

激光辐射的生物效应很少受到军事部门的重视，这是国防部研究计划的评论家经常谈及的事实。从合同中可以看出，就给予工业界的投资额而论，对于激光研究的这一特殊领域，迄今仍受忽视。然而，激光研究年度杂类预算的 1/3 弱投入了工业，其最大部分留给内部，特别是所属的两个主要医学单位：美帝空军航空空间医学分部和陆军医学

研究和发展司令部。

由于 1966、1967 财政年度研究预算减少，激光研究的这部分就相当于所有部分中最不重要的部分。还有这种可能：合同团体和医学专家的不断压力，会促使国防部更积极的从事“生物效应”研究。

译自 Marshall R. C., *Microwaves*, 1967 (Mar.),
6, № 3, 121~127

用低损耗的透镜波导管来传输光波

提要：如可用波导管免除大气对激光束的影响，则用激光束可传输巨大的信息量。用透镜型光导管已获得的损耗为 0.5 分贝/千米。

激光器在通讯技术上引起了人们极大的兴趣，因为激光频率传输时的带宽，要比微波频率传输时的带宽大 1,000 倍。但是，如果要和微波竞争，则要使激光传输系统做得比微波系统更经济，同时，也应该存在传送巨大信息量的必要性。激光系统有很宽频带这一特征，在目前的竞争中并不起决定性作用。最近二十年发展起来的毫米波通讯系统对于保证目前的报务工作来说，还是能提供足够的信道容量的。

将来，在需要传输巨大的信息容量时，为了使用激光系统，是需要有一种传输并保护光束的方法的。激光装置在气象条件较差的情况下都不能很好地工作，雾、雨、雪及空气紊流等都会在传输过程中导致损耗。实际上，空气紊流对相干光的影响要比对非相干光的影响大得多，因为它会破坏波前的均匀性，导致信号电平的大幅度变化以及很严重的相位畸变。

激光虽较其他光源的频带窄，因而在接收器中，比可能和它混在一起的环境光易于识别，但也只有在光的传输通路上免除大气

的影响，光波通信系统才可以广泛地应用在远程通信系统中。美帝陆军电子学指挥部的一个实验室制造的一种实验用光学波导管，在 970 米的信号传输过程中，其损耗只有 0.5 分贝/千米。

在过去二十年发展起来的毫米波通讯系统，应用的是横向电波型 TE_{01} ，这种电波型在圆波导管中传播时的损耗很低^[1]。在横向电波型的情形下，电场垂直于传播方向。 TE_{01} 波的损耗随着频率的增高而降低。

低传输损耗

光导管的优点之一，是在传输过程中损失相当低。在美帝蒙默思堡 (Monmouth) 的实验中所得到的损耗为 0.5 分贝/千米，这一数值比毫米波段远距离波导传输线中的损耗低四分之三。除此之外，由于毫米波段圆波导管的制作要求高精度，因此比光学波导管昂贵得多。

与微波相比，光频能获得更宽的频带。因此它们有可能被制成公用电视电话，并为拥挤的射频谱增加电视通道的数目。

将来，可能出现需要把中心计算机的大

量数据远距离传输到各地方站的情况。为了满足这种要求，就需要用到光学波段通讯系统所特有的频带。

有了更宽的频带，就有可能不再需要目前为了充分利用有限带宽而采用的复杂电子学设备。制作通讯设备时，可以允许更大的公差，而不必担心相互间的干扰。同时，还可以降低费用。光学波段通讯系统能否与现有的通讯系统相竞争，主要要看今后几年中相应仪器的发展情况和它的价格。

光学接收机的最大灵敏度与微波接收机相比，至少要低两个数量级。这是因为在光学频率上噪声电平很高的缘故。在带宽和每个转播机输入特性都相同的情况下，光学波段通讯系统的最低工作功率电平应该比毫米波系统高 20~30 分贝。如果转播机输出端的功率相等，那末光学系统转播机之间的通路上的信号衰减应该相应地减少。

缩短转播机间的距离，或采用传输损耗低的光学波导管，便能减小衰减。光学波导管传输的低损耗性（在转播机间的距离超过 30 千米的情况下）足以弥补光学波段接收机灵敏度的不足。甚至在灵敏度相差 30 分贝的情况下，也可得到补偿。

波导管的种类

共有三种型式的波导管：圆管状波导管、表面波导管和束波导管。

在束波导中^[2,3]，毫米波射线场或光波射线场的分布沿轴周期性地重复^[4]（图 1）。目前存在三种形式的束波导管：隔膜式（图 1 中的上图）、透镜式（图 1 中的第 2 图）和反射镜式（图 1 中的下面两个图）^[5]。在隔膜式波导管中场图的重复是由射线束在隔膜孔径上衍射而产生的；透镜波导管是借助于透镜实现（在横截面上的）相位的重新分布的。反射镜式波导管的作用原理和透镜波导管相

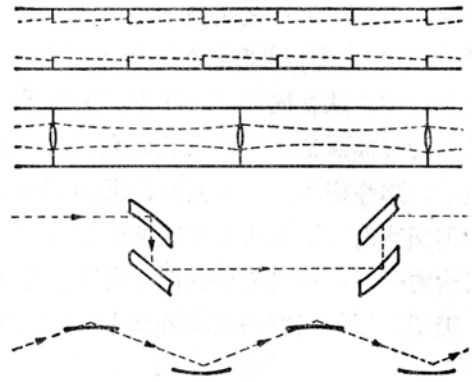


图 1 在束波导管中应用的射线束。其场分布等间隔地、周期性地重复。在隔膜式波导管中（上图），场的重复由光在隔膜孔径中的衍射决定。在透镜波导管中（第二图），重复由等距离安置的透镜来保证。第三图是反射镜式束波导管，号外一种反射镜波导管见最下图。

似，但相位分布的变换与射线束反射是结合起来的。与圆管状波导中满足相互正交性条件的波型系相似，每一种束波导管中都有它的射束系或射束波型系。束波导管中的波型系与气体激光器光学共振腔中的波型相同。远距离传输只意味着在主波型上传输，因为在此种波型上损耗最小。透镜和反射镜波导管横断面上的振幅分布 $E(\rho)$ 近似于高斯分布：

$$E(\rho) = E(O) e^{-p} \left\{ \frac{\rho^2}{2\rho_0^2 \left[1 + \left(\frac{Z}{K\rho_0^2} \right)^2 \right]} \right\}$$

其中， ρ ——径向座标； ρ_0 ——波型参数； Z ——沿传播方向的座标（以两相邻透镜中间的平面为原点）；及 $K = 2\pi/\lambda$ 。波型参数由透镜的焦距和各透镜间的距离 D 来决定：

$$K\rho_0^2 = \sqrt{fD - D^2/4}$$

径向上场的降落很快。图 2 的曲线分别表示包含 50%、90% 和 99.9% 传输功率的场界。等相面是与这些曲线正交的。

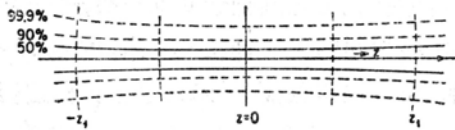


图 2 水平曲线表示束波导中的能量流。左边的数字表示这条能量流曲线以内的光束能量在光束总能量中的百分率。等相面垂直于能流线。因为场相对于 $Z=0$ 的平面的对称分布。 Z_1 处的相前可以变换到和它相似的一 Z_1 处，故场图可从 Z_1 至 $3Z_1$ 重复。

既然径向场的扩展不受限制，因此并不是全部能量都穿过膜孔或透镜。可见，用束波导管进行传输时，伴随有衍射损耗或称为能量“溢出”损耗。在隔膜及透镜波导管中，这一损耗值与孔径面积 A 除以 $\pi\lambda D$ 的关系曲线示于图 3。在透镜波导管中，取 $f=D/2$ 。在这种情况下，对于各透镜间给定的距离和给定的孔径来说，衍射损耗是最小的。曲线是理论计算的结果；而点的数值则是在毫米波段上得到的。为了使隔膜波导管中的衍射损耗与透镜波导管中的相等，隔膜的孔径必须很大，或者隔膜孔径间的距离必须比透镜

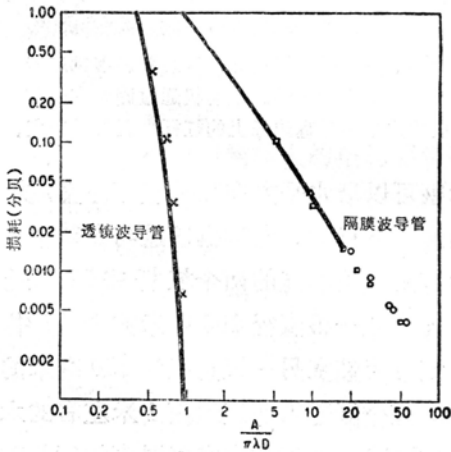


图 3 隔膜波导管和透镜波导管中，衍射损耗(能量“溢出”损耗)与 $A/\pi\lambda D$ 的关系， A 是孔径面积。透镜波导管中，在透镜间距和孔径给定的情况下， $f=D/2$ 时的损耗最小。如用孔径很大的透镜，损耗还有可能减小。

在波导管中的距离短很多。

在束波导管中，衍射损耗不是唯一的损耗方式。透镜波导管中，沿长度周期地分布的损耗实际上仅由透镜系统固有的吸收、反射及散射来决定。在反射镜波导管中，损耗主要是由反射镜的吸收和散射引起的。如果隔膜、透镜、反射镜相对于光轴没有足够精确地对准，那末损耗的数值会增大。

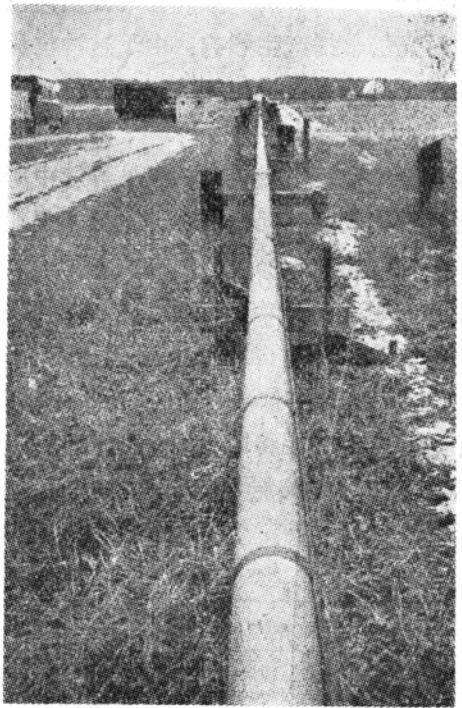


图 4 在长 1 千米的实验用光束波导管中，透镜间距约为 100 米，用波长为 0.6328 微米的氩-氟气体激光器作光源。光束在用木架支撑的直径为 100 毫米的铝管中通过。

这三种类型的束波导管都可以设计成适当的尺寸，在光学波段上传输能量。光学波段隔膜波导的特性还不能计算出来，因为缺乏关于调整所需精度的数据。反射镜波导管对于反射镜的倾斜或扭转非常敏感，因为这种倾斜或扭转会改变反射光束的方向。由于这一原因，看来反射镜波导管不适合于传输光频能量。

透镜的位移

与反射镜波导管不同，透镜波导的特征实际上并不取决于它与透镜的倾斜。在分布图重复时，位相的变换会使场的中心部分相对于光束的边缘部分延迟一个波长。因此，在位相变换过程中，透镜倾斜几度事实上不会引起畸变。如果透镜沿光轴的随机位移没有达到它们之间距离的一定百分比，这种位移也不会产生任何影响。只有在透镜横向位移时才对光的传播产生影响：由于这种位移，被偏转了的光束会按曲折的路线传播。图5表示 $f=D/2$ 时这种曲线的情况。光束的横向偏折会增加衍射损耗。如果波导管中所有的透镜都偏离光轴同样大小 S ，那末损耗的增长数值可用文献 [6] 中的方法求得。假定透镜的间距为 100 米，焦距为 50 米，则所求的每个透镜上的衍射损耗将增加 $1.74S^2$ 分贝， S 的单位为毫米。当 $S=0.1$ 毫米时，每个透镜上的损耗将增加约 0.017 分贝，或者说在 1 千米的波导上损耗增加 0.17 分贝。

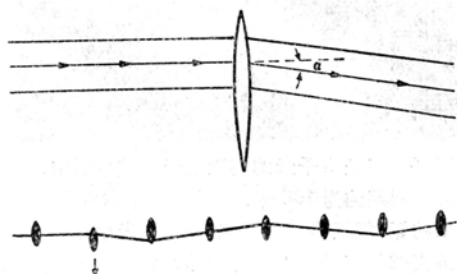


图 5 在透镜型波导管中，透镜的横向位移（上图）会导致光束按曲折的路线前进（下图），这样就引起了衍射损耗的增加。在透镜束波导管中损耗可以低于 0.5 分贝/千米。

光学透镜的制作工艺已改进到这种程度，以致可使每个透镜中的总损耗低于 0.05 分贝。因此，在透镜间距为 100 米，校正精确度为 ± 0.1 毫米时（这一精确度不难得到，但要维持长时间也较困难），透镜式束波导管

中的传输损耗可达到低于 0.5 分贝/千米^[7]。

实验中用的波导管长 970 米，内装 10 个透镜、每个透镜相隔 97 米。透镜的焦距约为 50 米。第一个和最末一个透镜距离波导管端面都是 48.5 米。用工作波长为 0.6328 微米的氦-氖混合气体激光器作光源。光束的波型参数等于 2.2 毫米。透镜平面上光斑（包含总功率通量的 99.9%）的半径为 8.2 毫米，透镜孔径的半径为 11.3 毫米。为了使调节手续简易化，对透镜的横向位移进行遥控调节。透镜位置的调节装置示于图 6。

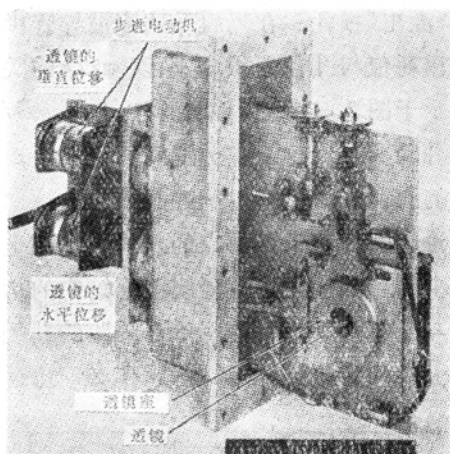


图 6 遥调透镜位置的操作装置。透镜座能水平和垂直的移动。电动机通过固定在安装板的水平和垂直边缘上的杠杆来调节透镜座。

透镜座可以沿水平方向和垂直（竖直）方向左右或上下移动。电动机通过与安装板的水平边和垂直边相连的两个杠杆来调节透镜座。光束在一根直径 100 毫米的铝管中穿过，该铝管装在另一根直径为 150 毫米的铝管中。整个管道架在距地面 1 米左右的木架上（见图 4）。由管道中空气温度梯度的改变而引起的光束偏斜，会导致输出信号的起伏，为避免此效应，需将光学管道中的大气压力降低到几个毫巴。在此波导管中，被测得的传输总损耗为 1 分贝。这个损耗将近一

半是由于激光束的波型不同于波导管的主波型而造成的。透镜的调整量比预想的小得多。因为透镜的孔径直径要比光场图重复所要求的孔径直径大几个毫米，同时，在整个波导管中总共只用了十个透镜，故由于调整偏差，在每个透镜上的光束横向偏折可达0.5毫米，但是，这个横向偏折并不会使光束偏出透镜的孔径范围，也不会明显地使衍射损耗提高。

低的损耗

有些透镜在一些窄频带中的总损耗不超过1%。此外还可制备具有宽频带反射涂层的透镜。此种透镜的损耗稍高于1%，但尚无货出售。对场图的两个重复点之间的管道部分提出的唯一要求在于使它的直径足够大，不要阻碍光的通过，甚至在由于地面沉降而导致管道弯曲时也无妨碍。透镜应安装在坚硬的座架上。它们的水平位置应调准在十分之几毫米的精度内。但是在一段长时期内，地面会有很大的变动，其值比十分之几毫米还要大。因此必须设计一种透镜微调的伺服机构。若采用由固定透镜对和可调透镜对交替组成的透镜系统，此种调节可以获得成功(图7)。每对固定的透镜都有自己的光轴(图7中的AA'或BB')。这些光轴的方向可能随着时间而改变。适当地移动透镜3和4，使由透镜1、2沿光轴AA'来的光束折向固定透镜5和6，调整透镜3和4的数据是根据光束中心对透镜5和6的中心的

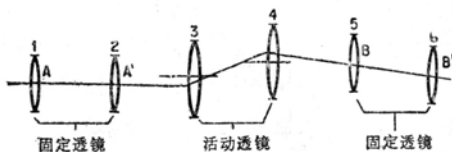


图7 在透镜束波导管中，可以实现活动透镜的自动调整，使光束的路线适合固定透镜的位置。用光电传感器来控制这种移动。

偏离程度而得到的。透镜5和6的中心则可由这些透镜周围的衍射耗损(“溢出”耗损)的角向强度分布推出。例如，如果在透镜6所在的平面上光束的中心高于透镜的中心，那末应该把透镜3往上移一下。在透镜的焦距等于两透镜间距离的一半的条件下，这种位移对光束穿过透镜5没有什么影响。如果光束在穿过透镜5时过高，就应把透镜4调低一些。在这种情况下，在透镜6上的光束中心不会移动。换句话说，每一个活动透镜仅仅按照配置在固定透镜周围的一些传感器之一的数据来调节。当然，活动透镜的孔径应该是相当大的，这是为了当光束不从中心穿过时，使衍射损耗不至显著增加。

束波导管不能弯成光滑曲线的形状。但这不算缺点，因为在束波导管中非常容易急剧改变方向。TE₀₁波的无线电波导管则相反，要改变方向是一件相当困难的事情。大角度转向时，用光学反射镜，较小角度转向时，用玻璃棱镜，很小角度的转向就用透镜的横向位移法来完成(如图7)。

透镜间的距离不一定要相等。如果两透镜的间距改变，那末焦距也应相应地改变。这样，透镜束波导管就可以在任何地形上应用。

多路光通道

如果将透镜束波导管的造价稍加提高，就可供几路光通道平行地传输信号。

例如，设想七个透镜中的任何一个都能重复七个平行光束中的一个场图。其中的一个通道(讯道)可用来传输能在垂直于光轴的平面(平面xy)上自动调节透镜位置的引导讯号。利用重力可使y轴保持在垂直方向。只要透镜对y轴的旋转不超过±5°，就不影响信号的传输。所有的通道可以在同一频率上工作，因为若一个通道的讯号由于透镜的衍射“溢出”而折向相邻通道，就必然会偏斜

至管壁，因此不能在其他通道上传输。

气体透镜

在光学波段中，折射率的轻微改变能引起位相的变化，这种变化达 2π 弧度。因此，在透镜束波导管中可用气体透镜来实现位相改变。气体中，可用温度扩散或混合气体扩散的方法来达到透镜的效果。在此种气体透镜中，实际上不存在反射或吸收损耗。贝耳电话实验室作了有关气体透镜的实验^[8]。图

8以简图的形式说明了具有温度梯度的气体透镜，它由直径6.35毫米的金属热管组成，冷气体在管内通过。靠近热壁的地方气体密度较小，因此产生良好的透镜作用。金属加热管的长度为178毫米，温度为 100°C 。注入热管的气体温度是 23.3°C 。在此种透镜中，由于重力的作用引起温度分布的变化，使在垂直面上产生一些象差。

气体透镜是否能在束波导中找到实践上

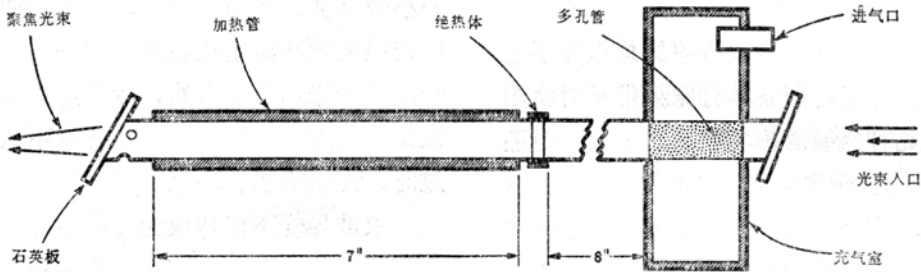


图8 用于透镜束波导管的气体透镜装置图。位相由气体折射系数的改变来校正。注入加热管的冷气体，在热壁处的密度比管轴附近的密度小。这种差异产生透镜作用。

的应用，现在还不太清楚。在玻璃透镜实验中，迫使波导管抽真空的不可控制的扩散多半也会在气体透镜波导管中产生。

其他类型的波导管

研究过的其他两类波导管是管状波导管和表面波导管。管状波导管一般应用于微波传输。如果传输在低损耗的 TE_{01} 波上进行，则此种波导管的直径由小于1个波长（主波型的传输）至大于10个波长。正如超高频信号传输时那样，为了传输所要求的振荡波型

（具有极小损耗），需要正确选择波导接头和波导形状。光波段的波导直径，如果用波长作单位，那末从工艺观点出发，至少需要比超高频波导的直径大两个数量级。马卡提利（E. A. J. Marcatali）和什麦耳译（R. A. Schmeltzer）对光波在管中的传播作了理论上的研究，此种管的直径比波长大得多^[9]。

除直接靠近管壁的部分外，在这样大的直径下，波导中不同振荡波型的场分布，对于管材料的依赖性不大。图9举出几种振荡

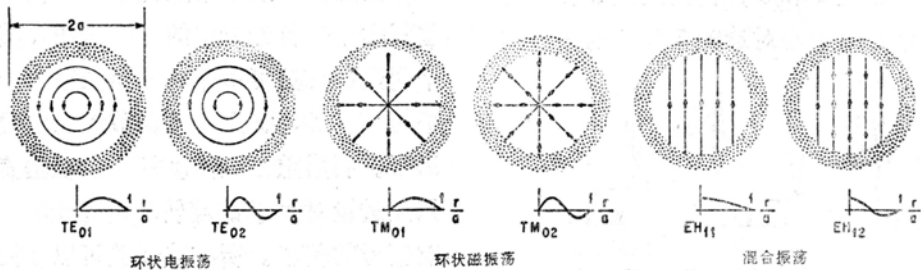


图9 在管状波导管中几种振荡波型的场图。这种波导管的直径为波长的许多倍。传播时衰减最小的振荡波型由管的材料决定。在玻璃管中，对光频而言， EH_{11} 型振荡具有最小的衰减性质。而在铝管中，则以 TE_{01} 模的衰减为最小。

波型在波导横截面上的场分布；这里， a ——管的半径， r ——离轴的径向距离。除了电力线或磁力线为圆形的那些振荡波型外，其他的振荡大多数是混合型的，也就是EH波型。混合振荡具有电场和磁场的纵向分量，但比起横向分量来，这些分量就显得很小了。渗入管壁的场或者被壁吸收，或者被覆盖在管表面的吸收层吸收。管的外表面是不应该产生反射的。

在纯介质的管中，衰减与自由空间中的波长 λ 的平方成正比，而与管的半径 a 的立方成反比。在折射系数为1.5的玻璃管中，EH₁₁型振荡的衰减最小。在一般情况下，波长为1微米、半径为1毫米时，损耗为1.85分贝/千米。

在铝管中TE₀₁型振荡的损耗最小。因为铝的折射率是复数，与频率有关，损耗与管的半径及波长间的关系比较复杂。如果 $\lambda=1$ 微米， $a=0.25$ 毫米，损耗为1.8分贝/千米。

上面所举的那些数字是对具有光学精度的内表面及笔直的管而言的。如果管子是弯曲的，那末损耗肯定会增加。管的半径越大，由弯曲所造成的损耗也就越大。例如，对于半径为1毫米的玻璃管，若其曲率半径为10公里，则损耗加倍。因此，玻璃管不适于光频的远距离传输。在半径为0.25毫米的铝管中，曲率半径到48米时，损耗加倍。这一数值与前一种管子比较，是完全能够被接受的。此外，能在铝管中很清楚地分辨各种振荡波型。半径为0.25毫米的管中，在TE₀₂波型上的损耗是6.05分贝/千米，EH₁₁和TM₀₁波型上的损耗分别为57分贝/千米和145分贝/千米。因此，在此种光学波导管中，由振荡波型转换而引起的位相畸变是不存在的。在毫米波传输中此种畸变带来了极

大的困难。

管中的传输

依格耳斯菲耳德(C. C. Eaglesfield)^[10]研究了管中多波型光学传输的临界情况，用于传输的波型相当多，以至不利于把它们做单模分析。他观察了直径25毫米，抛光并镀银内表面的管子，测定了入射光束的衰减和延迟量。射束场以它们的振幅的平方相加。具有不同传播角 α 的光束(对管的轴线而言)，它们的衰减和传播时间都不相同。当电场平行于管壁时， $\lambda=5,890$ 埃、传播角 $\alpha \leq 0.5^\circ$ 的光束的衰减小于或等于0.69分贝/千米，当磁场平行于管壁时，衰减小于或等于2.75分贝/千米。设管的曲率半径约为0.8千米，孔径的公差等于0.075毫米，在这样的管中损耗为1.56分贝/千米。由于各光束传输时间不同而引起的位相畸变相当大，甚至可使持续时间相当短的输入脉冲经过16公里传输后变为4~5毫微秒的脉冲。

可以当作光学波导管的表面波导只有一种类型，那就是介质波导管。纤维光学中用这种波导管。在纤维直径很大(10~100微米)时，能同时传播很多波型。由于它们的场差不多充满了整个纤维，因此对最好的材料来说，波长为1微米时，传输损耗为210分贝/千米。为了给低损耗的单模传输创造条件，应把纤维直径减小到波长的十分之一。甚至在纤维直径等于0.3微米的情况下，传输波长为1微米的光时，损耗还达到20分贝/千米。因为在此种情况下差不多全部光场都集中在纤维内部，所以，很难在不破坏场图的情况下保证机械加固。解决的方法之一是将纤维用折射率比它小的一层材料包起来。但这时，表面波的场会跑到包裹层里，因此损耗又会提高到每千米几百分贝。

在薄膜结构上的试验

为了避免机械加固方面的困难,卡鲍威克(A. E. Karbowaik)^[11]建议用薄膜来代替纤维,并称之为微型光学波导管。图10示出其最简单的一种形式。看来,还未用此种结构在光频上尝试过。薄膜固定在小框AA'上,借光束将能量导入薄膜B,并沿薄膜传播。光束的偏振方向垂直于薄膜。薄膜的厚度等于波长的十分之几,宽约1厘米。在薄膜中传播的波型实际可以说成是平面表面波,波的场对称于薄膜的中间平面,在薄膜的平面中光束展宽。因此,除吸收损耗外还有振幅沿薄膜的减小,此种减小近似地遵守平面场的辐射规律。

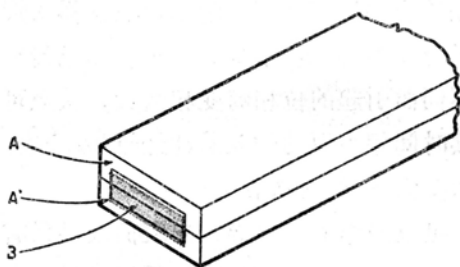


图10 设计微型光学波导管的一个想法。它是由厚度等于十分之几波长的薄膜B制成的。用在膜面法向上偏振的光束来激励波导管。这一结构只在毫米波段作过试验,还没有在光频上试过。

图11例举了从0.6到2微米的波长上,吸收损耗与薄膜厚度的依赖关系。为使波长为1微米时的损耗等于2分贝/千米,应使薄膜的厚度(在折射率等于1.6、损耗系数为 10^{-8} 的条件下)保持在0.04微米。目前,还不能成批生产此种厚度的均匀薄膜。

因为在制造过程中要求很高的精确度,故要制造低损耗、只在一种振荡波型上工作

的管状波导管及介质波导管非常困难。要在目前的技术水平上制造此种波导管未必可能。对于振荡波型很多的光学波导管^[10]来

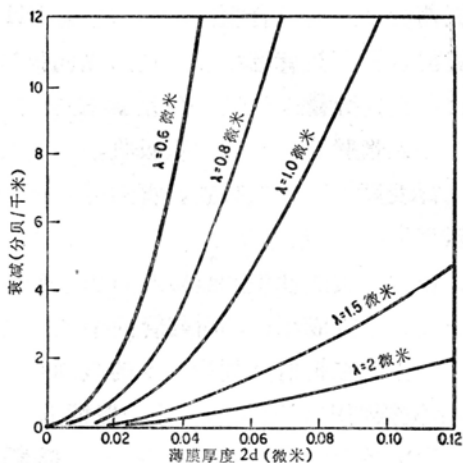


图11 微型光学波导管中,吸收损耗(列举了0.6微米~2微米的几个波长)依赖于薄膜厚度的理论曲线。为使波长为1微米时损耗等于2分贝/千米,则薄膜的厚度应为0.04微米。

说,精确度的要求并不高,但此种结构会产生相位失真,因此,大家对它的兴趣不大。在制造过程中,对精确度要求不高而技术水平又较完善的,还是带固体透镜的束波导管。此种波导管也是唯一的、在光频上传输时损耗低于0.5分贝/千米的波导管。现有的技术水平也保证能生产这种透镜型束波导中的有效的光学波段传输系统。但欲估价在生产此种装置时的投资,首先还得进行几项补充研究。

同时,波导管只是通讯系统中的一个组成部分。要建立完善的光频通讯系统,必须预先制备有效的光调制器和放大器。

参考文献(略)

译自 *Electronics*, 1966, (May 16), 39, №10, 83-89