

光通信用的玻璃纤维

中国科学院上海硅酸盐研究所三室光纤组

一、引言

激光技术的出现,使相干电磁波扩展到了可见光波段。由于光的基频高几个数量级,故频带极其宽广,在理论上可同时传输一千万套电视节目或一百亿路电话。而且,激光的光束很窄,保密性和抗干扰能力较强,所以用激光作载波,建立激光通信网络,一直是国际上开展激光技术应用研究的重要课题。可是一些实验结果表明,激光大气传输严重地受到大气分子的吸收,尘埃、雾、露、雪和雨的散射以及云和大气湍流的干扰等因素的限制。而光波导通信恰好提供了一个不受大气干扰的传输途径。

为了实现长距离的光传输,人们曾对介质膜波导和透镜波导等进行了研究。其中对透镜波导的工作做得较多,但离实用尚远。到了七十年代,光导纤维、半导体激光器和集成光学获得重大突破,特别是光导纤维的传输损耗不断下降,根本地改变了光通信研究的局面。表1是光导纤维的研究进展。

表1 光导纤维的研究进展

时 间 (年)	衰减值 (分贝/公里)
1960	1000
1970	20
1972	4
1974	1.2
1975	0.85

本文将着重介绍获得低损耗光导纤维的技术,并以石英玻璃作为实例加以说明。

二、概 况

光导纤维是由高折射率的透明光学玻璃为芯,周围包着低折射率玻璃的薄层构成的,直径由几微米到几百微米。几种典型的光导纤维结构示于图1。

光线进入光导纤维的一端后,经芯—套层界面上多次反射(套层型)或在芯内折射(自聚焦型)而传到另一端。纤维外部的套层在纤维成束或制成光缆时,能起到防止各个纤维相互之间的窜漏作用。

近几年来,低损耗光导纤维的制备,已取得了较大的进展(见表1)。可以看出衰减量已经等于或低于现有同轴电缆或毫米波导的水平。所以,用玻璃纤维作为光通讯传输介质是现实的。光导纤维除了一般的单位时间内可输送30千兆位/秒脉冲信息的高通频带之外,还有抗电磁干扰、尺寸小、重量轻、介质绝缘和耐辐射等优点。光导纤维轻巧柔软,拐弯半径小,易于敷设并具有良好的温度稳定性。安装玻璃纤维系统比同轴电缆和毫米波系统造价低廉,而且,随着信息速率的提高,成本下降得比同轴电缆和毫米波系统快得多。

光导纤维通信系统可应用于建筑物内或市内电话、传真电话、通信电视和数据传输设备的连接;低容量或中等容量信道的几公里距离间的局间干线;以及远距离城市间的中等容量和大容量的光传输。此外,针对光导纤维的特点,可广泛应用于要求能量损耗小,光程曲折度很大的场合作为光或信息的传输介质,诸如大容量中心局网络或大容量计算机的通信或传输,扫描激光雷达系统或雷达系统的连接,医学上各种激光治疗机中的光传输等等。

从表2可以看出,纤维光通信具有很多优点。

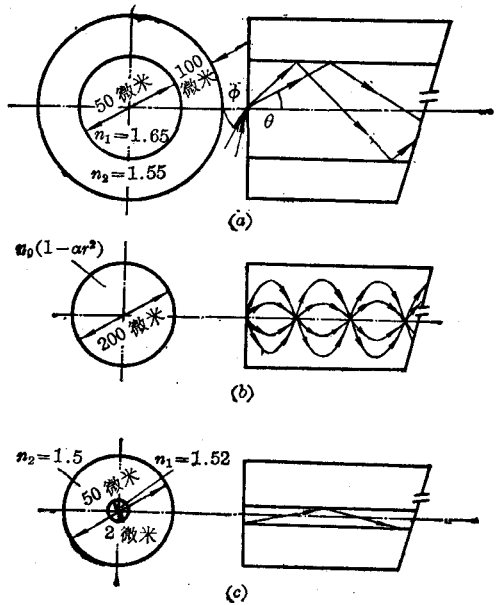


图1 典型的纤维结构
(a) 多模 (b) 自聚焦 (c) 单模

表2 同轴电缆和激光光缆的比较

物 性	同 轴 电 缆	激 光 光 缆	附 注
直径(毫米)	9.5	0.05~0.3	最低已达0.85分贝/公里 已有20公里间距的
弯曲半径(毫米)	>50	>5~10	
衰减(分贝/公里)	19(60兆周)	2~8	
中继器距离(公里)	1.5(60兆周)	5	
容量/单位断面	1	100~10000	
重量/单位容量	1	1/5~1/100	

三、纤维的基本特性

1. 纤维的类型

目前,主要有两种不同类型的圆柱形纤维。一种是折射率呈台阶状变化的纤维,具有一定折射率的芯和较低折射率的套层。另一种是折射率呈梯度状变化的纤维,轴心有较高的折射率,向四周按抛物线规律连续地减少。

二种纤维的折射率变化情况示于图2。

下列参数可用来表征折射率呈台阶状变化的圆柱体波导:

$$V = \frac{2\sqrt{2}\pi r}{\lambda} (\bar{n} \cdot \Delta n)^{1/2} \quad (1)$$

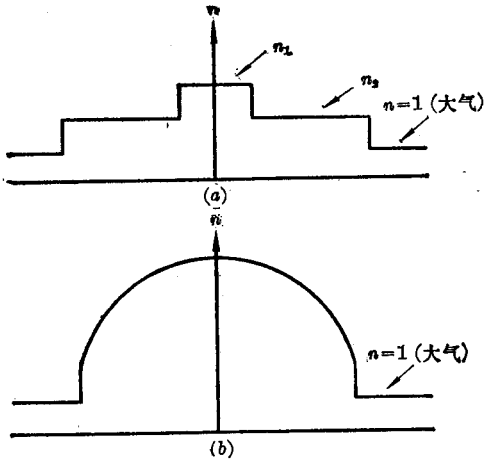


图2 光纤的折射率分布
(a) 套层型纤维 (b) 自聚焦型纤维

式中: r 为波导的芯半径; λ 为自由空间的波长; \bar{n} 为芯和套层的平均折射率; Δn 为芯和套层的折射率差。

在 $V < 2.4$ 时, 纤维是单模传播, 用 HE_{11} 表示, 因纤维是轴对称的, 所以模是偏振简并的。单模波导的首要优点是通频带宽, 比多模波导要大三个数量级, 可用于大容量系统。

当 $V > 2.4$ 时, 传播模的数量随着 V 值的增大而迅速增加, 近似地可表示为:

$$N \sim \frac{1}{2} V^2 \quad (2)$$

若是多模传播, 每个模以稍许不同的群速度行进。短脉冲被分裂成一系列的脉冲, 在不同的时间到达波导远端, 到达的时间差由下式表示:

$$\Delta t = \frac{L}{C} (n_1 - n_2) \quad (3)$$

式中: L 为纤维的长度; C 为光在真空中的传播速度。

对于 $n_1 = 1.52$, $n_2 = 1.50$, 即 $\frac{n_1}{n_2} = 1.01$ 的纤维来说, 若 L 为 1 公里, 那么, 最快和最慢的模到达远端的时间差 Δt 为 50 毫微秒, 信息传播速度为 33 兆位/秒。 L 更长时, 传播速度下降。 Δt 值大体上可看作是所检测到的脉冲宽度, 多模波导的脉冲宽度随着纤维的长度而线性增加。单模波导的脉冲扩展不能用上式表示, 它的信息畸变是由纤维材料的散射和光源的频谱宽度决定的。但是, 在带宽很小时, 这些效应比多模色散小得多。对于频带宽度近于 40 毫微秒的发光二极管, 窄脉冲宽度扩展约 4 毫微秒/公里, 砷化镓注入激光器扩展约达 0.1 毫微秒/公里, 而掺铈钇铝石榴石激光器则为 0.01 毫微秒/公里。单模纤维的信息传播速度在用相干光源时可达 10^{11} 兆位/秒, 已接近于理论极限值。

折射率连续变化的波导(梯度状波导), 其折射率变化形式如下:

$$n = n_0 \operatorname{sech} \rho \cdot r \quad (4)$$

式中: n_0 为纤维轴的折射率; ρ 为与焦距有关的径向变化常数。

这类自聚焦型的纤维, 若使纤维足够细或使 ρ 足够小, 也能制成单模纤维。多模自聚焦波导同较简单的多模套层型波导相比较, 其首要的优点是在于信息传输的畸变极小, 因此能传输相位信息。脉冲传到纤维长为 L 的末端时的宽度近似为:

$$\Delta t = \frac{L}{2C} n_0 \rho^2 \quad (5)$$

为了便于对照, 我们取 $n_0 = 1.5$, $\rho = 0.01$, 这相当于上述 $\frac{n_1}{n_2} = 1.01$ 的折射率呈台阶状变化的波导, 脉冲扩展 Δt , 这时仅为 0.25 毫微秒, 而上面看到相应的台阶状波导则为 50 毫微秒。从信息畸变的角度考虑, 折射率呈抛物线变化的纤维显然是优越的。

2. 纤维的损耗

玻璃材料的衰减包括吸收和散射。吸收主要是三种: 本征、杂质离子和原子缺陷色心。

散射也有三种:本征、玻璃的不均匀性和折射率引起的径向象差。

本征吸收是材料呈“理想”状态下的吸收。通常,玻璃是绝缘介质材料,电子能带很宽,故在光谱的可见光范围是完全透明的。这对大多数的应用来说是正确的,但是由于光波导要求材料的吸收系数较通常的要低三个数量级,故须有更精确的测定。

杂质吸收主要是因为存在诸如铁、钴、铬、镍或铜等过渡离子,在宽的玻璃电子能级中引入附加电子能级以致吸收光量子而引起的。这些离子的吸收在不同的玻璃中由于它们原子价的改变而不同。因其吸收峰很宽,故难以用纤维的吸收光谱关系来鉴定离子的价数。假定吸收是同浓度呈线性关系,则可以外推到低浓度时的吸收值。从各种离子在石英玻璃中的吸收峰研究表明,如果要获得低于20分贝/公里衰减的吸收,杂质离子的浓度需低于十亿万分之几($\sim 10^{-9}$),表3是在波长800毫微米处测得的数据。因此,光导纤维的玻璃纯度相当于电子器件对半导体的纯度要求。

表3 衰减低于20分贝/公里的石英玻璃中允许存在的杂质离子浓度(800毫微米)

离子种类	Fe	Mn	Ni*	Cu*	Cr	V	Co*
允许的含量($\times 10^{-9}$)	425	833	712	2140	33	19	816

* 在有的玻璃系统, Ni 为 20~26, Cu 为 9~50, Co 为 2。

还有一个重要的杂质是以 OH^- 离子形式存在的“水”。在0.725和0.950微米处有很易鉴别的明显吸收峰,它们分别为真空波长2.8微米处羟基的基本振动频率的第三和第四谐波。在石英玻璃中,水在0.950微米波段的吸收引起1.25分贝/公里/ 10^{-6} 重量的衰减。与过渡金属离子的吸收不同,水的吸收不随玻璃的种类不同而改变。

吸收的第三个来源是玻璃结构中的原子缺陷。用辐射研究了石英玻璃中的氧缺陷表明,情况似乎与熔体在氧化条件下玻璃中引入色心相类似。看来离子的氧化状态对玻璃纤维的衰减是极为重要的。

因此,吸收方面首要是考虑过渡金属离子和水所引起的衰减。

玻璃分子的无序分布、热致折射率起伏、玻璃中氧化物组份的浓度起伏等都会引起散射。由分子的无序分布引起的散射称为瑞利散射,它同波长的4次方成反比,因此随着波长减小而非常迅速地增大。这是玻璃材料的衰减下限,所以只有在波长较长的可见光范围和红外范围才能获得极小的衰减。石英玻璃在1微米波长外的瑞利散射衰减是0.8分贝/公里,这是极限值,不能再显著地下降了。

玻璃的其它一些不均匀性,诸如有些组份的分相倾向或析晶,或因熔制时不正确的混合以致造成折射率的变化等,都会引起散射。然而,这同上面讨论的微观热起伏相比,这些不均匀性是属于工艺问题,能够设法避免的。

散射的第三个原因是径向折射率的偏差。对于折射率呈梯度状连续变化的波导来说,这种散射无法同其它不均匀性引起的散射加以区分。对于折射率呈台阶状非连续变化的波导来说,这种散射是由芯—套层界面的粗糙度引起的。

玻璃的色散颇为重要,它限制着通频带宽,使脉冲在波导中传播时扩展,因而限制了脉冲速率和信息通量。通常,单模波导的通频带宽主要是受材料色散的限制,而多模波导是受模的群速度分布的限制。

从上面的讨论,可以认为首先应该从降低材料的衰减和脉冲扩展来选择玻璃系统。

四、玻璃系统

首先应该选择那些能够以适宜的组成熔制成光学均匀的玻璃系统，制成的玻璃不应有任何痕量的分相或会引起光散射的微不均区。同时，由于整个通信系统潜在的需要量很大，更应采用自然界中数量丰富的元素。目前，国际上比较集中地研究了三个组成系统：石英玻璃，钠-钙玻璃和铅硅酸盐玻璃，它们都是较成熟的系统，也都能满足这些要求。

玻璃的本征吸收在重要的波长范围都极低，又以石英玻璃为最低。通常折射率较高的玻璃，吸收也较大。正因为石英玻璃的折射率很低，一般不易制得更低折射率的玻璃来作皮，而是用掺杂的石英玻璃作芯，以石英玻璃作套层。也可以采用氟塑料为套层，以石英玻璃为芯制成石英玻璃纤维。或者用化学气相沉积方法制成低折射率玻璃作石英玻璃芯的套层。

玻璃中过渡金属离子是由原料和纤维制造工艺过程中引入的。因此，减少玻璃中氧化物组份的数目可减少引入杂质的机会。

扩散效应对纤维的径向折射率分布影响很大。对折射率变化呈梯度状的纤维，力求扩散效应尽可能地大，而对折射率呈台阶状变化的纤维则应限制扩散。为此，后者应尽可能避免如碱金属的铯和亚铜等一价离子，因离子的迁移率通常与它们的价数成反比，而前者却是必须依靠这些离子扩散制成的。一价的铯离子对折射率有最大的比效应，通常含铯的玻璃折射率约 1.8，用钾离子交换后，折射率最小的是 1.5 左右。除此之外，还有各种离子的组合。纤维经离子交换后，折射率在轴心处最大，外周最小，是抛物线分布。

在选择玻璃的组成时也应考虑到机械强度，不然纤维太脆，易断。石英玻璃最耐腐蚀，强度也较高。

五、制造工艺

1. 玻璃的熔制

由于光导纤维对纯度的要求很高，应尽可能简化工艺流程，以防止沾污。熔制玻璃时，不仅原料要纯，而且对坩埚也应有相应的要求，因高温熔体会侵蚀坩埚从而影响到组份及纯度。我们认为用单组份的石英玻璃，原料易提纯，以减少杂质引入的机会，所制成的光导纤维可以传输紫外区、可见光区和近红外区的光线，尤其是含羟基量特别低的超纯无水石英玻璃光导纤维的适用波段更宽，但是它的熔制温度很高（接近 2000°C），这样就很难选择合适的坩埚和加热元件。为此，可以采用高频感应等离子体火焰高温新技术作熔制手段，不用坩埚，用高纯度的四氯化硅液体为原料，直接从气相制成超纯无水石英玻璃，达到了很高的光学均匀性。

高频感应等离子体火焰的温度极高，内核温度可达 15000K，平均温度为 4000~5000K，温度梯度很大。由于没有电极的沾污，火焰纯净，可任意选择工作气氛，气流缓和，噪声颇小，是较理想的高温手段。以石英玻璃管制成灯具，插入高频线圈内，灯具中通入氧气或氩气或空气，它们受高频电磁场激励而产生等离子体火焰；其简单的结构示于图 3。

中芯细管可通入粉料或四氯化硅蒸气而进入等离子体火焰，下端用石英玻璃管支持的料台承接制成的石英玻璃。若以水晶粉作原料时，熔制成的石英玻璃料坯的生长速度很快，玻璃的质量取决于加料的均匀性。如果将被四氯化硅蒸气饱和的气流随芯流通过芯管进入等离子

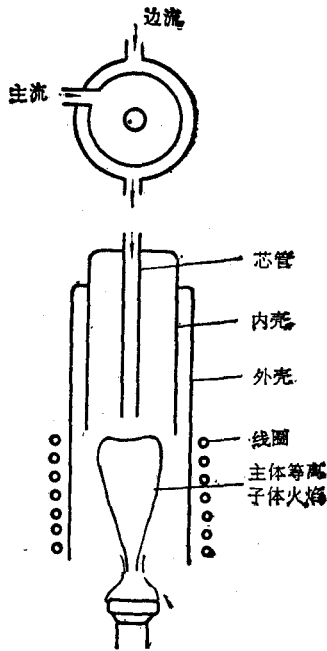


图3 等离子体火焰示意图

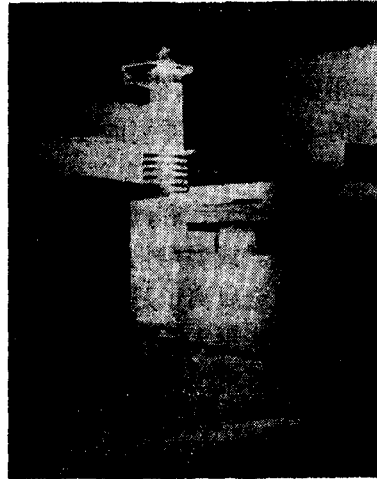


图4 高频等离子体火焰熔制超纯无水石英玻璃

体火焰,在高温火焰中发生下列反应:

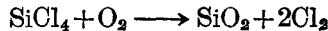


图4所示为高频等离子体火焰熔制超纯无水玻璃的概况。在用四氯化硅作原料时,石英玻璃的生长速度比粉料时慢,通常是2~7毫米/小时。为了提高玻璃的纯度,必须提高四氯化硅和所用工作气体的纯度,并保持环境净洁。这项高温新技术也可以用来熔制其它系统的多组份玻璃,但需将各氧化物组份的原料充分混合均匀。熔制时料面的温度要保持恒定,以免玻璃中产生气泡。

2. 纤维的制备

折射率不连续的多模波导的制造工艺比单模波导简单些。多年来,很多技术已用来生产光导纤维。通常采用两种技术,简称为“双坩埚法”(图5)和“管棒法”(图6)。

“双坩埚法”是将熔融玻璃保持在二个同心坩埚中,内坩埚盛以制芯玻璃料,外坩埚盛以做套层的玻璃料,两个坩埚口同心地放置,因而玻璃流出时已成光导纤维。此法的一个优点是芯—套层的半径比允许有较宽的选择,能拉制适于单模和多模传输的两种光导纤维。“管棒法”则是将同心的玻璃管和玻璃棒在电炉或以气体喷灯加热,在高温下拉成细颈,并保持截面的几何形状,拉成纤维并在安置在下端的转鼓上绕好。纤维的直径与送料速度、拉丝速度及温度有关,管棒的外径之比保持在纤维中。此法的缺点是对管和棒的内外表面加工要求很高,如有缺陷,则会在纤维的芯—套层界面造成不规则性,形成散射损耗。

对圆柱形的纤维,靠表面张力的作用是较易制造的,如要求成直角棱边截面的纤维,拉制时必须很快地通过加热区,以防止表面张力较大而改变形状。严格地讲,拉制后总会带点圆形的。

由于芯很小,单模波导的芯—套层尺寸比例较大,制造工艺较难控制。(1)式指出,因为

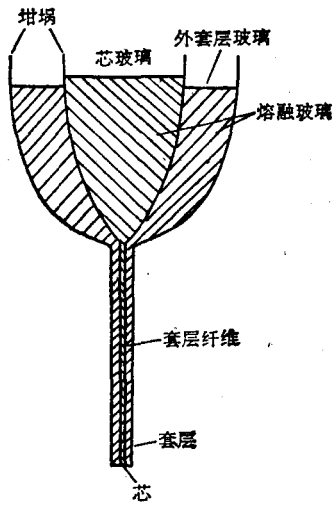


图5 双坩埚法拉丝

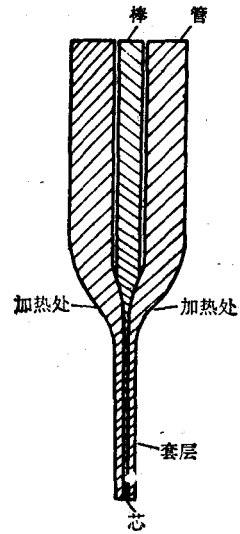


图6 管棒法拉丝

值必须保持在 2 左右, 如果半径 r 增大, Δn 必须减少。然而, 要控制到大约 5×10^{-3} 的 Δn 值显然是困难的。如图 1 中 (c) 所示, 若 $n_2 \sim 1.5$, 工作波长为 800 毫微米和 $V=20$, 则要求 $r \cong 2$ 微米, 而套层需 50 微米, 即芯与套层之比为 25:1。

从图 7 上可看到, 多模和单模光波导的芯—套层的相对尺寸是相差很大的。图 7 中 (a) 是一般的“管棒法”, 以一定尺寸的管棒坯料拉制成套层型多模光波导。由于单模制造时, 若用 2 毫米的棒就需要 50 毫米的管子作为坯料, 制造很麻烦。虽然可用分几步的方法来解决, 但毕竟不便。采用一种如图 7 (b) 所示的新技术——化学气相沉淀法就便当了。在玻璃管内通入需合成预定折射率物质的各种高纯度气体, 诸如 SiCl_4 、 BCl_3 等, 外部在转动状态下以氢氧焰等加热, 则在玻璃内壁沉积出玻璃态薄膜。整个管子经再次加热烧熔, 则中间制成很细的芯, 拉制后即成单模光波导。目前, 化学气相沉淀法不仅能制成单模纤维, 也能制得多模纤维。

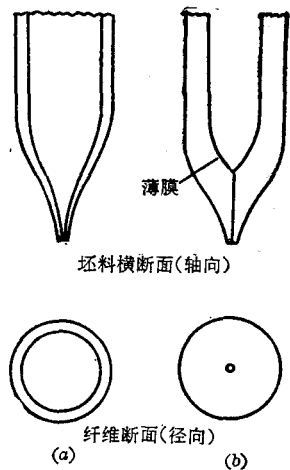


图7 多模和单模光波导的制造工艺

(a) 典型的多模制造工艺, 简称“管棒法”。(b) 用以制造单模的薄膜坯料的技术, 此模能以简单的工艺制成非常小的芯。



图8 纤维的拉制装置

我们先制造一种外敷含氟塑料石英玻璃多模光导纤维。先将高频等离子体火焰熔得的超纯无水石英玻璃坯料,经切割并磨制成圆棒,在我所自行设计和制造的拉丝机上拉制纤维,拉丝速度能连续调节。机器上配置了具有高温发热元件制成的电炉,炉温可达1900°C。拉丝装置示于图8。

将圆棒夹在顶端的送料杆上,自动地以一定的速率通过高温区,拉制成的纤维自己以适宜的速度绕在下端转鼓上,到指定长度后,机器自动停止。为了保持清洁,由此制成的石英玻璃纤维,在工作过程中最好在容器内充以干净气体保护,以便下一步在表面涂敷含氟塑料之前,表面不受沾污。纤维涂敷含氟塑料后,即制成折射率不连续的超纯无水石英玻璃多模光导纤维。

欲获得低衰减的纤维,要求套层玻璃也有相当低的衰减,例如4分贝/公里的波导($V \sim 55$),当所有的传输模式均受激励时,要求套层玻璃损耗小于80分贝/公里。

测定光导纤维损耗(包括吸收和散射)的装置示于图9。我们用直流检测法测纤维的总衰减。在整个测量过程中,为保证数据的准确、可靠和可重复性,不仅要求装置中的元件具有很好的稳定性和精确度,而且还要保持环境净洁,在操作中使被测的纤维或试样的表面不受尘埃等物的沾污,对未包敷的纤维尤其要注意表面清洁。

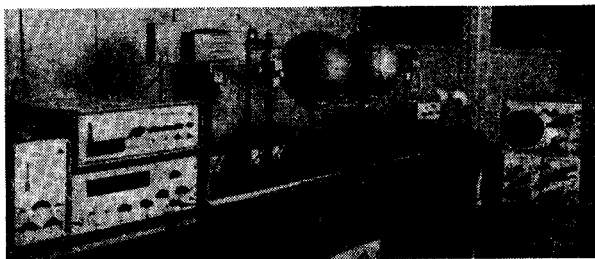


图9 光导纤维总衰减的测定装置

从玻璃块样的衰减(测定装置示于图10),到制成光导纤维的衰减在数量上的变化,可以指导我们在制造工艺中采取有效的措施。我们是用绝对法测定石英玻璃块样的吸收衰减的。

同理,如能进一步精确测定光导纤维的损耗波谱曲线、脉冲扩展、模式传输和纤维—光源的耦合等性能,那就会更有利于提高纤维的质量,推动工作的迅速进展。

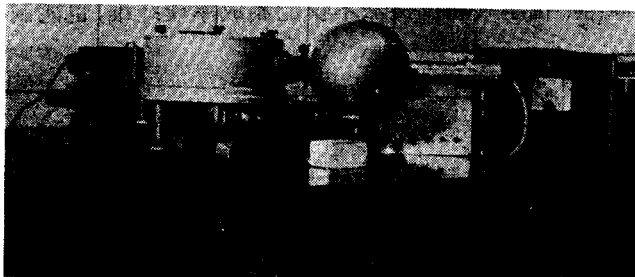


图10 玻璃块样吸收衰减的测定装置

六、结 论

光通信用玻璃纤维的研制进展很快,并推动了用于光通信的微型半导体激光器、发光二极管、雪崩二极管、光调制器和光检测器等电子器件的发展。

几年来,我国在玻璃纤维制造和电子器件方面虽然有了一定的基础,但由于使这项工作能够付诸应用所牵涉的面非常广,因此,必须在党的统一领导下,采取大协作的方式,密切配合,为适应我国社会主义革命和社会主义建设发展的要求,更快发展我国的通信事业。