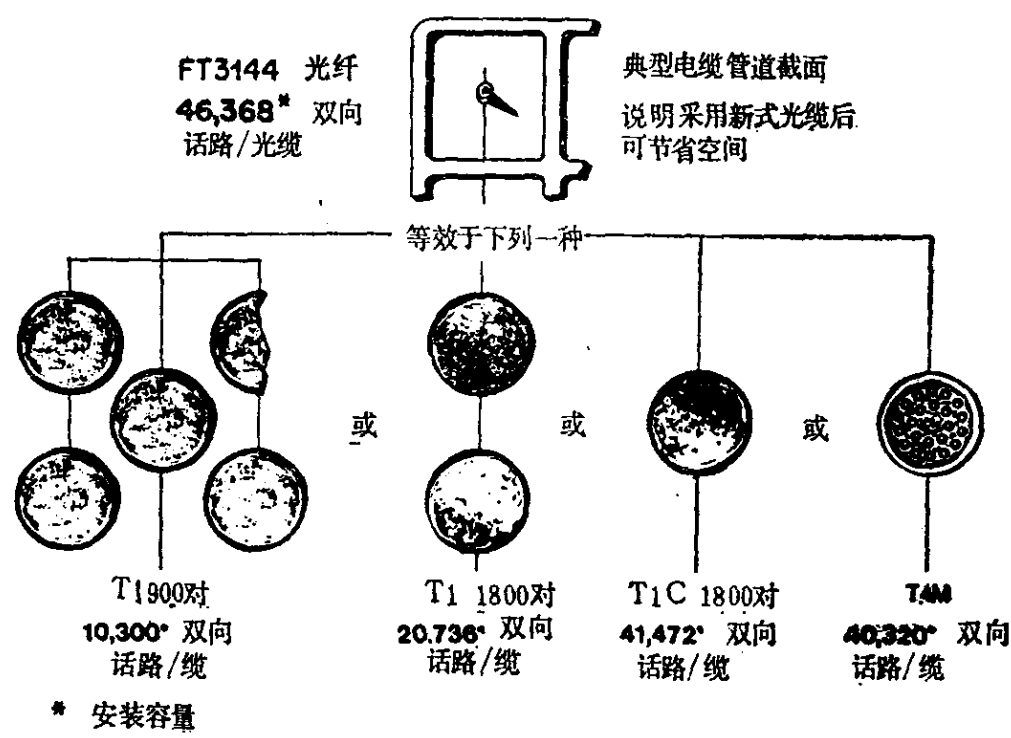


图 1.2 本图表示出同铜线对称电缆或同轴电缆相比较时光缆的巨大通信容量。有关贝尔系统的FT3144, T1, T1C和T4M的定义可参见 Dorros文章(1977)。

上的带宽特性可高达 $14,000\text{Mbit}\cdot\text{km}$,在实验室中已经实现了 $1,000\text{Mbit}\cdot\text{km}$ 的数值。

同其他的有线传输媒质相比较,光纤的优点远远不仅在于低的损耗和宽的带宽方面。它的(像头发丝粗细的)细小尺寸对于拥挤的城市管道是有重要意义的。它没有接地短路、外界感应、电磁辐射、串话干扰,而且对温度的敏感性也不大,这些优点都是很宝贵的,从而使它在“特定用途”中处于优越地位。

这些优点使人们认真地来考虑光纤传输系统在通信部门许多方面的应用。这些方面有:用户到附近交换局的连接线,市区中继线、城市间的长途线、以及洲际海底光缆等。更进一步的用途将是在其他电子设备内部的应用,例如用于交换机或电子计算机内的内部链路。在一座建筑物内部为通信目的而设置的“室内布线”,迟早会有朝一日借助于光纤来实现。所有这些潜在性用途为光纤通信带来了远比早期光通信设想更为广阔的应用范围。人们希望光纤既

可用于适当的信息速率（即 $\sim 1 \text{ Mbit/sec}$ ），又可用于很高的信息速率。这个宽广的范围使得光纤传输成为许多人都感兴趣的和受到重视的话题。

作为这项新兴技术在从科学研究到商业应用整个过渡期间的一个正常阶段，贝尔研究所曾设计并建成了阿特兰大的实验系统，而现在（本书编写中）则正在对芝加哥商业区开通的有用户电话、数据和视频信号的光纤传输系统进行试验。

阿特兰大实验(Jacobs, 1976)使用了一种专供市区中继线用的探索性设计，它在直径约为 $100\mu\text{m}$ 的一根光纤上开通脉冲速率 44.7 Mbit/sec 的672个话路。这条光缆包含有144根光纤，是由西电公司制造的，长度为1Km，为了同邻近贝尔研究所大楼的一条标准地下塑料管道的长度相适应而被切割成650 m长。把一些光纤串联起来，使中继器间的距离达到 10.9km 的无误码传输也已得到了实验论证，而部件的性能证实了系统设计的距离可大约为 7 km 。这些实验结果是十分鼓舞人心的。因而又制作了一条类似的光缆，并在芝加哥装设了同样的光中继设备，以便同施工公司人员一道获得进一步的环境试验和现场操作经验。这条1.5英里长24根光纤的光缆已成功装设完毕并且直到现在仍在运行(Mullins, 1977)。

在美国和国外的其他机构里，一些别的系统试验正在进行或者正在规划中。

在加利福尼亚州，通用电话电子公司(G.T.E.)从一个位于Long Beach的电话局到另一个位于Artesia的电话局之间，距离约9km，安装了一条包含6根光纤和一些电线线对的光缆(Basch及Beaudette, 1977)。中间装有两部中继器。该系统中的光纤是康宁玻璃公司制造的，而光缆是通用电缆公司(G.C.C.)成缆制成的。其中两根光纤按照标准数字复用信号 1.544 Mbit/sec 的速率开通商用业务。同芝加哥的贝尔系统装置一样，该装置由正规的施工公司人员安装，打算用于提供经验和验证其实用程度。无论是芝加哥系统，还是Long Beach系统都不应被看成是即将大规模生产的系统的样机。