

有线传输技术译文

光 通 信 技 术 专 辑

第 一 分 册

邮电部第五研究所技术服务部

1 9 8 5 年 4 月

告 读 者

为配合我所光通信研究，我们编译了“光通信译文专辑”，供科技人员参考。

第一分册系国际电报电话谘询委员会（CCITT）1984年于日内瓦出版的“通信光纤”（Optical fibres for Telecommunications）手册的全译本。

考虑到广大科技人员对这套资料的渴求，我们仅用了一个多月的时间就突击完成了译校工作。因此，译文必有不当之处，望读者批评指正。

译校工作是在我所徐乃英、卢俊成等高级工程师和科技人员的热心指导和积极参与下完成的。对此，谨致谢意。

邮电部第五研究所技术服务部

一九八五年四月

目 录

I . 前言.....	(1)
II . 光纤的基本特性.....	(4)
III . 光纤的制造工艺.....	(9)
IV . 光缆.....	(16)
V . 光纤通信用的接头和连接器.....	(26)
VI . 测试方法.....	(37)
VII . 光纤通信的光源及探测器.....	(50)
VIII . 光纤传输系统.....	(65)
IX . 光纤在本地网及乡间网的应用.....	(77)
X . 光纤在中继网中的应用.....	(87)
XI . 光纤在干线网络中的应用.....	(92)
XII . 光纤在海缆系统中的应用.....	(103)
XIII . 结论.....	(110)

I. 前言*

1. 概述

近年来, 电信技术获得了持续不断的发展, 而实际趋势表明, 这种发展正在变得更快。从而对有关这一领域的人构成了真正的挑战——能否掌握由新业务的装设, 新的交换和传输技术的引用和某些新的传输媒介的出现所提供的各种可能性。

事实上, 一方面新的业务正在变为现实; 另一方面, 网络结构正逐渐向数字形式演变, 其远期的目的是要建成一个综合业务数字网 (ISDN) 这两个方面都会促使有关人员研究是否可以利用像光缆这种新型的传输媒介来传送电信业务。

过去十年的经验证明, 研究工作并不总产生采用新设备的结果。但也应当指出, 在某些情况下, 所提出的各种新业务, 似乎还没有完全为潜在的用户所理解, 这些用户正在研究所提供的各种可能性与所包含的相对成本。然而, 这些研究已经在其它领域中获得了应用, 它们业已成为有用的成果。

根据在实验室得到的经验, 以及许多主管部门在现场所获得的结果来看, 光纤的前景还要比所预料的更好。由不同组织所从事的有关这方面的研究和分析的结果指出, 遗留下来的少数几个问题将在短期内主要地被克服。这样由于应用得更为广泛, 而使成本率低了的光缆在不久的将来定会成为电信通信上一种极有竞争能力的传输媒介。

2. 光通信的发展史

用光来进行通信并不是一种新的想法,

但直到十九世纪后半叶才第一次用现代含意的这一术语提出用光来传输信息。当时, 麦克斯韦 (Maxwell) 和法拉第 (Faraday) 有关电磁波的理论揭开了可把这些波的整个频谱用于通信目的的可能性。自那时以后, 信息传输的历史才算向利用较短波长以提供更宽的频带方面有了连续不断的进展。

然而, 只是当激光被发明之后, 才把研究工作向着实现光传输系统而进行, 由于这种系统使用的载体是 10^{14} Hz 的高频, 所以它的信息传输量非常之大。因此, 研究的主攻方向在于并行地试验光传输系统的三个基本方面:

- 传输媒介本身;
- 由载有信息的信号所调制的光源 (可见光源或近红外光源);
- 从经调制的光载体中提取一个实际上等于存在于输入端的信号的基带信号的光接收器。

关于用作光系统传输媒介的首次试验是在大气中进行的, 其结果立即表明了这一传输媒介的不适用性, 这是由于气象条件 (如雨、雾、乱流等) 所引起极大的衰减值。也用装有过聚焦镜或充有气体的管来进行试验, 但由于技术上和经济上的原因, 其结果很使人失望。

事实上, 在研究的最初阶段, 虽然玻璃纤维很具有吸引力, 但由于它的衰减值高到数千 dB/km, 当时不曾把它当成适用于作光系统的传输媒介。直到1966年才证实, 衰减与所采用的材料无关, 而可通过减少玻璃

* I. Introduction, pp. 5 ~ 6

王庆生译 徐乃英校

纤维中的杂质来降低衰减。1970年,更进一步的研究达到了顶峰,生产出了有几百公尺长而衰减小于20dB/km的单模光纤。最后于1972年生产出了衰减小于4dB/km的多模光纤。自那时以后,又采取了更进一步的措施,通过对光纤生产技术的改进,以及采用1.3和1.5 μm 左右范围内的波长来减少衰减。这些波长大于最初一开始所采用过的波长(0.8~0.9 μm 范围内),在这些研究的同时,在实现更大带宽的多模光纤方面也取得了进展,进而使大容量传输系统得以实现。

至于光源,可以说对半导体器件内的激光作用所进行的第一次试验性检验是在1962年获得成功的。最初几项结果确认,这些器件实际上可以用来作光源,虽然直到1970年才获得用交替的GaAs和ALGaAs层制成的在室温下以连续波工作的光器件(异质结激光器)。这些激光器件中最初的一个只用了几个小时,而实际应用于电信业务中的激光装置,其平均故障间隔时间(MTBF)必须在 10^6 小时范围内。

由于这个原因,于是又进行了大量的研究,以便弄清是什么因素影响着激光器件的寿命,以及如何才能延长其使用寿命。这些研究已经达到了当前的技术水平。它可不变信其寿命足够长到与电信系统的需要一致的地步,至少工作在0.8~0.9 μm 波长范围内的激光器件是这样。

自从1972年生产出第一支巴罗斯(Burrus)型发光二极管(LED)以来,又研制成功了与光纤连用的另一种型式的光源——发光二极管(LED),在这一领域中的进步也给人以相当深刻的印象。虽然,从调制速度和发光功率的观点来看,LED与激光器的性能并不一样,但比较而言,LED的寿命较长,而且成本也较低。因此对某些用途的光系统也具有一定的吸引力。

光源方面和传输媒介方面所取得的成就又促进了对相应的光检波器的发展和研究。这些检波器可分为两个主要的类型:

- P—i—N二极管,它几乎能对任一入射光子赋予一个电子;
- 雪崩光子二极管,对任一入射光子能产生10~100电子。

两种类型的二极管的用途各异,在目前对于波长为0.8~0.9 μm 范围内的光系统,其可靠性是满意的。

对于光检波器和光源,目前的研究方向是实现以1.3和1.5 μm 左右范围内的较长的波长工作的器件。

有了基本的光学部件(光源、光纤、光接收器)和相应的光学附件(接头、连接器等)就能实现第一代的光系统。不仅为了实验室内,而且还可用于现场,作为传统的传输系统的有效的替代品。

3. CCITT对光纤(方面)的研究

在电信网络中采用光纤所显示出的潜在重大意义,立即为国际电报电话咨询委员会(CCITT)所认识到,CCITT在1973—1976年这一研究期内对光纤开始作了研究。

随后,CCITT第VI次全体代表大会(1976年日内瓦)决定把对光纤的研究任务分配给第XV研究组(传输系统)和第XVIII研究组(数字网络)第XV组研究的课题为38/XV(光缆的物理特性);第XVIII组的研究课题为13/XVIII(在光缆上的数字线路段的特性)。

1977—1980年研究期的主要成果为建议书G.651(50/125 μm 梯度光纤光缆的特性)。这建议书现已载于黄皮书第Ⅲ卷中。本引言还必须指出,建议书中所提到的光纤是经过选择的,因为大多数主管部门都在考虑将所

提到的那种光纤首先用于公共网络中。所建议采用的多模渐变型光纤的芯径为 $50\mu\text{m}$,参考表面(一般为包层)直径为 $125\mu\text{m}$,它既可用于模拟传输,也可用于数字传输。主要的传输特性暂时是对波长为 $850\mu\text{m}$ 左右范围内规定的,至于其它波长的规定则留在建议书 的范围内,以作进一步的研究*。

对于使用光纤的数字线路系统来说,在1977—1980年研究期间,只可能协商同意了可能会有的一个建议中需要研究的参数表,然而大家认为这些系统必须与建议书 G.911 至 G.918 所规定的,对使用不同系列 毕特率的数字线路段的一般特性的规定相一致,以确保能进行国际间的互连。

最后,第Ⅶ次全体代表大会(日内瓦,1980)指定第XV研究组,在1981~1984年研究期间研究五个课题,同时还 将第Ⅶ研究组(电缆护套和电杆的保护与规范)也包括到这一研究中。

指定第XV研究组研究的课题是关于光缆的特性,相关的试验方法以及在光缆上的数字线路系统的特性(最后一个课题,过去是由第XVIII研究组研究的)。

光缆某些特殊方面的问题,如做接头的方法以及机械方面的问题,将由第Ⅶ研究小组去研究。

4. CCITT的光纤小册子

此外,第Ⅶ次全体代表大会还应委员会 D (CCITT 技术助理)的要求,指定第XV

研究组研究15/XV课题(收集和更新有关光纤通信的资料)。并准备把收集到的资料在《电信杂志》(Telecommunication Journal)上作为一系列的文章加以发表,以后再把 这些文章收入小册子出版。今后还有什么研究成果,将用来更新小册子的内容。

为了开始研究课题15/XV,曾决定分两步来进行,作为第一步,已征得 Telecommunication Journal 编辑委员会的同意,出两期特辑(1981年11月和1982年2月)分别 专辑“光学部件”和“系统及应用”。

一般来说,对各篇文章所采取的准则是与CCITT 所进行的研究工作相一致,即,要尽可能地避免理论方面的东西,主要是 要涉及光纤设备方面的实际问题。

作为第二步,第XV研究小组已进一步同意,编写各篇文章的修正稿,以便出版 CCITT的“光纤小册子”。

这编小册子的文章已经为第XV研究组所研究的范围内的各主管部门、各被认可的 私营机构、各科学或工业组织以及各国际组织所同意。

在光纤技术飞速发展的时刻,第XV研究组已草拟出这本小册子的文本。小册子中报道的有关资料,都是关于在1981~1984年这一研究期中,各个交稿提交者所获得的经验,所以,主要考虑了现有的建议书G.651中的多模渐变型光纤。

*在建议书 G. 651 1984年的修正稿中,已对 $1300\mu\text{m}$ 的波长规定了特性。——译注

II. 光纤的基本特性*

1. 引言

关于第一根用于电信的衰减足够低的光纤的报告发表之后,在减小衰减和改善带宽两方面都取得了迅速的进展(见文献[1])。除了衰减小和带宽特性好之外,光纤还具备了传输距离长、防串音和抗电磁干扰性能好以及制作原料丰富等优点。本章概述光纤的基本结构和传输特性。

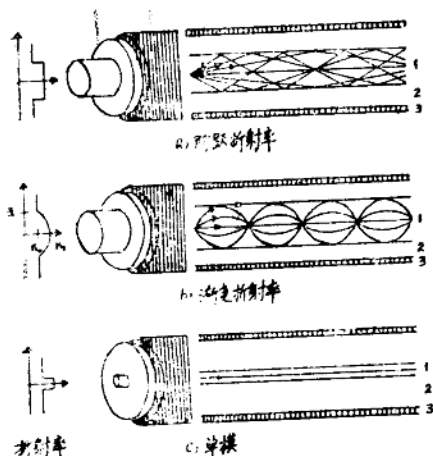
2. 光纤结构及其传输模式

多模光纤是具有多种传输模式的介质波导。所谓模式,即周期性的电磁场分布;将这些模式综合起来可用构成任何一种光纤中允许传输的电磁场分布。由这些模式构成的在光纤中所走的路径可用图1所示的射线来表示。图1中的1、2、3三个区域分别为纤芯、包层和涂层。包层玻璃的折射率依赖于介电常数,该参数比纤芯玻璃的折射率略小一些。图1a)中的光纤称为“阶跃指数”型光纤,这是因其折射率从包层到纤芯急剧变化的缘故。急剧变化的结果使得到了某一个角度上(临界角)所有的射线都将在包层与纤芯的介面处全部反射回来。在比这种临界角大的角度上触及包层边缘的射线将有一部分折射回来,另一部分穿过包层边缘传输出去。经过多次折射之后,这些射线中的能量将最终消失在光纤中。图中的区域3是塑料涂层,是用以保护玻璃使之免遭损坏的。

这种“阶跃”型光纤的射线(模式)的前进路线各不相同,这是由它们相对于光轴的

夹角决定的。由于角度不同,光脉冲中的不同模式将在不同时间传播到远端,造成光脉冲展宽,光脉冲的展宽会使光纤所能传输的数字信号的比特率受到限制。

采用图1b)所示的“渐变指数”型光纤时,不同模式的速度几乎可以均等。在这种渐变型光纤中,折射率是从中心向外缓慢变化的;从而,尽管射线的传播角度不同,不同的射线从一端到达另一端所用的时间也几乎是相等的。这种所谓速度等化可使光脉冲的展宽降低100倍或100倍以上。



区域1为纤芯,区域2为包层,区域3为涂层。a)型和b)型光纤的纤芯和包层的典型直径分别为50和125 μm (见CCITT建议G.651)。c)型光纤包层直径与a)、b)两种类型光纤的包层相似,但纤芯直径为4至10 μm 。a)型和b)型光纤的 Δ 值约为1%,c)型光纤的 Δ 值约为0.2%至0.5%。

图1 光纤的三种主要类型

* II. Fundamental characteristics of optical fibres, pp. 7~11.

王 铁译 利衍隆校

随径向座标 r 变化的折射率 n 常常是用下式来近似的（见文献〔2〕）：

$$n(r) \cong n_1 [1 - \Delta(r/a)^g] \quad (1)$$

式中， a 为纤芯半径， g 为径向剖面折射率分布状态参数；同时，

$$\Delta = (n_1 - n_0) / n_1 \quad (2)$$

式中， $n_1 = n(0)$ ， $n_0 = n(a)$ （见图1b）； $g = 2$ 和 $g = \infty$ 分别表示抛物线型分布和阶跃型分布。

光纤的理论数值孔径（NA）为：

$$NA = \left[n_1^2 - n_0^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cong n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3)$$

导模的总数（ N ）近似等于：

$$N = [g / (g + 2)] (n_1 k a)^2 \Delta \quad (4)$$

$$= [g / 2(g + 2)] V^2 \quad (5)$$

式中， $k = 2\pi / \lambda$ ， λ 为自由空间波长；

$$V = ka \left[n_1^2 - n_0^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ 为归一化频率，}$$

亦称“ V 数”。将该式代入方程（5）可求出光纤导模的数目。

缩小纤芯半径 a 或 Δ ，或者同时缩小两者，可使 V 值减小到低于 V_0 值。

$$V_0 = 2.405(1 + 2/g)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

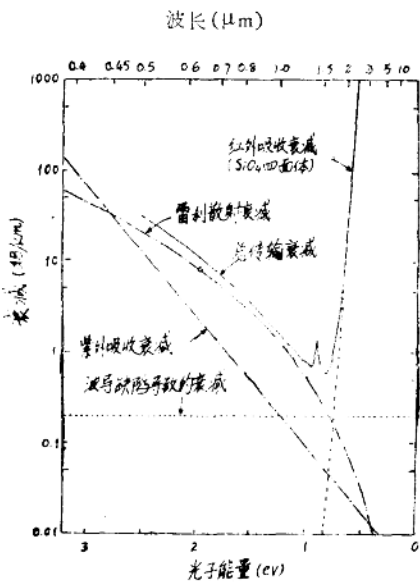
在这种情况下，只有基模（ HE_{11} ）才被传播，于是光纤便成了“单模”的了（见图1c）。

表1给出了光纤参数的一些典型值。关于光纤参数的选择，本文第四章《光缆》中

也作了介绍。

3. 衰 减

图2示出不同的机理对一根典型光纤的频谱衰减的影响。尽管雷利散射以及紫外（UV）和红外（IR）吸收都是光纤衰减的组成部分，但它们却是无法消除的固有衰减机理。表1中归纳了 $GeO_2 - P_2O_5 - SiO_2$ 纤芯的光纤迄今所报道的最低衰减值。所有这些衰减值都处在几十分之一dB/km这样一个低衰减理论界限的范围内。



“总传输衰减”是对低OH光纤测定的频谱衰减曲线。

图2 高二氧化硅纤维的衰减机理

表1 $GeO_2 - P_2O_5 - SiO_2$ 纤芯光纤的最佳衰减（dB/km）

波 长	单模光纤可达到的最佳衰减	参 考 文 献	多模光纤($\Delta \approx 1\%$)可达到的最佳衰减	参 考 文 献
850nm	1.8	〔16〕	2.12*	〔17〕
1300nm	0.27	〔16〕	0.42	〔17〕
1500nm	0.16	〔16〕	0.23	〔17〕

*本测试值的波长为850nm，而不是参考文献〔17〕所提出的800nm。

4. 带 宽

造成脉冲展宽的三个主要因素是模色散、材料色散和波导色散。

A. 模色散

方程(1)中的分布指数 g 有一个最佳值,该最佳值是最接近地等化传播模的群速度而获得的。如图3所示,该最佳值决定于两个因素:玻璃的成分和波长。选定了 g 的最佳值,就能获得光纤每单位长度的最小均方脉冲响应宽度 σ_m (见文献[6]):

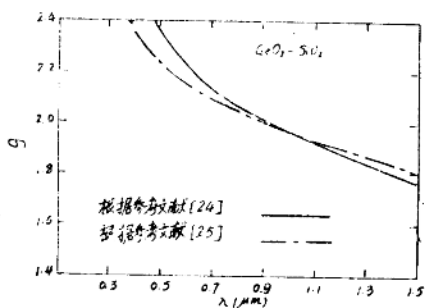
$$\sigma_m \approx 0.14 \Delta^2 \mu s/km \quad (7)$$

当 $\Delta = 1\%$ 时, $\sigma_m \approx 14 ps/km$

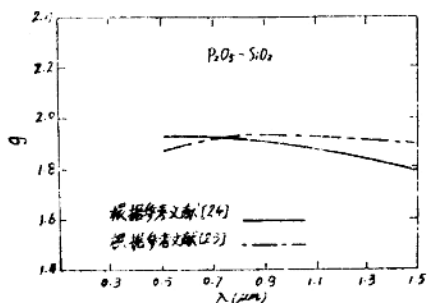
实际上,一般都会出现偏离理想分布的微小波动。这便会导致出现一个比用方程(7)所算出的值大很多的 σ_m 值(见文献[7])。

带宽(BW)是按照光纤基带频率响应降到3dB时(按光功率计算)的频率确定的。近似的经验关系式为:

$$BW(GHz \cdot km) \approx 169 / [\sigma(ps/km)] \quad (8)$$



a) 掺锗光纤



b) 掺磷光纤

图3 分布指数 g 的最佳值

图4示出当 g 为最佳值时带宽曲线中的尖峰。

优化 g 值可减小模色散,但要完全消除模色散,就必须采用单模光纤。即使在有两个正交的偏振时,群速度也可能有微小的差别。这种双折射可能限制单模光纤的带宽。

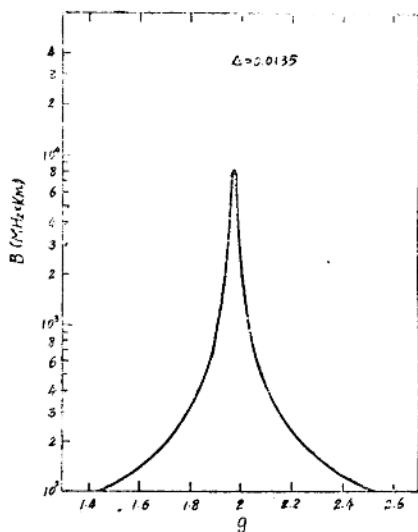


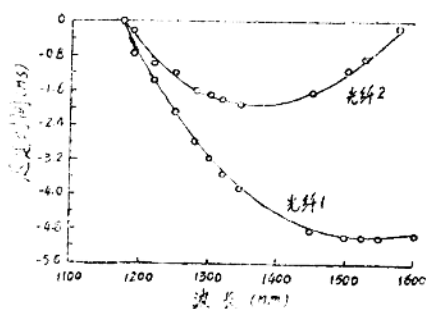
图4 当折射率差 $(n_1 - n_0) = 0.02$ 时
带宽与分布指数 g 的理论关系

B. 材料色散

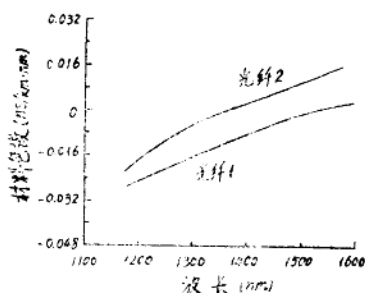
实际的光源有一个非零谱线宽度(见第七章“光源和检测器”)。玻璃的折射率随波长变化,这种变化导致“色”的变化,即“材料”色散。均方冲脉展宽(亦称冲击响应宽度) σ_c 可能发生在每个模式中,并且可能与模色散结合起来给出一个模色散 σ_t :

$$\sigma_t \approx (\sigma_m^2 + \sigma_c^2)^{1/2} \quad (9)$$

一个脉冲按任一给定的模式穿越一定长度的光纤所需的迟延时间在接近于1300nm波长时有最小值(见图5a)。该波长值叫做零材料色散长(λ_0),这是因为材料色散(当有波导色散时作轻微的修正)曲线通过零点的缘故(见图5b)。由于实际光源的非零谱线宽度的关系,在 λ_0 处, σ_t 决不会是零。图6示出目前在该领域中发光二极管的期望实际带宽。



a) 相对于 $\lambda = 1.175 \mu\text{m}$ 为 0 延迟时传输延迟与波长的关系



b) 材料色散与波的关系

理论上, 两根光纤的零材料色散都接近于 $\lambda = 1.33 \mu\text{m}$ 波长, 但实际上却有偏差, 这是波导色散所致: 因而, 光纤 1 的波导色散比光纤 2 大 (见图 b)。

图 5 由同样特性材料拉制的两根 1km 光纤的材料色散特性曲线 (光纤 1 和 2 的芯径分别为 4.8 和 7 μm)

C. 波导色散

波导色散与光纤结构的波导性能有关; 一般说来, 这种色散仅仅对单模光纤才是重要的。图 5b 表明, 芯径越小 (光纤 1), 产

生的波导色散越大, 而波导色散的增大又会导致零色散波长 λ_0 的增大。当纤维的芯径保持不变时, 增大 Δ 值也会起到同样的作用。缩小芯径尺寸可明显地减小微弯曲衰减, 但增大了的波导色散会使 λ_0 值接近于 1390nm 处的 OH 吸收峰, 造成光纤衰减过大。如果系统波长约为 1300nm, 那么 λ_0 值向 1390nm 移动就会使系统带宽变窄。

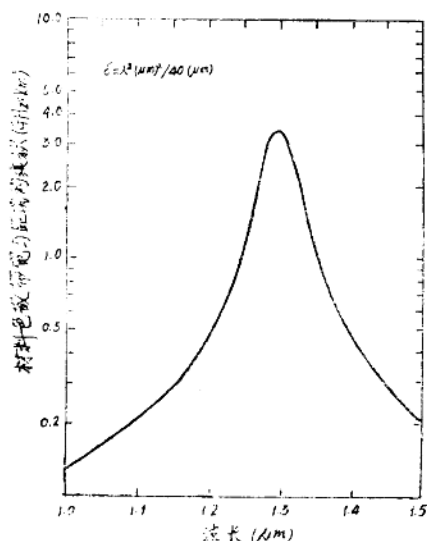


图 6 采用频谱宽度为 $\lambda^2/40 \mu\text{m}$ 的发光二极管时材料色散对带宽度的影响

表 II 归纳出具有相干或非相干光源的长波长和短波长系统上迄今所报道的最佳带宽。假定典型的均方值光源谱线宽度为 $\Delta\lambda$, 可根据图 6 所采用的公式 $(\lambda^2/40) \mu\text{m}$ (见

表 II $\text{GeO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ 纤芯光纤可实现的最佳带宽

波 长 (nm)	电 源		单模光纤可 实现的最佳 带宽	参考文献	多模光纤 ($\Delta 1\%$) 可实现的最佳带宽	参考文献
	类 型	均方值谱线 宽 $\Delta\lambda$ (nm)				
850	发光二极管	18	*	[19]	0.07	[21]
850	激光器	0.6	3.3		3.1	[22]
1300	发光二极管	42	*	[20]	7.0	[11]
1300	激光器	1.5	92**		9.7	[23]

* 由于发光二极管与单模光纤之间的耦合效率低, 在单模光纤上不考虑采用发光二极管光源。

** 如果激光器准确地按 λ_0 工作, 则带宽 $> 100 \text{GHz} \cdot \text{km}$ 是可能的。

文献〔11〕) 求出发光二极管的谱线宽度。激光器的谱线宽度是通常可用的激光器的典型谱线宽度。当单纵模激光器被普遍采用时, 就能从根本上缩小这些 $\Delta\lambda$ 值。

表Ⅱ所示的几种情况中, 只有多模光纤用激光器的一种组合情况, 模色散是支配性的因素。在其它几种情况下, 材料色散是支配性因素。实际生产的最好光纤的带宽一般只有表Ⅱ所列出的值的20%到50%左右。阶跃型光纤一般要比渐变型光纤的带宽差两个数量级。

带宽与光纤长度的依赖关系一般可近似为 $BW\lambda l^{-1/2}$, 如果在一般被测量的光纤长度 l 中所有的光纤具有同样的特性, 再将模耦合长度 lc 考虑进去(见文献〔12〕、〔13〕), 那么 E 值就会在1.0(当 $l \ll lc$ 时)到0.5(当 $l \gg lc$)之间变化。模耦合长度就是光纤的传输模之间适当的能量转换所需的传输距离。如果把不同的光纤连接在一起, 那么带宽与长度的依赖关系就更复杂了(见文献〔14〕)。

5. 结 论

试验结果一般都符合于从理论上计算的光纤性能基本界限。衰减和带宽两方面的最好特性都是用单模光纤在1300~1600nm范围内实现的。

参 考 文 献

- 〔1〕 Kapron F. P. et al.—Appl. Phys. Lett., 17, pp. 423-425 (1970)
- 〔2〕 Miller S. E., Chynoweth A. G.—Optical fiber telecommunications, New York: Academic Press (1979)
- 〔3〕 Horiguchi M. et al.—Rev. of the Elec. Comm. Labs. (NTT), 27, pp. 69-78 (1979)
- 〔4〕 Gloge D.—Bell Sys. Tech. J., 54, pp. 245-262 (1975)
- 〔5〕 Moriyama T. et al.—Proc. 6th Eur. Conf. on Opt. Comm., York, (1980), pp. 18-21
- 〔6〕 Kaminow I. P. et al.—Proc. IEEE, 68, pp. 1209-1213 (1980)
- 〔7〕 Marcuse D. et al.—Appl. Opt., 18, 3758-3763 (1979); 19, pp. 188-189 (1980)
- 〔8〕 Buckler M. J.—Sym. on Opt. Fib. Meas., Boulder (1982), Tech. Digest, pp. 33-36
- 〔9〕 Rashleigh S. C. et al.—Optics Lett., 3, pp. 60-62 (1978)
- 〔10〕 Yokota H. et al.—5th Eur. Conf. on Opt. Comm., Amsterdam, (1979), Post-deadline Paper 19.3
- 〔11〕 Gloge D. et al.—Electron. Lett., 16, pp. 366-367 (1980)
- 〔12〕 Gloge D.—Bell Sys. Tech. J., 52, pp. 801-816 (1973)
- 〔13〕 Kitayama K. et al.—IEEE J. Quantum Elec., QE-16, pp. 356-362 (1980)
- 〔14〕 Eve M.—Opt. Quantum Electron., 10, pp. 41-51 (1978)
- 〔15〕 Cohen L. G. et al.—Proc. IEEE, 68, pp. 1203-1209 (1980)
- 〔16〕 Berkey G. E. et al.—OFC'82, Phoenix (1982), Tech. Digest, pp. 54-55
- 〔17〕 Inada K. et al.—Proc. 4th Eur. Conf. on Opt. Comm., Genoa (1978), pp. 200-209
- 〔18〕 Irlen J. et al.—Electron. Lett., 17, pp. 3-5 (1981)
- 〔19〕 Miyashita T. et al.—Electron. Lett., 13, pp. 227-228 (1977)
- 〔20〕 Kawana A. et al.—Electron. Lett., 16, pp. 188-189 (1980)
- 〔21〕 Muska W. M. et al.—Electron. Lett., 13, pp. 605-606 (1977)
- 〔22〕 Keck D. B. et al.—Opt. Comm., 25, pp. 43-48 (1978)
- 〔23〕 Horiguchi M. et al.—Proc. 8th Eur. Conf. on Opt. Comm., Cannes (1982), pp. 75-80
- 〔24〕 Presby, H. M. et al.—Appl. Opt., 15, pp. 3029-3036 (1976); 17, p. 3530 (1978)
- 〔25〕 Sladen F. M. E. et al.—Proc. 4th Eur. Conf. on Opt. Comm., Genoa (1978), pp. 48-57

III. 光纤的制造工艺*

1. 引言

六十年代,使用光纤来进行通信的主要障碍是它的衰减较大。1970年成功地生产出了⁽¹⁾衰减低于20dB/km的玻璃纤维才从根本上改变了是否可能用玻璃纤维来作为传输信息媒介的可行性的看法。自那以后,在全世界范围内,研究人员和工程技术人员作出了极大的努力来生产出实用的光纤,在制造工艺、传输特性以及机械性能等方面,都取得了显著的进步。特别是制造出的光纤的衰

减,一年比一年低。1979年在1.55 μ m上取得了0.2dB/km⁽²⁾的非常低的损耗。已接近于硅基光纤理论上预计的损耗极限。

光纤的性能,主要取决于它的生产过程以及所采用的原料。从事研究的科技人员已经提出和发展了许多有价值的光纤生产方法,这些生产方法很快地发展起来为萌芽时期的光通信工业生产出实用的光纤。本文将提出过去十年间研究成功的光纤生产工艺的概貌,以及在光纤生产工艺领域中未来的发展趋势。

表1 不同原材料光纤的生产方法分类

光 纤	生 产 方 法	成 分	原 材 料
二氧化硅光纤	IVPO, OVPO, MCVD	纤芯: SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3	SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , BCl_3
	PCVD, VAD	包层: SiO_2 , B_2O_3 , Si-F	SiCl_4 , BCl_3 , SF_6 , SiF_4
多组分光纤	双—坩 埚 法	纤芯: SiO_2 , Na_2O , CaO , GeO_2 等	SiCl_4 , Na_2NO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ge}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4$
		包层: SiO_2 , Na_2O , CaO , B_2O_3 等	SiCl_4 , Na_2NO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, BCl_3
塑料包层光纤	由石英玻璃棒拉制	纤芯: 石英玻璃	SiO_2 或 SiCl_4
		包层: 硅酮树脂	二甲基二氯甲基硅烷
塑料光纤	双—坩 埚 法	纤芯: PMMA, PS	MMA
		包层: P(VDF+TFE)	VDF, TFE

IVPO: 内气相氧化法
OVPO: 外气相氧化法
MCVD: 改进的化学气相沉积法
VAD: 气相轴向沉积法
VDF: 氟化乙烯叉 (Vinylidene fluoride)
PCVD: 等离子化学气相沉积法
PMMA: 聚甲基丙烯酸甲酯

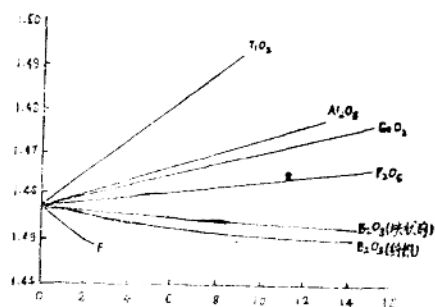
PS: 聚苯乙烯
TFE: 四氟乙烯

* III. Optical fibre fabrication techniques, pp. 13—18.

王庆生译 徐乃英校

2. 光纤生产方法的分类与材料

表1中列出了各种用来生产光纤的材料和方法,这些都是曾经采用过的或目前还在被继续采用的。在表1中进行分类的光纤,其传输特性、材料、成本均各不相同,按其性能而用于不同场合。用氧化物玻璃生产的光纤,可分为两大类:以 SiO_2 为主要成分构成的二氧化硅光纤和除 SiO_2 外还含有不同氧化物和碳酸盐玻璃所构成的多组分玻璃。二氧化硅光纤的折射率,可以用掺入少量的 GeO_2 、 P_2O_5 等方法加以改变(见图1)⁽³⁾。用来生产二氧化硅光纤的原材料



掺杂浓度(克分于%)

图1 对二氧化硅中的各种掺杂物,其浓度与折射率之间的关系曲线图。

为四氯化硅,四氯化锗和五氯化磷。这些原材料在室温条件下均为液相。通常在气相中使用,以排除过渡金属离子的污染。氯化物中过渡金属杂质(它能增加对光的吸收)的蒸气压力要比 SiCl_4 、 GeCl_4 和 POCl_3 的蒸气压力低得多,例如, FeCl_3 的蒸气压力就仅为 SiCl_4 的 $1/10^4$ 左右。因此,这些原材料在气相中应用就得到蒸馏。掺杂物的浓度,并从而折射率,能用改变这些气态原材料的流速的方法加以精确控制,其工艺与制造半导体器件的工艺相似。在多组分玻璃纤维的情况下,则是把超纯度的粉状氧化物和

碳酸盐在坩埚中混合与熔炼。塑料包层光纤⁽⁴⁾,举例来说是由一种合成二氧化硅芯子和硅橡胶塑料包层所组成的。这样,便生产出一种大芯径($200\mu\text{m}$)的突变型多模光纤,其芯子和包层间的折射率差也大。芯子和包层均由聚合物制成的塑料光纤⁽⁵⁾,则被用于能发挥它的柔性优点的地方,只是损耗要较玻璃纤维的损耗大些,典型损耗为 100dB/km 。

3. 生产方法

3.1 二氧化硅光纤

二氧化硅光纤的制备是由两个主要加工过程组成:做预制棒与拉丝。光纤的传输损耗和带宽,在很大程度上取决于做预制棒的过程,而直径的均一性以及其强度,则取决于拉丝过程,兹将这两个加工过程分述如下:

3.1.1 预制棒的制造过程

自1970年以来,已发展了若干种制造二氧化硅光纤的方法,大多数都是采用气相反应法。

A.管外气相氧化法OVPO⁽⁶⁾和管内气相氧化法(IVPO)⁽¹⁾都被发展了。这两种方法的化学过程相同。用IVPO法生产出第一根损耗值小于 20dB/km 的光纤。OVPO生产过程的示意图如图2所示:从气相原材料在氢氧焰中合成的玻璃微粒沉积于一根用陶瓷或二氧化硅制的起始心轴上。待玻璃沉积层(通常称为“积灰”)完成以后,利用积灰与芯轴的热膨胀系数的不同,而把多孔预制棒从芯轴上滑脱下来,继后,使之在 1500°C 左右烧实为带有中心孔的透明预制棒。再把烧实的预制棒加热至 $1800\sim 2000^\circ\text{C}$ 范围内的更高温度,以消除中心孔。预制棒的折射率分布可通过逐层改变气体混合物中掺杂物的浓度来达到。直接来自燃烧喷嘴的

羟基杂质，可在氯气大气中烧实之前，对多孔预制棒进行热处理的方法加以排除⁽⁷⁾。

B. 图 3 所示为研究成功的“改进化学气相沉积法 (MCVD) 的基本原理⁽⁸⁾：把由氧气带着的卤化物原材料导入二氧化硅包皮管

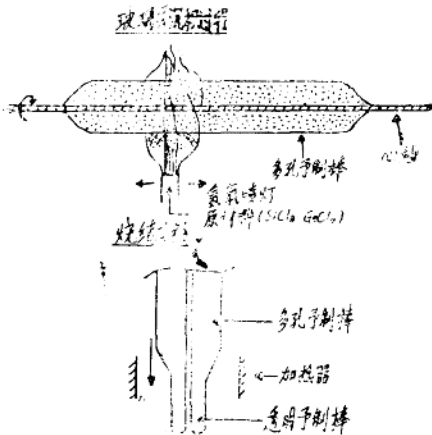


图 2 OVPO 法示意图

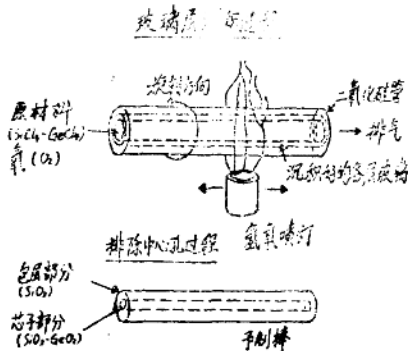


图 3 MCVD 法剖面图

内，包皮管从外面用氢氧焰加热至1400℃左右，氢氧焰每走一个循环，卤化物气体原材料就被氧化为极细的玻璃微粒并立即沉积在二氧化硅管的内壁上。在玻璃加工机床上，反复地把火焰沿着管子移动，就会形成多层玻璃，与OVPO法相似。MCVD法的特点是，由于在闭合的空间进行加工，可得到高纯度的玻璃沉积，并可通过在氢氧焰每走一道时改变氧化成分的方法来获得任意的折射率分布。最重要的是，在沉积芯层之前，要

沉积一层厚的阻挡包层。这样便可减少 OH-吸收损耗。因为，当玻璃层正在沉积时，OH离子便会从二氧化硅管中扩散到沉积的芯玻璃层上。阻挡层和芯层沉积好后，会留下一个中心孔，这一中心孔随后采取烧缩管子的方法加以排除，以形成实心的纤维预制棒。不用喷灯而用其它的能源，如射频或微波等离子(等离子化学气相沉积，PCVD法)也能把卤化物原材料反应成氧化物玻璃⁽⁹⁾。

C. OVPO, MCVD 和 PCVD 方法的特征是，玻璃层从侧面沉积，气相轴向沉积法 (VAD)⁽¹⁰⁾ 的沉积方向不同于各种常规方法；(如图 4 所示)。从喷嘴喷出的气相

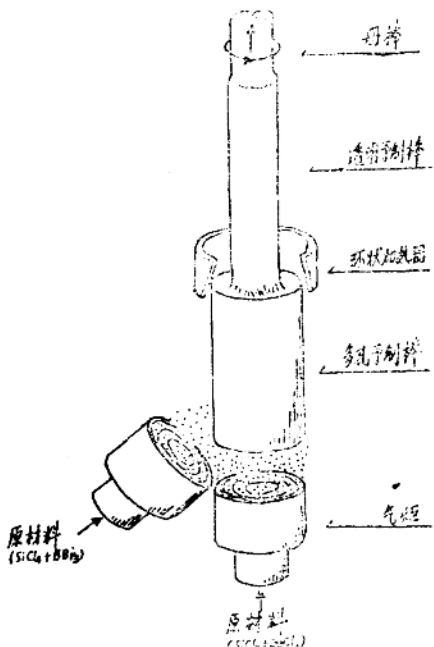


图 4 VAD 法的基本结构图

原材料，由火焰水解而反应成极细的玻璃微粒，随即以轴向沉积在一根起始棒的末端上。将在轴向逐渐增长的多孔预制棒，与其增长速率相配合的速度往上拉，在温度大约为1500℃的电炉烧实为透明的预制棒。玻璃微粒的沉积和烧实都是在轴向连续进行的。利用在氢氧焰中合成SiO₂—GeO₂微粒

的沉积特性，可以得到空间折射率分布。在玻璃微粒中氧化锗的浓度，在很大程度上取决于多孔预制棒表面的温度，因此，举例来说，可以采取改变气流的条件来控制多孔预制棒表面的温度分布以形成折射率分布。VAD法的脱水技术，基本上与OVPO法的脱水技术相同。表2中归纳了这几种方法的特点。

3·1·2 拉制和涂敷工艺

长而细的光纤，是用上述方些生产的预制棒拉制而成的。拉制光纤的设备示意图如图5所示。先将预制棒送入炉中，在这里把纤维通过一个牵引轮而拉到一只收线盘上。拉制损耗低、尺寸控制得好、强度高的优质二氧化硅光纤要求一个：控制得很好的2000℃以上的温度，并且周围环境要清洁。用来拉制光纤的热源有多种，例如，电阻加热、感应加温、氢氧焰、二氧化碳激光器等。为了生产现代化水平的光纤，用得最广的热源是石墨电阻炉⁽¹¹⁾和氧化锗或石墨感应电炉⁽¹²⁾。石墨加温元件必须要在不断流动着的纯惰性气体中使用，以免被氧化而损坏，但氧化锗感应加热电炉则不需任何保护大气。热源中心的温度被稳定在2000±1℃范

围内，以减小光纤直径的变化。光纤的外径，是在流水线上用市上有售的测量仪以光学方法来测定的，分辨力在±0.2μm以内，测得的数值被反馈回去，以控制牵引轮的拉丝速度。

因此，大量生产直径不均匀度减小到±3μm范围内（对125μm外径）的光滑的光纤是容易的，长度可达到几十公里。当前典型的拉制速度为1米/秒。

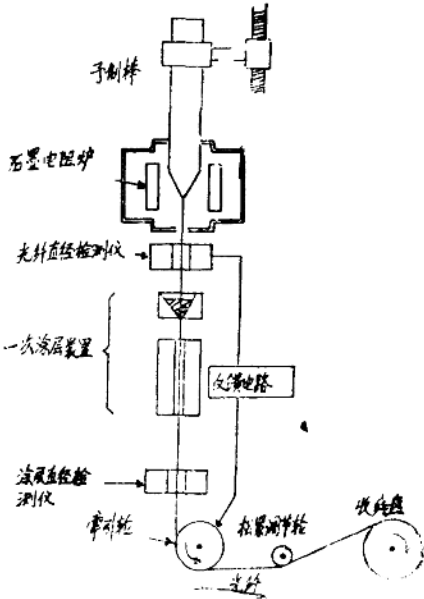


图5 用预制棒拉制纤维的装置示意图

众所周知，光纤表面的微裂纹会导致光纤的抗拉强度显著的降低。因此，光纤必须涂上一层塑料，以保护原始状态的玻璃表面不致直接受到机械磨损。这样的涂层是在光纤的拉制过程中流水线上涂好的。可以采用的涂层材料有多种，如，聚氨基甲酸(乙)酯，丙烯酸环氧树脂，硅酮树脂，乙烯—醋酸乙烯等。这些聚合物在液体状态用储蓄模涂到光纤上，并立即通过加热或紫外线照射而固化。在涂敷过程中，厚度的均匀性和同心度对获得质量高，由微弯损耗引起的附加损耗最小的光纤是重要的。为此目的，有时可采用一层模量低的硅橡胶来作为缓冲

表2 二氧化硅光纤预制棒制造方法的分类

	反应方式	沉积方向	折射率分布的形成
IVPO	火焰水解	横向沉积 (在二氧化硅管内)	层式近似法
OVPO	火焰水解	横向沉积 (外心轴)	层式近似法
MCVD	高温氧化	横向沉积 (在二氧化硅管内)	层式近似法
PCVD	高温(射频)或低温(微波)氧化	横向沉积 (在二氧化硅管内)	层式近似法
VAD	火焰水解法	轴向沉积 (连续生产)	在空间一次形成

层, 然后再把一个高模量的聚合物的(例如, 尼龙)套层挤到光纤的涂层上, 籍以增强耐磨性。

3·2 多组分玻璃纤维

多组分光纤的生产过程是由玻璃的熔化和拉制两个过程组成, 与二氧化硅纤维的制造不同, 其光学波导的形成是在拉制的过程中实现的。首先, 按比例称出超高纯度的如 SiO_2 , Na_2CO_3 和 CaCO_3 反应物, 以得到所需组分的光纤。这些反应物都是用离子交换, 蒸馏和溶剂萃取来提纯的。把反应物混合在一起, 熔化并初炼。把这样得出的玻璃用切割与抛光, 从熔化的玻璃中拉棒或直接浇铸在一只坩埚内等技术以形成块或棒, 把折射率不相同的芯和包层玻璃装于一只底部有两个同轴铸口的双坩埚中, 在 $600-1000^\circ\text{C}$ 左右拉到一起而成纤维。多组分玻璃纤维的拉制系统如图 6 所示⁽¹³⁾。使用铂及石英坩埚以避免杂质的污染。对光纤直径的控制和塑料涂敷技术, 均与二氧化硅光纤所用的方法相似。芯/包层比取决于双坩埚铸口的尺寸。越过芯和包层界面的各组分的扩散, 影响着多组分玻璃纤维的折射率分布, 例如, 用铈 (Tl) 来实现渐变折射率分布。可采用将玻璃块料不断加入到双坩埚中的方式进行多组分玻璃纤维的连续生产。另外还有一些预制玻璃的方法, 如管一内棒法和分子堵塞法⁽¹⁴⁾。分子堵塞法包括硼硅酸盐玻璃中的相位分离, 用酸漂洗成多孔玻璃, 在空洞中填入掺杂剂如铯 (Cs), 以及烧结为透明的玻璃棒。

4. 光纤制造工艺的现状

4·1 传输特性

制造光纤的工艺已进展到这样的水平, 以致在传输特性中只有内在和限制因素才有

意义的⁽¹⁵⁾。由过渡金属杂质所引起的损耗增加, 用了气相反应和对氧化物或碳酸盐原材料的纯化已很容易地解决了, 然而, 较成问题的是如何减少羟基离子。

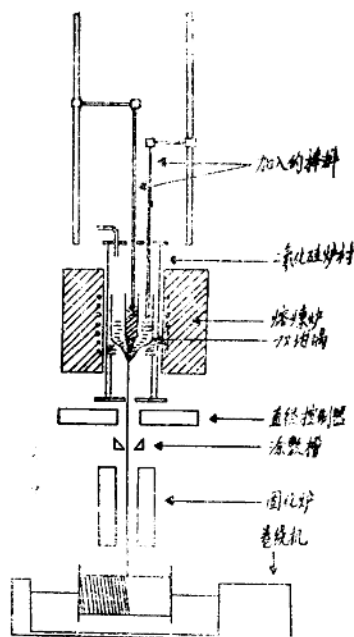


图 6 双坩埚法光纤拉制装置

MCVD和PCVD法中的羟基离子起因于带氢的杂质, 如像卤化物原材料中的 SiHCl_3 。玻纤中OH污染的其它根源, 是在烧缩和拉制的过程中, 从二氧化硅包皮管来的OH离子扩散到沉积的芯层中⁽¹⁶⁾。这些OH的污染源能通过使用纯化的原材料和在沉积芯子以前合成原的阻挡包层来加以排除。近来, 用MCVD法制造的纤维, 其OH杂质已被减少到 1×10^{-9} 分之几⁽¹⁷⁾。

在OVPO和VAD光纤制造法(积灰法)的情况下, 降低OH污染, 要比用MCVD法更为困难; 这是因为OH离子直接来自火焰水解。1979年, 研究成功了积灰法的脱水技术⁽¹⁸⁾。这些方法包括在把多孔预制棒烧实为透明的预制棒之前, 在 Cl_2 或 SOCl_2 大气中进行热处理。采用这种方法, 能够很容易地

把OH离子降低到约 10^{-8} 的水平。因为采用这些方法时，都不需二氧化硅管，所以不存在OH离子从外部扩散到芯区中去的问题。1980年已成功地用VAD生产出了几乎完全无OH的玻璃纤维⁽¹⁹⁾。这种纤维中的OH的残余含量已被减少到 1×10^{-8} 以下，从而在其损耗谱中打开了一个低损耗的大窗口，如图7所示，图7中还示出有紫外（UV）吸收，红外（IR）吸收瑞利散射，所引起的理论损耗曲线。

在标题为“光纤的基本特性”的第Ⅱ章中列出了到目前为止已报导过的最低损耗值。现在已能买到在 $0.85\mu\text{m}$ 附近波长上损耗为 $2 \sim 5 \text{ dB/km}$ ，在 $1.3\mu\text{m}$ 附近波长上损耗为 $0.5 \sim 2 \text{ dB/km}$ 的光纤。

用排除由于气泡和微结晶所引起的过渡金属杂质和散射中心的方法，可降低多组分玻璃纤维的传输损耗。已达到的最低损耗在 $0.85\mu\text{m}$ 为 3.4 dB/km ⁽²⁰⁾，但平均损耗仍大于二氧化硅纤维的损耗。能生产出数值孔径高达 0.6 ⁽²¹⁾的多组分玻璃纤维。

为了生产宽带宽的光纤，最重要的是要精确地控制折射率分布，使其具有抛物线形

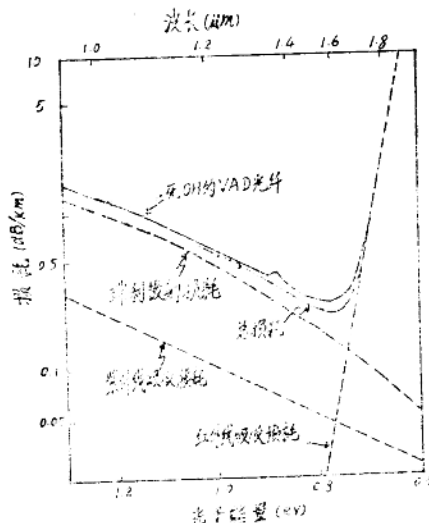


图7 无OH的VAD光纤的损耗谱，虚曲线表示计算出来的各种损耗分量

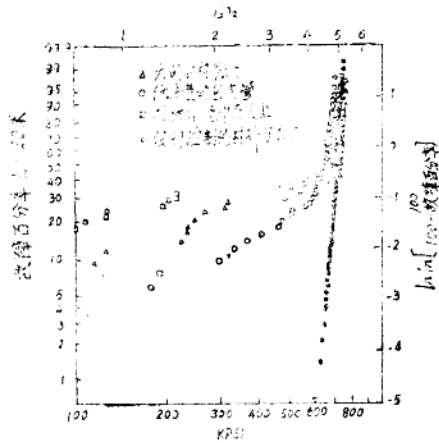


图8 在各种控制条件下生产的3km长纤维的维泊尔图后变解为 0.35% ⁽²³⁾

状。为了精确地形成抛物线折射率分布，研究成功了多种生产技术，如OVPO、MCVD、PCVD和VAD法；对于有掺杂物的二氧化硅玻璃的沉积温度，卤化物原料通入二氧化硅包皮管或燃烧器的速率，MCVD法中，对二氧化硅管内压力的控制，以及VAD法中使用的燃烧器的结构与尺寸等都已进行过细的研究。故而在1980年获得了高达 6 GHz/km 的带宽⁽²²⁾。生产渐变型多模光纤的技术也达到了一种能容易地大量生产 $0.2 \sim 1 \text{ GHz/km}$ 带宽的光纤的水平。

4.2 强 度

在最早期的光纤制造工艺中，大部分光纤，都是无涂敷的，抗强度很低，不到 100 kg/mm^2 (1 GPa)。光纤的强度对许多加工工艺中的可变因数非常敏感：如热源的清洁度，拉制时的温度，涂层的施加及其材料以及玻璃预制棒的质量。改进拉制技术和涂敷技术已经得到更接近于玻璃本身固有强度的高拉伸强度。纤维的强度一般可用以最弱一链模型为基础的维泊尔(Meibull)分布图来表示。图8表示在不同条件下拉制的纤维的维泊尔图⁽²³⁾。在 $4 \sim 5 \text{ GPa}$ 范围内的同