

喇叭形输入、输出端光导纤维的导光特性

陈 祖 熊*

(上海化工学院)

提 要

本文研究了光通过两端呈喇叭形的光纤的发散角与结构的关系,表明了出射光的发散特性只与出端结构有关,长度较长、锥角较小的端部可获得小的发散角。入端的作用如同一个滤模器,使这种光纤的发散角与入射光的发散角无关。用几何光学解释了这一特性。

Characteristics of light transmission of the optical fiber with tapered input and output ends

Cheng Zhuxiong

(Shanghai Institute of Chemical Engineering)

Abstract

The relationship between divergent angle and structure of the optical fiber with tapered ends for light transmission is discussed. It is shown that the diverging characteristics for the output light are only related to the structure of the output end, and a small divergent angle can be obtained with ends of longer length and smaller conical angle. The input end acts as a mode filter which makes the divergent angle for the optical fiber independent of the divergent angle for the input beam. This feature is explained by the theory of geometric optics.

喇叭形端部的光导纤维用于传输大功率激光^[1,2],可获得很小的出射激光发散度,减少输入、输出端面上激光的功率密度,提高光导纤维端面的破坏阈值。直径有规律地变化的光通讯纤维用来改善多模纤维的延迟特性^[3];短而硬的变直径光纤用于使象放大缩小的光学纤维元件,已有多人研究过^[4,5]。而喇叭形两端这种变直径光纤的结构与传输特性的关系尚未见诸报道。本文的目的是研究它的结构对出射光发散特性的影响。

一、原 理

如变直径光纤的直径 $f(z)$ 在二次全反射长度 $z^p - z^{p-1}$ 中变化很慢,即 $|df(z)/dz| \ll 1$,可导出变直径光纤中子午光与纤维轴的交角 $\theta_1(z)$ 、芯皮界面上的入射角 $\theta_2(z)$ 、最大孔径角 θ_0 的一般式分别为(图1)^[6]:

收稿日期:1979年5月7日。

* 参加本工作的还有尚志伟、陆剑英等同志。

二、实验方法

将长度 1 米左右的二端带喇叭形的单纤维测出其长度方向上的直径变化，端部每隔 5 毫米，中部每隔 10 毫米测一个数值，端部直径 $\phi 2$ 毫米左右，中部直径 $\phi 150 \sim 200$ 微米。纤维剖面形状变化 ($f(z)$) 如图 2。

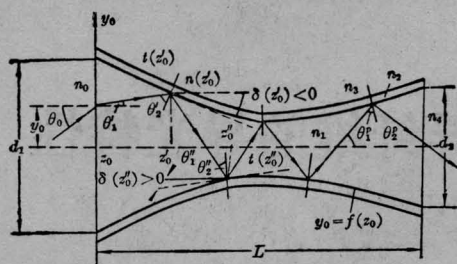


图 1 变直径光纤中的子午光

$$\theta_1(z) = \sin^{-1} \left[\frac{d_1}{2f(z)} \sin \theta_1' \right] \quad (1)$$

$$\theta_2(z) = \cos^{-1} \left[\frac{d_1}{2f(z)} \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_0 \right] - \frac{df(z)}{dz} \quad (2)$$

$$\theta_a(z) = 2 \sin^{-1} \left\{ 2 \frac{n_1}{n_0} \frac{f(z)}{d_1} \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) + \frac{df(z)}{dz} \right] \right\} \quad (3)$$

对侧表面为直线变化的锥形纤维， $f(z) = -z \tan(\beta/2) + d_1/2$ ，当光线从大端射入时； $f(z) = z \tan(\beta/2) + \frac{d_1}{2}$ ，当光从小端射入时。这里 β 为锥形纤维的锥角 ($\beta = 2\alpha$)。代入 (1)

$$\sin \theta_1(z) = \frac{r_1 \sin \theta_1'}{r_1 \pm z \tan \alpha} \quad (4)$$

光从纤维小端传至大端，式 (4) 中用“+”号；反之用“-”号， $r_1 = \frac{d_1}{2}$ 。即当光从纤维大端入射时，在全内反射过程中与纤维轴的夹角逐渐增大；反之，从纤维小端入射时，光与纤维轴之间的夹角逐渐减小。这种夹角的变化与入端直径、锥形纤维的锥角及纤维长度有关，并且 $\sin \theta_2(z) \geq \frac{n_2}{n_1}$ 是进行全内反射的必要条件。

喇叭形输出、输入端光导纤维可以看成光由锥形纤维大端输入，经一段直纤维，再由另一段锥形纤维的小端注入由大端射出，它的导光特性可以根据锥形纤维的导光特性解释。

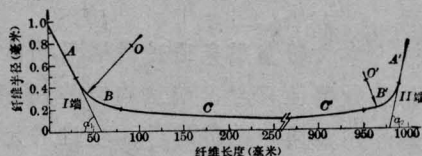


图 2 喇叭形端部导光纤维的纵面图

将纤维端部装入外径 $\phi 15$ 毫米、内径 $\phi 3$ 毫米、长 40 毫米的厚壁玻璃管中，玻璃管的材料与纤维材料成分相近，端面与壁垂直。使纤维在玻璃管二端均位于中心 (图 3)。用松香沥青封固。逐步垂直磨去端面，并抛光，测定纤维端面直径和激光通过此端面出射的发散角。

发散角的测定方法如图 4，测出离纤维出端距离 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 处激光光斑直径 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 ，根据 $d-L$ 图 1 直线的斜率求出激光发散角

$$\tan \alpha = \tan^{-1} \frac{\bar{d} - d}{2L}$$

式中 d 为纤维出端直径。



图 3

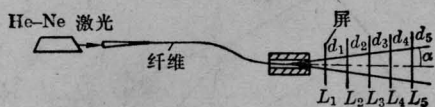


图4 测定出射激光的发散角

三、结 果

1. 纤维的形状

喇叭形端部单纤维的纵剖面形状如图2, 每根纤维二端部形状不同, *I*端的特征是曲线段 *B* 有较大的曲率半径 OB^* , 中间直线段 *C* 有较小的斜率。把端部直线段 *A* 与纤维轴的夹角称为锥角 α 。*II*端与 *I*端相反, $O'B'$ 较小而 *C'* 的斜率较大。

2. 经不同输出端时出射激光的发散角

同一根纤维以 *I*端或 *II*端作为出射端时激光的发散角如表1。由此可见, *I*端出射的激光发散角都小于 *II*端出射的发散角。

表1 不同出射端时激光的发散角

纤维编号	1	2	3	4	5	6	
发 散 角	<i>I</i> 端出射	1°59'	1°16'	37'	1°26'	1°35'	1°38'
	<i>II</i> 端出射	3°26'	3°57'	1°5'	3°26'	2°6'	3°12'

3. 出射激光发散角与输出端锥角 α 的关系

光纤输出端逐步磨去时, 端面直径逐渐减小, 出射激光的发散角也逐渐减小, 当纤维端面直径减小到一定值时, 发散角可达最小值 α_{\min} , 然后随纤维端面进一步磨去而增大。图5为纤维出端直径与出射激光发散角之间的关系。可见在纤维喇叭形出端磨至 $\phi 1$ 毫米左右时, 发散角有最小值。

把各端部的最小发散角 α_{\min} 与它们的锥角相比较, 可以发现喇叭形输出端的纤维, 其出射激光的最小发散角与纤维端部的锥角 α 有关, 数值接近(见表2), 但纤维具有最小发散角这一性质只有在出端到达某一直径范围, 即在纤维直径变化曲线到达某一范围

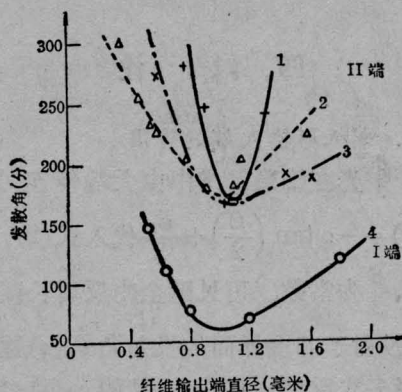


图5 纤维出端直径与出射激光发散角的关系

表2 最小发散角与锥角

No	出 射 端			
	<i>I</i> 端		<i>II</i> 端	
	α_1	$\alpha_{\min 1}$	α_2	$\alpha_{\min 2}$
7	1°9'	1°12'	1°50'	1°48'
8	55'	44'	1°50'	2°01'

时才表现出来。

4. 不同发散度光源入射喇叭形端部光纤时出射光的发散角

用12伏/50瓦电影放映灯泡的白光(发散度 $\sim 20^\circ$) 和 He-Ne 激光射入喇叭形端部光纤时, 经光纤出射的光的发散度列于表3。

表3 不同发散度光源经纤维后的发散角比较

纤维 No	9	10	11	12	13
α_w	2°16'	4°3'	4°0'	3°16'	2°21'
α_L	2°20'	4°1'	3°57'	3°20'	2°18'

α_w —白光发散角; α_L —激光发散角

发散度较大的白光与发散度很小的激光射入纤维后出射光的发散角几乎相等。同样, 当改变激光对纤维的入射角时, 出射光的发散角基本不变, 只改变光的亮度。这两个结果可相互印证。

* 由于图2纵横坐标比例不同, OB 、 $O'B'$ 并不是曲率半径, 圆心 O 、 O' 应在纵坐标很高处, 此处借以说明。

四、讨 论

1. 喇叭形输入端的作用

子午光在锥形纤维中由大端传至小端，以 $f(z) = -z \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) + \frac{d_1}{2}$ 代入式(2)，并注意 $\tan\frac{\beta}{2}$ 为常数。可见随全内反射长度的增长，光投射于芯皮界面的投射角 $\theta_2(z)$ 逐渐减小，经多次反射，某些光线的 $\theta_2(z) < \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1}$ ，即小于芯皮界面上全反射的临界角 θ_M 而从侧面漏出去。因此到达纤维中部直纤维段的光，它的 $\theta_2(z)$ 都 $\geq \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1}$ ，即经过喇叭形入端后，进入中部直纤维的最大入射角都相等。换言之，喇叭形入端只接收某一定孔径角内的光。表3的结果证明了这一点，虽然白光的发散角(相当于入射角)比激光大一、二个数量级，但其出射光的发散角却相等。喇叭形输入端使这种导光纤维的出射光发散角与光源的发散角无关，喇叭形输入端好象波导中的一个滤模器，它的形状(不是芯皮折射率之差)就大大减低了传输模数。

子午光从锥形光纤的大端传到小端，它的孔径角 $\theta_a(z)$ 可以由式(3)求得，只需将 $f(z) = -z \tan\frac{\beta}{2} + \frac{d_1}{2}$ 代入，并注意 $\sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} = \theta_M$ ，纤维最细处即直纤维段直径为 $d_2 = d_1 - z \tan\frac{\beta}{2}$ ； $\tan\frac{\beta}{2} \approx \frac{\beta}{2}$ 。即可求出 $\theta_a(z)$ 。也可更简单地由几何作图法来确定^[5]。图6为锥形纤维的展开图，由式(2)和图6可求得(当与纤维端面接触的介质折射率 $n_0=1$ 时)：

$$\sin \theta_{a_1} = \frac{r_2}{r_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\sin \theta_{a_2} = \frac{r_1}{r_2} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$\sin \theta_{a_1} : \sin \theta_{a_2} = r_2^2 : r_1^2$ ，根据拉格朗日-赫姆霍兹公式： $\pi r_1^2 \omega_1 = \pi r_2^2 \omega_2$ (ω_1 和 ω_2 为入射

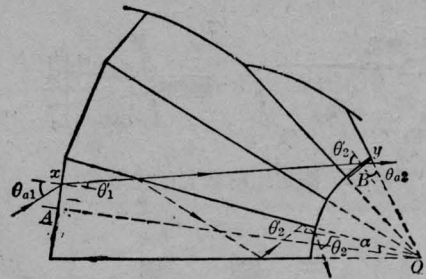


图6 子午光通过锥形光纤的路径和入射、出射角和出射光锥立体角)

得 $\sin \theta_{a_1} : \sin \theta_{a_2} = \omega_1 : \omega_2 = r_2^2 : r_1^2$ 即光由锥形纤维的大端入射时，它的数值孔径比直纤维的数值孔径 ($= \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$) 小 r_2/r_1 倍。增大二端的直径比，可以使锥形纤维在芯皮折射率差较大的情况下获得很小的数值孔径。对于大发散度的光来说，这种喇叭形入端使入射光限于很小的入射角内，超过此入射角的光能都损失了，因而降低了透过率。图7为光从锥形纤维不同端入射时的孔径特性及透过率的实测值^[7]，二端直径比1:3，可见从大端入射透过率低，数值孔径小。因此喇叭形入端虽然增大了端面积，提高了端面的激光破坏阈值，却对光纤与激光的耦合提出了更高的要求。

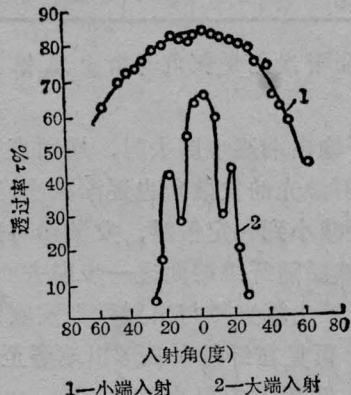


图7 锥形纤维的孔径特性

2. 输出端结构对出射光发散度的影响

从表1、2及图5可以看出喇叭形输出端的结构对出射光的发散度起决定作用。

将 $f(z) = z \tan \alpha + \frac{d_1}{2}$ 代入(2)，得

$$\theta_2(z) = \cos^{-1} \left[\frac{d_1}{2z \tan \alpha + d_1} \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_0 \right]$$

$$- \operatorname{tg} \alpha \approx \cos^{-1} \left[\frac{1}{2 \frac{z}{d_1} \operatorname{tg} \alpha + 1} \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_0 \right] - \alpha$$

即

$$\theta_2(z) + \alpha = \cos^{-1} \left[\frac{1}{2 \frac{z}{d_1} \operatorname{tg} \alpha + 1} \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_0 \right] \quad (5)$$

随 z 的增大 $\theta_2(z)$ 增大, 每一次投射到倾斜的纤维侧表面的投射角增大了 α , 反射角与投射角相等, 因此每一次全反射后投射于芯皮界面的角度都增大了 2α 。随着全反射次数的增加, $\theta_2(z) \rightarrow \frac{\pi}{2} - 2\alpha$, 反射光线与纤维芯皮界面平行, 不再发生全反射而直接从纤维大端射出。因此, 如 z 足够长, 则全反射光线总趋向与芯皮界面夹角一致, 发散角趋于减小。当 z 与 α 都是变数时, 如(4)式所示, 全反射后的发散角只与锥形出端的长度 z 和锥角半角的正切 $\operatorname{tg} \alpha$ 的乘积有关。直纤维的 $\alpha=0$, $\sin \theta'_1 = \sin \theta_1(z)$, 发散角不随纤维长度而改变。在锥形纤维时, α 虽大但 z 很小, 也不能得到小的 $\sin \theta_1(z)$ 。在 $\tan \alpha \ll 1$ 的情况下, z 值对 $\theta_1(z)$ 起着主要作用。因此较长的 I 端比较短的 II 端出射光的发散角小。由于在足够长的全反射后, 全反射光趋向平行于芯皮界面, 较小锥角的端部出射光的发散角也较小。纤维端面磨去一点, 锥角减小一点, 发散角也随之减小, 再进一步磨去时发散角到最小值后又增大, 可能是在 α 小的情况下 z 值不够, $\theta_1(z)$ 减小不多所致。更可能是在现在的实验条件下, 端面磨到 $\phi 1$ 毫米以下“塌边”而形成凸状的表面使发散角增加。

用子午光来解释变直径光纤的导光特性, 只能描述一个粗略的轮廓。它没有考虑到在纤维中大量存在的斜光线, 也没有考虑沿芯皮界面上传播的光线, 它们在变直径光纤的导光中起重要作用, 但它们的传输现象是非常复杂的。

总起来看, 喇叭形输出端似乎与输入端相反, 它好象一个模耦合器, 把各种入射角的光(相当于各种模)都耦合成较简单的模, 以较小的出射角射出。

五、结 论

1. 喇叭形输出输入端导光纤具有输出光发散角小的特点, 其发散角可比普通光导纤维小一个数量级;
2. 喇叭形入端起着滤模器的作用, 使这种纤维的发散角与光源的入射角(发散角)无关;
3. 喇叭形输出端的结构对出射光发散角起决定作用, 锥度较小而端部较长的输出端出射的光发散角较小。出射端直径对发散角有影响, 存在着发散角最小的直径最佳值。

参 考 文 献

- [1] M. C. Cox; *Electro-Opt. Syst. Design*, 1974, **6**, No. 8, 15.
- [2] 上海化工学院光纤组, 《激光》, 1978, **5**, No. 4, 25.
- [3] USP 3687514, 3666348.
- [4] N. S. Kapany; "Fiber Optics", 1967, New York.
- [5] W. B. Allan; "Fiber Optics-Theory and Practice", 1973.
- [6] H. D. Reidendack; *Opt. and Quant. Electr.*, 1978, **10**, No. 2, 184.
- [7] И. С. Блох; "Оптическое волокно и элемент", 1972.