

光纤 传输 系统

guangxian chuan shu xi tong

帕松尼克著 朱永藩 杨同友译 ● 人民邮电出版社

99.1

Optical Fiber
Transmission Systems
Stewart D. Personick
PLENUM PRESS. NEW YORK AND LONDON
1981

内 容 提 要

本书主要介绍了光纤通信系统的基本组成，各部分的基本原理以及对系统性能的影响。其中着重论述了光接收机的组成、性能和各种因素对性能的影响。

本书可供从事光纤通信的工程技术人员和大专院校师生参考。

光 纤 传 输 系 统

〔美〕S.D.珀松尼克 著

朱永藩 杨同友 译

责任编辑：李树岭

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32

印张：5 28/32 页数：94

字数：152 千字

1985年8月第 一 版

1985年8月河北第一次印刷

印数：1—4,700册

统一书号：15045·总3068—有5425

定价：1.50 元

序 言

自从第一次从原理上提出能够生产超低损耗的光纤以来，已经过去14年了*，现在，这一新技术已取得了惊人的进展⁽¹⁾。在六十年代末期只不过是一些使人感兴趣的设想，而七十年代末期在某些应用中已成为现实^(2~5)。前进的步伐是令人鼓舞的。在实用的光缆中，光纤的损耗原来是以每米多少分贝衡量的，而现在已是以每千米多少分贝来衡量；激光器在室温下的预定寿命已从以多少分钟计增加到以十年计；以微米容差来连接光纤的技术已在现场使用；可以将能自然断裂的光纤制成以千米计的长度，而其强度超过优质钢。

作为传输用的光纤是一个广泛的课题，可以从许多不同的方面，如：材料、器件、理论、子系统、系统等来研究。

关于这方面的课题已经发表了几百篇论文并出版了几部著作。无疑，还会有更多的论著问世。这些论著涉及到所有的方面，但与本书一样都侧重了其中的一个方面。本书是一系统工程师对传输用的光纤的一些研究，它介绍了作者在参加到光纤系统的研究、探索、发展和应用的十年期间中所逐渐形成的观点。

对在一般参考文献中能找到的一些分析结果的推导，作者就尽可能不再重复。但推导的结果、得到这些结果的详细推论和参考文献是经常应用的。

在应用的一章（第五章）中，作者试图阐明在各种情况下是什么应用、要求是什么以及可能与之竞争的技术又是什么。在这里避免了详细的成本比较，因为光纤技术的发展是太快了*。

史蒂华D.珀松尼克

* 作者成文于1981年——译者

•• 谢辞略——译者

目 录

1. 概论	(1)
1.1 一般光纤系统的方框图	(1)
1.2 光纤	(3)
1.2.1 玻璃和光纤的生产	(3)
1.2.2 光的传播	(7)
1.3 光源	(11)
1.4 检波器	(17)
1.4.1 光电二极管：物理概念	(18)
1.4.2 雪崩光电二极管	(23)
习题	(25)
2. 系统和子系统的要求	(27)
2.1 要求	(27)
2.2 信号	(27)
2.2.1 时钟数字系统	(28)
2.2.2 非时钟信号	(37)
2.2.3 多电平信号	(40)
2.2.4 模拟信号	(40)
2.3 实用中的限制	(41)
2.3.1 子系统的供电	(41)
2.3.2 环境	(42)
2.3.3 工作的要求	(42)
3. 子系统	(44)
3.1 概述	(44)
3.2 理想的子系统	(44)

3.3 发送机子系统	(45)
3.3.1 光谱的考虑	(47)
3.3.2 LED发送机的电路	(49)
3.3.3 激光器发送机的电路	(54)
3.4 接收机子系统	(58)
3.4.1 基本噪声源	(59)
3.4.2 放大器中的噪声	(61)
3.4.3 雪崩增益	(76)
3.4.4 二进制数字接收机的性能计算	(81)
3.4.5 模拟接收机的性能计算	(92)
3.4.6 实际接收机的例子	(96)
3.5 光纤子系统	(101)
3.5.1 光纤的输入/输出特性	(101)
3.5.2 光纤参数的测量	(112)
习题	(120)
4. 系统	(122)
4.1 子系统之间的相互影响	(122)
4.1.1 模及耦合	(122)
4.1.2 光源的起伏噪声	(127)
4.1.3 时延失真	(129)
4.1.4 耦合效率、损耗和时延失真的折衷选择	(131)
4.1.5 低频时延失真——拖尾	(133)
4.2 数字系统举例	(133)
4.2.1 10兆波特二进制短距离干线载波系统	(134)
4.2.2 数据总线	(144)
4.2.3 长距离系统	(150)
4.3 模拟系统举例	(151)
4.3.1 直接强度调制	(152)
4.3.2 光纤系统和金属电缆系统的比较	(155)

4.3.3 扩展带宽的模拟调制方案	(156)
习题	(161)
5. 应用	(163)
5.1 电话干线的应用	(164)
5.1.1 金属干线的设备	(164)
5.1.2 对绞线电缆载波系统	(164)
5.1.3 同轴电缆载波系统	(166)
5.1.4 微波无线电系统	(166)
5.1.5 光纤系统	(167)
5.2 电话环路的应用	(168)
5.3 电视转播应用	(171)
5.4 交互电视转播和双向电视	(173)
5.5 遥测线路或数据总线	(174)
5.6 军事应用	(175)
5.7 无源和有源传感	(175)
参考文献	(177)

1 概 论

1.1 一般光纤系统的方框图

一般数字光纤传输系统的方框图如图1.1所示。从图的左上方开始，假设准备传送的信息原来是模拟的形式，例如，4 KHz 电话信道中的信息。可以用一个称为信道架的电子终端设备将几个这样的模拟信号同时变换为独立的二进制序列，而每一序列有一固定

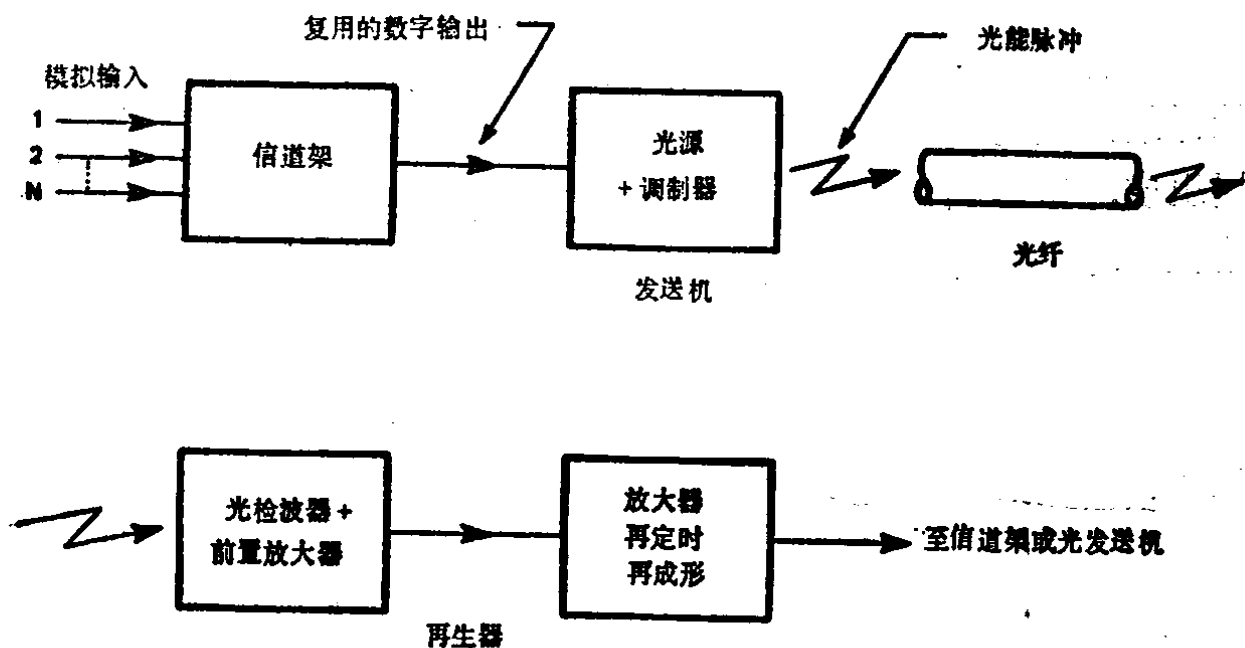


图 1.1 一般的数字系统

的数据率（比特/秒）。在对绞线电缆、同轴电缆、无线电等传输系统中，这种从模拟形式到数字形式的变换都是按既定的程序进行的。然后，就将这些独立的已编码的语言信号交错成为一个单独的（综合的）时间复用的数字信号，可以用该信号来调制光源⁽¹⁾。有两种调制方法⁽²⁾，一种是产生一个连续的光信号，然后就用光源后面的调制器来调制这个信号的幅度或相位；另一种是调制驱动光

源的电流以直接调制光源的输出功率。一般讲，前一种方法较昂贵且较困难。所以，通常只在不便于直接调制光源的情况下才使用外调制。直接调制的一个限制因素是速率。因为某些光源对驱动电流变化的响应迟缓，幸而在光纤传输应用中，对可能使用的主要光源——注入式激光器和发光二极管——能以适应多种应用的速率来直接调制。这样，就有可能得到简单而价廉的光发送机。我们将在2.2节和3.3节中对调制进行全面的讨论。目前在光纤应用中易于得到的光源是用砷镓铝材料制成的，其发光波长为 $0.75\sim 0.9\mu\text{m}$ 。由GaInAsP作成的 $1\sim 1.5\mu\text{m}$ 波长区的光源正处于发展阶段。

将光发送机发出的已调制的光（功率）耦合进传输用的光纤中(8)。一般讲，是使光纤紧靠着光源的发光面。尽可能地使光源的发光面积能与光纤的截面积相当，以避免使用昂贵的和不现实的光学耦合器件。在1.2、3.5、和4.1节中将对光在光纤中的传播作较详细的叙述。基本的传播机理是全内反射(4)。光纤由纤芯和包层组成，如图1.2所示。包层材料（一般是玻璃或塑料）的折射率略低于纤芯材料的折射率。纤芯的直径一般是 $50\sim 100\mu\text{m}$ ，包层的

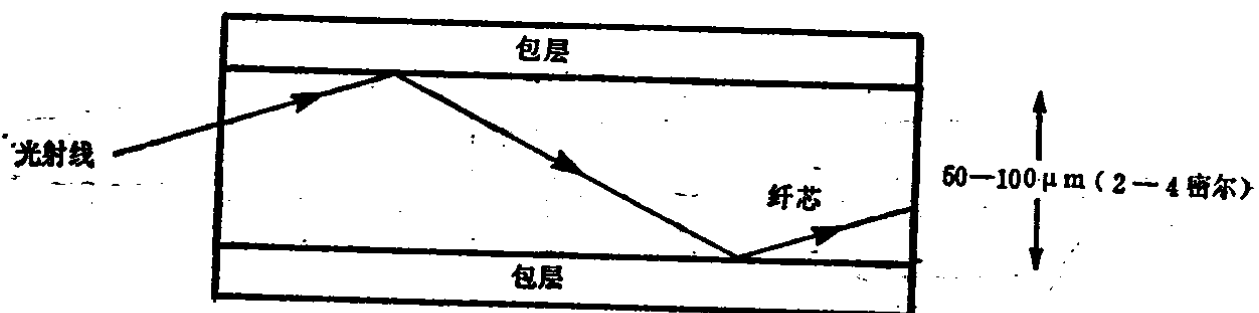


图 1.2 全内反射

直径一般是 $100\sim 200\mu\text{m}$ （有时也采用其它的规格，这一点将在4.1.4和4.2.2节中讨论）。损耗小于 10dB/km 的光纤可使光脉冲传输几公里而不需要再生中继器。波长为 $0.8\mu\text{m}$ 损耗小于 4dB/km 的光缆可以在市场上购得。再生中继器用检波器（一般是硅光电二极管）将光脉冲（由于传输，它已经变弱而且可能失真）变为电脉冲，放大器提高检波器输出脉冲的电平，而由再定时和整形电路产

生新的、不失真的电脉冲。这些新的脉冲能使终端恢复原始的模拟消息或能使另外的光发送机以便进一步地传输。

以上所说的是比较简单的系统，在许多方面，它更象一个有线（对绞线或同轴线）通信系统（用光子代替电子）而不象一个无线的光频系统。但是，在光纤系统达到商用之前，还有很多严重的障碍需待克服。在以后的章节中将讨论如下课题：光纤的成缆和连接；生产价廉、低损耗、频带宽、强度高的光纤；生产低成本、高可靠性、在一定的波长时输入-输出特性好的光源和检波器；并设计出易于与常规的电子设备接口的接收机子系统和发送机子系统。

1.2 光 纤

1.2.1 玻璃和光纤的生产*

大多数的低损耗光纤通常是由玻璃制成的。在大多数人的概念中，玻璃是二氧化硅含量很高的非晶状固体。实际上，玻璃可以由任意一些“形成玻璃”的材料来组成，这些材料在适当的制备条件下将形成非晶状固体而不是晶状固体。例如，固态的水通常是晶状的（冰），但是在急速冷却的条件下，它可以成为玻璃状。在光纤研究的初期，所用的大多数玻璃是氧化钠、氧化钙和二氧化硅的混合物——通称为钠钙硅酸盐玻璃（根据制成玻璃的原材料）。这种玻璃的熔点比较低，并且可以将它们的铂金坩埚或熔融石英的坩埚中熔化。这一性质正是在早期的研究中选择它们的原因。生产不含各种金属离子（铁、铜、镍等）的多组分玻璃是困难的。假若玻璃的损耗在 $0.9\mu\text{m}$ 波长时低于 10dB/km ，那么这些金属离子的浓度就应降低到十亿分之几。在早期的损耗为 1000dB/km 或更大一些的光纤中，这些金属离子的杂质吸收是限制性的因素（被吸收的变成热（振动能），并以长波长辐射，或被传导耗散）。光纤工艺的重大

* 见参考文献4的7~9章

突破是在1970年，那时美国康宁玻璃公司生产的光纤基本上是纯石英玻璃的，其损耗低于20dB/km。原材料（四氯化硅和四氯化锗）和生产方法（化学汽相沉积法，CVD）为生产杂质浓度很低的光纤创造了条件。康宁玻璃公司所用的方法示于图1.3中。 SiCl_4 和 GeCl_4 在氧中燃烧形成 SiO_2 和 GeO_2 的微细颗粒，它们作为“粉尘”沉积在旋转的石墨心棒上，增加 GeO_2 的量就可增大所沉积材料的折射率。因此，在一开始使沉积层中包含 GeO_2 ，最终就形成了折射率较高的纤芯。当沉积到足够的分量时就取出心棒，通过加热使沉积的粉尘管成为透明的玻璃体。进一步的加热使得它收缩成为实心的预制棒，用图1.4所示的设备可将这预制棒拉成光纤。

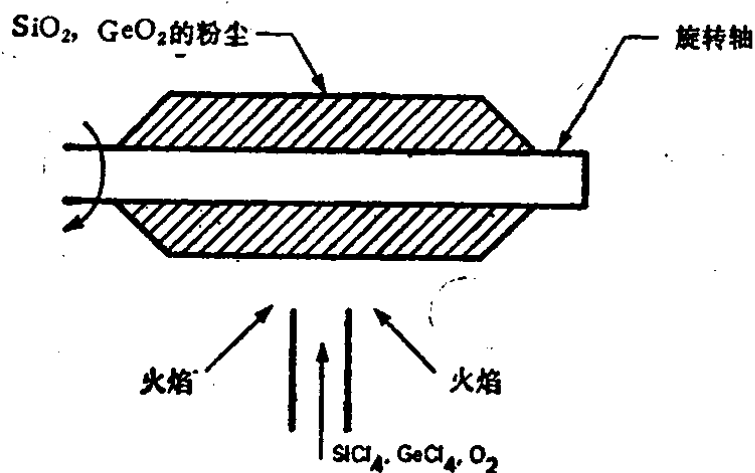


图 1.3 CVD法

将预制棒向下伸到环形炉中，将温度升高到软化点（因为玻璃从固体不是突变为液体，所以不能确切地确定这个温度），然后将预制棒的软化部分从末端向下拉，并将拉成的光纤绕在旋转的圆筒上。拉成的光纤其直径取决于炉内温度、圆筒的旋转速度和预制棒伸入到炉的速度。光纤直径的测量设备对这些参数进行反馈控制。

图 1.5 示出了另一种生产高纯度石英预制棒的方法（改进的化学汽相沉积法，MCVD）。开始时是将纯的石英玻璃管装在玻璃车床上。使气体从管的一端流进，而从另一端排出，玻璃管则在同步的卡盘间转动，四氯化锗、四氯化硅和三氯化硼（以及其它可能的材料）由于管外移动的喷灯的加热而在管内的氧中燃烧，生成的氧

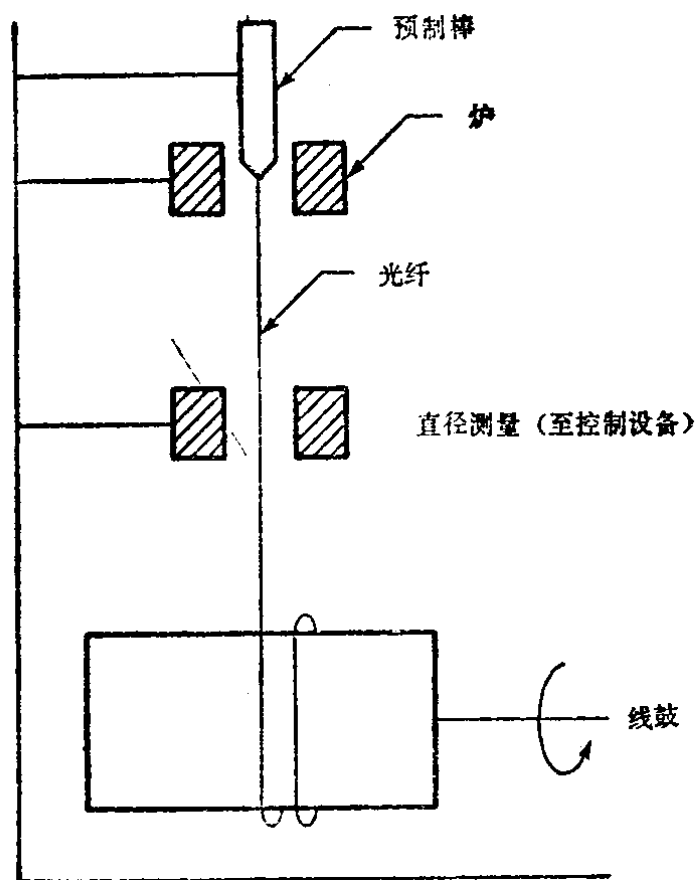


图 1.4 拉丝机

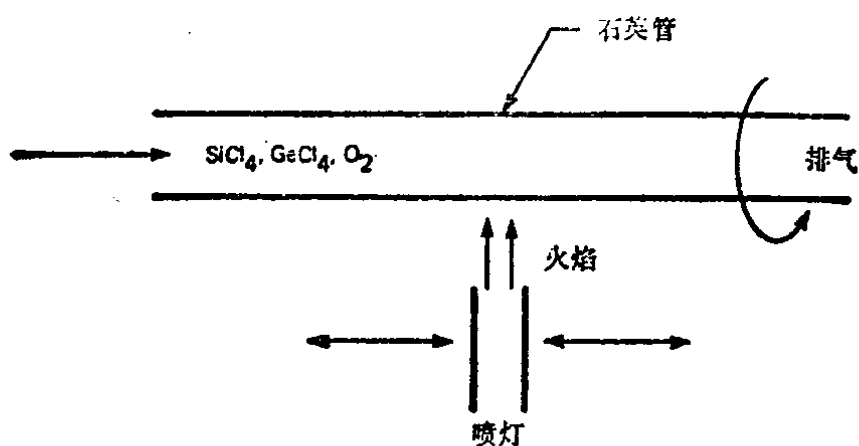


图 1.5 MCVD法

化物以粉尘的形式顺着喷灯走向沉积。当喷灯经过它们时，这些粉尘就固化为透明的玻璃。用这种方法能在管内以不同的组分一层又一层地沉积成新的玻璃，因而得出不同的折射率。在沉积了许许多多层以后，就提高喷灯的温度，玻璃管就收缩为实心的预制棒。

生产高纯度石英玻璃和多组分玻璃预制棒以及拉丝的其它方法可在参考文献中找到。

图 1.6 表示一般可以购得的低损耗光纤的损耗—波长特性。图 1.7 表示自六十年代后期以来，在820nm波长处光纤损耗如何随时间而改进的报导。早期的光纤，损耗主要是被杂质的吸收所支配；现在最好的光纤，0.8~0.9μm波长和1~1.5μm波长处的损耗

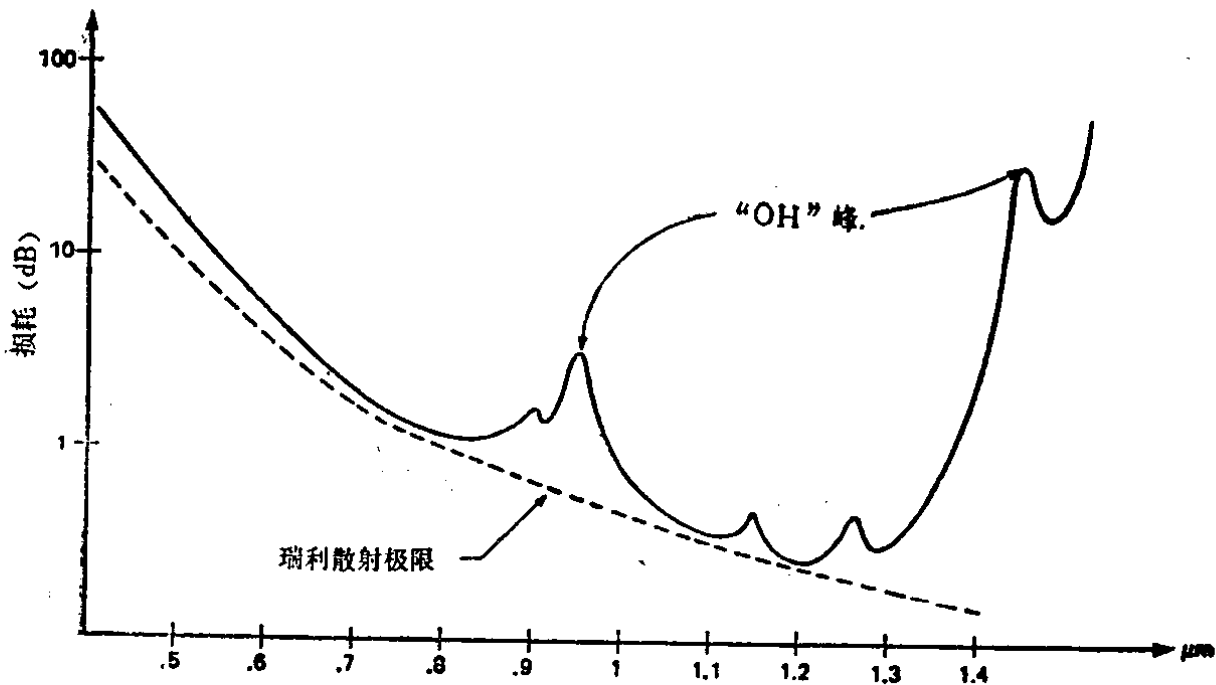


图 1.6 损耗与波长的关系
(一般低损耗石英光纤)

主要是被分子密度和组分波动所引起的散射所支配。该散射通称为瑞利散射。由于玻璃中存在剩余的OH离子而在0.9μm波长附近通常有“水”的吸收峰。因为瑞利散射跟波长的四次幂成反比，因此，在1.3~1.5μm区的损耗减小。

除了用良好的方法控制参数（如直径、折射率）来拉制光纤以外，还必须考虑到光纤的涂敷以保持其强度，并将已涂敷的光纤作成光缆付诸实用。但是这些课题已超出本书的范围，不过在一些参考文献中对其有充分的讨论*。

* 例如见参考文献 4 的第十章和第十三章。

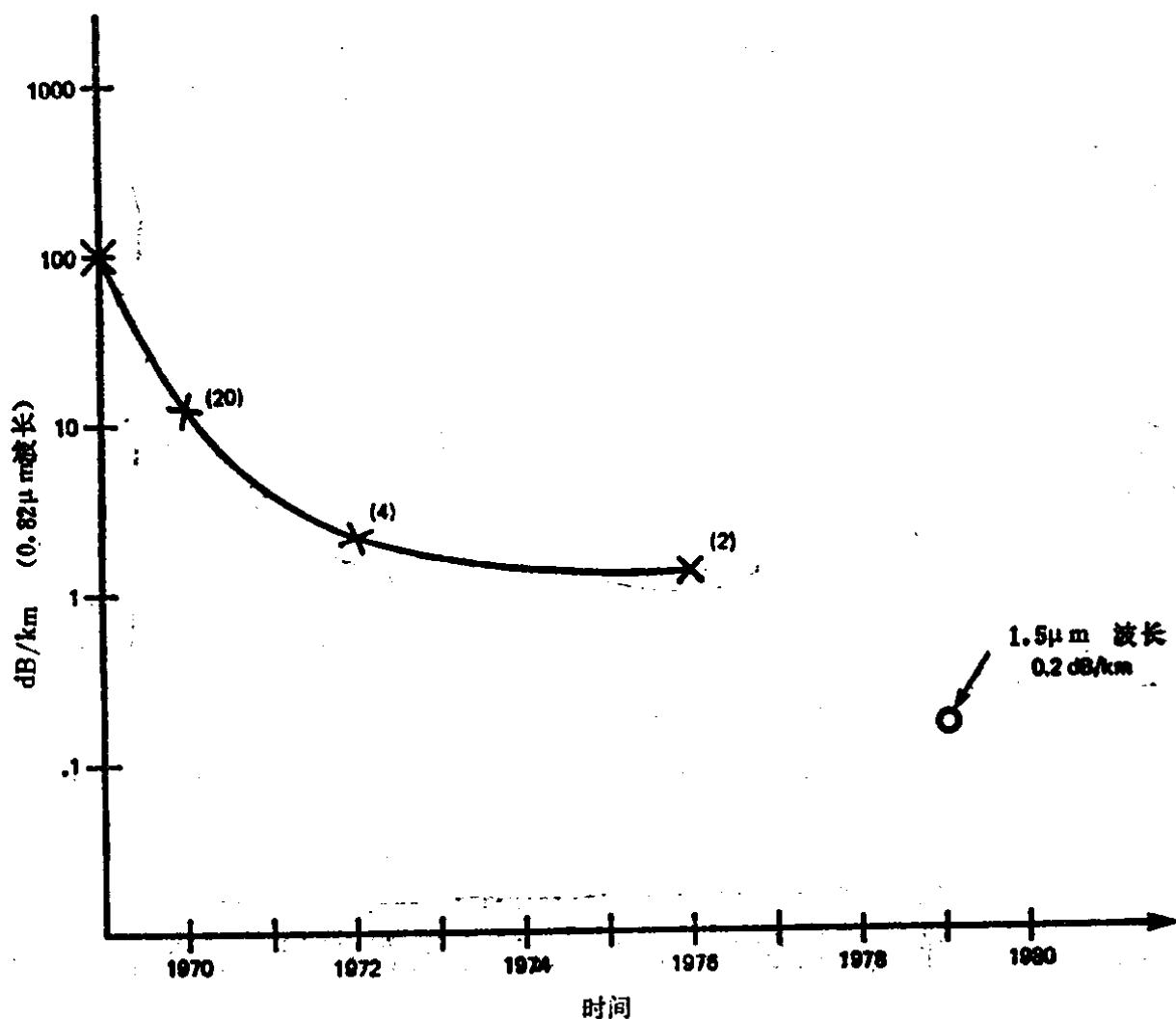


图 1.7 已报导的最佳的损耗—时间曲线

1.2.2 光的传播

对不同的应用有许多不同类型的光纤。最简单的一种是有玻璃包层或塑料包层的玻璃纤维，包层的折射率低于纤芯的折射率，见图1.8。一般说来，纤芯的直径是所传播光的波长的几十倍或几百倍。因此，对于传播现象就可用几何光学而不用波动光学来研究。一般芯径可以是 $50\mu\text{m}$ 或2密尔，如上所述，一般波长为 $0.75\sim 1.5\mu\text{m}$ ，因此可用图1.8来研究光纤中光的传播。从光源发出的光射向光纤时受到折射（折弯），这是因为空气和玻璃的折射率不同，一般玻璃的折射率为1.5。进入纤芯而以比较小的角度射向纤

• 见参考文献4的第三、四、六和十一章。

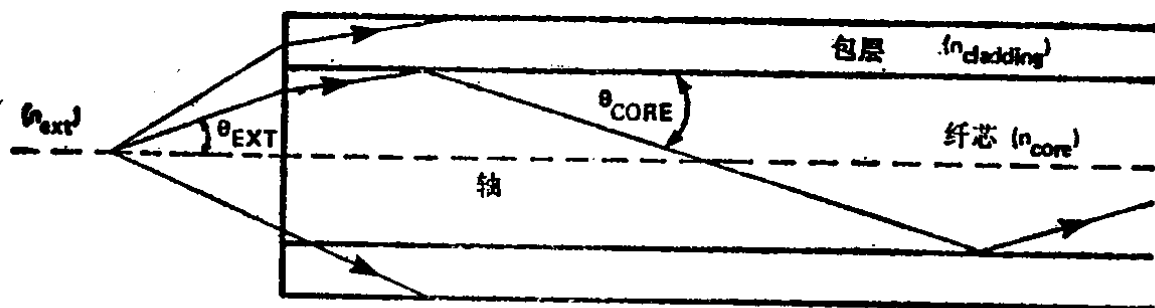


图 1.8 全内反射，临界角

芯和包层界面的光线受到全内反射。将斯涅耳折射定律应用到射向纤芯和包层界面的光线及光线与界面平行的极限情况，这时就可得出“临界角”，即光线有全内反射时与光纤轴所成的最大角：

$$n_{core} \cos(\theta_{core}) = n_{cladding} \cos(\theta_{cladding}) / \cos(\theta_{cladding}) = 1 \quad (1.2.1)$$

(不通过界面传输)，即

$$n_{core} \cos(\theta_{max}) = n_{cladding}$$

所以

$$\sin \theta_{max} = [1 - (n_{cladding}/n_{core})^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中， n_{core} 是纤芯的折射率， $n_{cladding}$ 是包层的折射率， θ_{max} 是临界角。

假定纤芯与包层的折射率相差不大，则可得出下列关系：

$$\begin{aligned} n_{core} \sin \theta_{max} &= (n_{core}^2 - n_{cladding}^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= [(n_{core} + n_{cladding})(n_{core} - n_{cladding})]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

如果

$$n_{core} \simeq n_{cladding} = n$$

则

$$n \sin \theta_{max} \simeq n(2\Delta)^{\frac{1}{2}} = N.A. \quad (1.2.2)$$

式中， $\Delta = (n_{core} - n_{cladding})/n_{core}$ 是相对折射率差，而N.A.是光纤的数值孔径。

式(1.2.2)给出了光线可能与光纤内轴心所成的最大角。也可导出，在光纤外部介质中，光线射到光纤端面时与光纤轴心所成的最大角。根据斯涅耳定律得出：

$$n_{ext} \sin(\theta_{ext}) = n \sin(\theta_{core}) \quad (1.2.3)$$

$$n_{ext} \sin(\theta_{max\ ext}) = N.A.$$

式中, n_{ext} 是外部介质的折射率 (空气的折射率是 1), θ_{ext} 是入射光线与光纤轴心所成的外部角。可以看出, 折射率差越大, 数值孔径越大, 光线与光纤轴心所成的角也越大, 并且仍可被传导。对于有 1% 相对折射率差 ($\Delta = 0.01$) 的光纤来说, 外部的最大角 $\theta_{max\ ext}$ 约为 8° (所捕获的光线的全锥与光纤轴心所成的半角)。这时, 光纤的数值孔径为 0.14。

从图 1.9 可以看出, 光线沿光纤的单位轴向距离, 在高射线角时的几何途径比低射线角时的要长。轴向光纤与以全内反射最大角 (临界角) 所传播的光线的时延差由下式表示:

$$\tau_{axial} = \frac{n_{core}}{C} \quad (ns/km) \quad (1.2.4)$$

$$\tau_{max} = \frac{n_{core}}{C} \cdot \frac{1}{\cos(\theta_{max})} \quad (ns/km)$$

$$\Delta\tau = \tau_{max} - \tau_{axial}$$

$$= \frac{n_{core}}{C} \left(\frac{n_{core}}{n_{cladding}} - 1 \right)$$

$$= \frac{n\Delta}{C} \quad (ns/km)$$

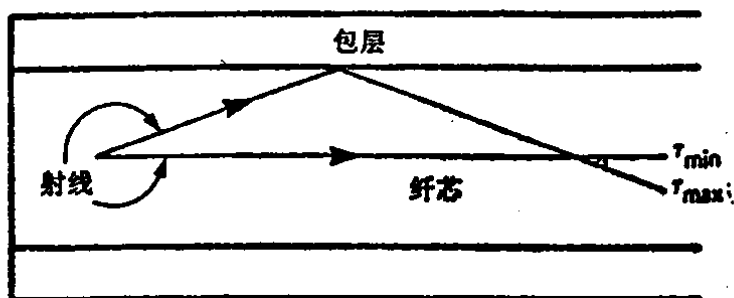


图 1.9 时延展宽

式中, C 是光速 ($3 \times 10^{-4} km/ns$)。当纤芯与包层之间的相对折射率差为 1% 时, 时延差为 $50 ns/km$ 。假若沿光纤传播的窄脉冲的

能量是分布在所有的光线上，那么，传播光线之间的时延差使得脉冲随时间而展宽。为了减小这种脉冲展宽的影响，可以采用如图1.10所示的渐变折射率光纤。纤芯处的折射率最大，自纤芯向其与包层的界面处逐渐减小。可以用CVD法或MCVD法在生产预制棒时通过改变沉积玻璃层的组分来作成这种光纤。光线在渐变折射率的光纤中按螺旋或正弦路径传播，如图1.10所示。从几何的观点来看，在单位轴向距离上，距光纤轴心较远的螺旋路径较长。但是，

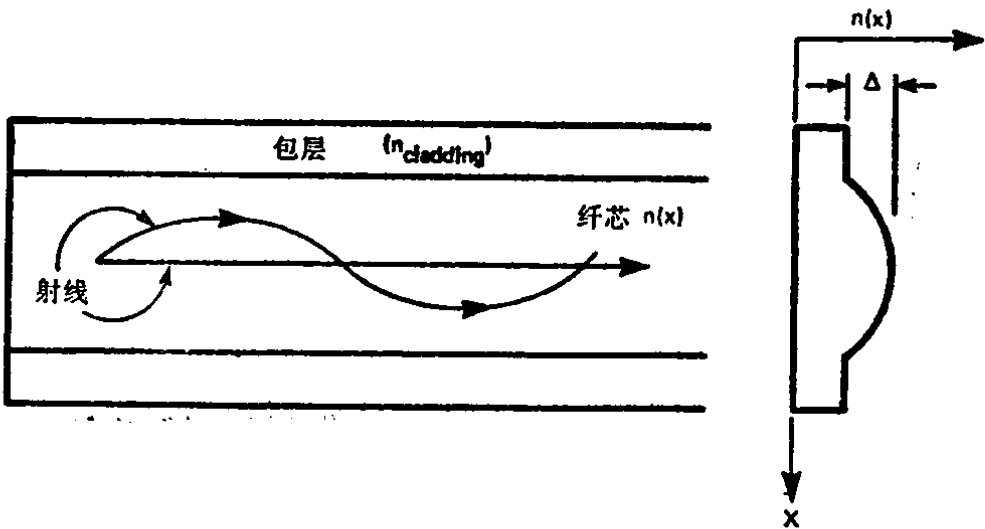


图 1.10 渐变折射率光纤

这种螺旋路径在纤芯中折射率较低（在上面已谈到，折射率随距轴心的距离的增大而减小）的部分“费了较多的时间”。在折射率较低的介质中，光线的群速度较高。因此，不沿轴心传播的光线能以速度来补偿它在几何距离方面的损失。在精心控制该种光纤折射率分布的情况下，与阶跃折射率光纤（约有相同的光线捕获能力）相比，可使光线之间的时延差约减少两个数量级。对时延展宽（模之间的群时延变化）的改善越大，则对折射率分布的控制也越严格。对纤芯的中心与包层之间的相对折射率差为1%的光纤来说，一般批量生产的渐变折射率光纤可保证有1~5 ns/km或更小的时延展宽（取决于价格，也是取决于制造过程中精选的程度），这可以与阶跃光纤的50 ns/km相比。因为在生产过程中，存在理想分布的随机偏差，它确定了任一光纤中的实际时延展宽，所以在增加成本的

情况下，总可以挑选出超低时延展宽的光纤。随着光纤生产技术的改进，所谓超低与标准之间的差距就会缩小。

另一种称为单模光纤的纤维，它对近期的一些特殊应用是有意义的，并且在将来会得到广泛的应用。上面的讨论是用几何光学模拟了光纤中光的传播过程。如前所述，只要纤芯的尺寸大于光的波长，这种分析方法还是成立的。可以证明，与光纤轴心成某种离散角的光线同光纤（作为介质波导看待）中所传播的电磁模式之间相对应。只有具有这些离散角的某些光线才能通过光纤传播。这些容许传播的光线的角距（相对于轴心）可大致由下式表示

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{a} \quad (1.2.5)$$

式中， λ 是光的波长， d 是光纤的芯径。对于芯径与波长之比大的光纤，可按照以上的分析，将所容许传输的光线的离散谱看作是连续的。当纤芯尺寸与光波波长相差不多时，所容许传输的光线之间的间距会相当大，以致落到临界角之下的唯一光线是轴向光线本身。因此，只有一种光线（模式）得到传播。在只有一种光线的情况下，就不存在什么模间的时延差了。但是，难以将光耦合进单模光纤，而且单模光纤难以接续，在敷设光缆时也难以避免由于光缆弯曲而引起的额外辐射损耗。因此，预计单模光纤在近期内只会在那些认为需要零时延展宽的应用中得到采用；由于耦合和成缆技术的改进，这些问题的影响就会减小，所以，它也会在远期得到应用。

1.3 光 源

在刚发明激光器时，通信工程师和科学家们就预见，超大容量的长距离通信线路除了毫米波波导系统之外，下一步就是光通信系统。例如，一种设想是在 6 英寸直径的管子中以一定的间隔安装透镜对或反光镜对传送多束的相干光。在这“光束波导”中的每束光