

浅谈光学纤维

司德平

(平顶山市一中 河南 467001)

杜留记

(平顶山工学院土木工程系 河南 467001)

1. 光学纤维的发展简史

光学纤维又称光导纤维,简称光纤。它是利用全反射规律而使光线沿着弯曲路径传播的光学元件。光学纤维的发展,大致可分为三个阶段。

1.1 早期发展阶段

1870年,英国的丁达尔首先通过实验观察到光线沿弯曲水柱传播的现象。1929年美国的哈塞尔,1930年德国的拉姆,先后都制成了石英纤维,并在短距离内观察到了光线和图像经过石英纤维传输的现象,但由于光学纤维质量较差,没有什么实际应用。

1.2 蓬勃发展阶段

1953年,荷兰的范希尔和美国的卡帕尼首先制成了玻璃(芯)—塑料(涂层)光学纤维。1955年,美国的希斯肖威兹制成了玻璃(芯)—玻璃(涂层)光学纤维,初步解决了光学绝缘问题,为光学纤维的发展打下了良好的基础。1956年正式提出“纤维光学”一词,初步讨论了光在光学纤维中的传输及其应用。1958年,卡帕尼利用拉制复合纤维的工艺制做了高分辨率的光学纤维面板;1960年,又采用排列工艺制做了光学纤维传像束,并成功地应用于医疗器械中。微通道板也于1961年问世。

1.3 新发展阶段

随着激光通信的发展,一种新的通信介质——光学纤维波导就迅速地发展起来。1970年,美国科宁玻璃公司首先制成了世界上第一根低损耗光学纤维(20dB/Km)。1972年,美国贝尔实验室发展了制做低损耗光学纤维的新工艺——化学气相沉积(CVD)法。从此出现了低损耗光学纤维波导研究的新阶段。另一方面,1964年,日本的西泽和佐佐木提出了一种新型的光学纤维——变折射率(渐变型)光学纤维,有聚光、成像的作用。此外,自从1977年正式提出光学纤维传感器以来,由于它具有灵敏度高、机动性大、抗电磁干扰、工艺简单的优点,光学纤维传感器发展很快。同时,随着激光通信和空间科学的发展,红外光学纤维和塑料光学纤维也有很大

的发展。从20世纪60年代开始,光学纤维的制造已从实验室进入工业生产,随着有关基础理论和工艺的不断发展和完善,对光学纤维的性质和应用的研究已发展成为当代一个重要的科技领域——纤维光学。

1962年,我国在光学专家龚祖同教授的组织和指导下,西安光机所、北京玻璃所和北京建材院同时开展了光学纤维的研究。1972年,西安光机所首先开展了变折射率光学纤维的研究。低损耗、低色散的光学纤维已在北京、上海、武汉、西安等许多单位研制成功,且已投入生产;我国冶金企业第一条长距离光纤传输彩色电视线路已在首钢铺设成功;石英多芯型传像光学纤维研制成功,我国第一条光纤通信生产线已在天津投产。我国与美、日等国的差距正逐步缩小。目前,我国的光纤技术已基本形成了完整的工业体系。

2. 光学纤维的分类

随着光学纤维的广泛应用,对光学纤维就有许多特殊的要求,因而就出现了许多不同类型和不同性能的光学纤维。按材料分,有玻璃光学纤维、塑料光学纤维和液芯光学纤维3种;按折射率分布形式分,有阶跃型光学纤维、渐变型光学纤维两种;按使用波段分,除在可见光波段使用的光学纤维外,还有红外光学纤维和紫外光学纤维;按传输模的数目分,有单模光学纤维和多模光学纤维两种。此外,还有激活光学纤维、发光光学纤维和耐辐照光学纤维等。在这里仅简单介绍玻璃光学纤维中常见的阶跃型光学纤维和渐变型光学纤维。

2.1 阶跃型光学纤维(或反射型光学纤维)

如图1所示,阶跃型光学纤维由具有折射率为 n_1 的均匀纤芯和折射率为 n_2 ($n_2 < n_1$)的均匀涂层组成,其中 $n_1 \approx 1.8$, $n_2 \approx 1.4$ 。即在纤芯和涂层的界面上,介质的折射率发生了跃变。与光纤的中心轴线相交的一些子午光线,从圆柱形的光纤端面射入,经过多次内全反射,沿着锯齿形的路径从另一端射出。

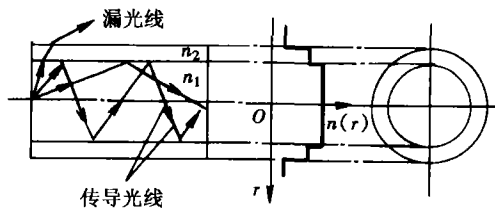


图 1

2.2 渐变型光学纤维(或折射型光学纤维)

如图 2 所示,渐变型光学纤维芯的折射率不是均匀的,而是从中心轴向四周沿径向梯度减小,这种折射率分布称为径向梯度折射率分布。即其折射率在横断面上沿半径方向连续变化,中心轴线处折射率最大,沿半径向外逐渐减小。在光学纤维内部,子午光线传播的径迹总是周期性地向中心轴线方向弯曲的曲线,并被约束在光学纤维内部一定的范围内。渐变型光学纤维具有光能损失少,光程短,光透过率高等优点。

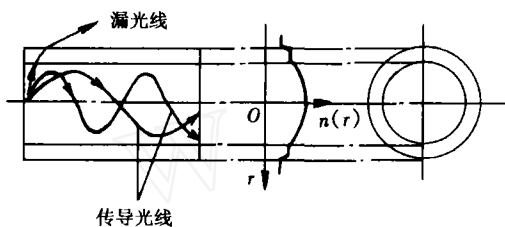


图 2

3. 光学纤维传光、传像的基本原理

3.1 传光的基本原理

由于光学纤维是一种直径约为 $5 \sim 10\mu\text{m}$ 、带有涂层的透明介质丝,通常由玻璃(芯)—玻璃(涂层)、或玻璃(芯)—塑料(涂层)及塑料(芯)—塑料(涂层)组成,而且要求芯的折射率 n_1 必须大于涂层的折射率 n_2 ,芯和涂层之间有良好的光学接触,可以形成良好的光学界面。因此,只要选取适当的入射角,总可以使折射光线在界面上的入射角大于全反射的临界角。这样,光线将在界面上发生多次的内全反射,由光纤另一端射出。可见,光学纤维传光是利用全反射的原理。

3.2 传像的基本原理

如果用大量的光学纤维集成一束,不仅能传光,而且还能传送图像。光学纤维传像的基本原理基于以下 4 点:

(1) 在理想情况下,每根光学纤维都有良好的光学绝缘,都能独立地传光。

15 卷 2 期(总 86 期)

(2) 光学纤维束中的每根光纤,其端面都可以看作为一个取样孔,在传像过程中都能独立地传输一个像元。像元的大小和光学纤维的取样孔径相等。

(3) 光学纤维束的两端(中间部分除外)必须是相关排列、一一对应的。即每根光纤在入射端面和出射端面的几何位置应当是完全一样的。通常纤维束规则排列成正方形或正六边形。

(4) 光线在光学纤维中的入射角和出射角应当是量值相等,符号视内全反射次数的奇偶而定。当次数为奇数时,取“+”号;当次数为偶数时,取“-”号。

由于光学纤维有上述特点,当一个图像入射在光学纤维的端面上时,该图像就能被光学纤维束传输到光纤的另一端,而保持图像的形状不变。

4. 光学纤维的数值孔径

如图 3 所示,在阶跃型光学纤维中,单箭头线是一条临界子午光线,它在芯与涂层界面上的入射角恰等于全反射的临界角 A 。显然,在折射率为 n_0 的介质中,入射角大于 i_0 的那些光线(以双箭头表示),在界面上的入射角就小于 A 。则其折射光线由界面射出(漏光线),而不能传到光纤另一端。只有在介质 n_0 中其顶角等于 $2i_0$ 的空间锥体内的全部光线才能在光纤中传播,根据临界角定义 $\sin A = n_2/n_1$ 和折射定律 $n_0 \sin i_0 = n_1 \sin i_1$ 可得

$$n_0 \sin i_0 = n_1 \sin(90^\circ - A) = n_1 \cos A = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 A} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

对于空气中的光纤, $n_0 = 1$

于是

$$\sin i_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$i_0 = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

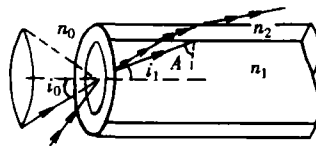


图 3

可见, i_0 只取决于纤芯和涂层的折射率,而与光纤的粗细无关,因此,制造时可以使光学纤维的截面积很小,变得柔软可以弯曲。另外,对于一定的 n_1 和 n_2 ,角 i_0 的值是一定的,因而光纤所能容许传播的那些光线所占的范围是一定的。为了使更大范围内的光束能在光纤中传播,我们应选择 n_1 与 n_2

的差值较大的材料。例如在以熔融石英为基质材料的高硅玻璃光学纤维中,掺杂少量硼、磷、锗可以降低或增加折射率,以形成芯和涂层材料之间的折射率差。通常把 $n_0 \sin i_0$ 的值叫做光学纤维的数值孔径,用 N.A. 表示。数值孔径是表征光学纤维聚光能力大小的物理量。光学纤维数值孔径可能值的范围仅由纤芯和涂层材料的折射率确定。

对于直圆柱阶跃型光学纤维,凡是入射角小于 i_0 的子午入射光线都将经过多次内全反射从一端传到另一端。如果上述光学纤维弯曲,一些光线在芯和涂层界面上入射角可能小于临界角,则相应的光线将透过界面漏掉,而不能继续传送。子午光线在弯曲光学纤维中传输的数值孔径为

$$N.A._{\text{弯}} = \{n_1^2 - n_2^2 [1 + d/R + (d/R)^2]\}^{1/2}$$

式中 d 为光学纤维的直径, R 为曲率半径。可见,弯曲的光学纤维的数值孔径小于直圆柱光学纤维(相当于 $R \rightarrow \infty$ 的情况)的数值孔径。图 4 给出了某一种弯曲的光学纤维的孔径角 θ_m 与 R/d 的关系曲线。由图可知,当 R/d 小于某一值时,孔径角 θ_m 随弯曲半径的减小而急剧减小。实践证明,只要光学纤维弯曲的曲率半径大于光纤丝的断面半径 10 倍以上,且光纤透明度良好、均匀、内壁光滑,就可以构成光导管,漏光并不严重。

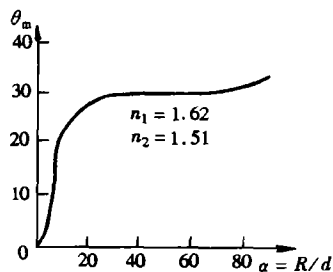


图 4

5. 直圆柱阶跃型光学纤维中临界子午光线的传播时间

在图 3 中,临界子午光线在直圆柱阶跃型光学纤维中的传播速度为

$$V = c/n_1 \quad (1)$$

在图 5 中,按照速度矢量的分解,该临界子午光线在光纤中心轴线方向的传播速度为

$$V_x = V \sin A \quad (2)$$

又由临界角的定义得

$$\sin A = n_2/n_1 \quad (3)$$

则由①、②、③式可知临界子午光线在长为 L 的直

圆柱阶跃型光学纤维中的传播时间为 $t = Ln_1^2/cn_2$, 由于光速 c 很大,因此临界子午光线在该光纤中的传播时间十分短暂。

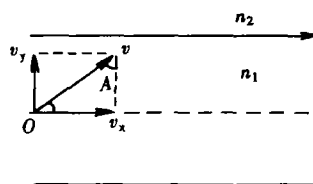


图 5

6. 光学纤维的主要应用

6.1 分叉传光束

分叉传光束一端为若干根普通传光束,另一端集结在一起。它可将同一光源发出的光分配到几个需要照明的地方,这样可以减少使用光源的数目,提高照明的可靠性。汽车尾灯和各指示盘所需照明光就可用该法来实现。

6.2 光纤内窥镜

光学纤维结构简单,柔软方便,可制作光纤内窥镜,应用于潜望镜和内窥视系统。在工业上可以深入人眼所观察不到或有损于人体健康的地方。国防上可以制成各种坦克、飞机或舰艇上的潜望镜。医学上可以制作对胃、食道、膀胱等内腔部位进行检查和诊断的各类医用窥镜。如果配有大功率激光传输的光学纤维,还可进行内腔激光治疗。

6.3 光纤通信

光波是一种电磁波,它像无线电波那样也能用来传递信息。载有声音、图像及各种数字信号的激光从光纤的一端输入,就可以沿光纤很快传到千里以外的另一端,实现光纤通信。光纤通信与电通信相比具有许多优点,诸如抗电磁干扰、频带宽、通信容量大、保密性好、耐腐蚀、不怕潮湿、弯曲方便、制作原材料 SiO_2 资源丰富、节省金属、设备轻等。早在 1999 年北京有线电视台就在北京全市范围内铺设了有线电视光缆。目前我国已经基本建成全国性的光纤通信网,光纤通信已进入了大规模的实用阶段。

