

纯石英光纤的弯曲传输特性实验研究

徐世祥 李锡善 张国轩

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 报道了国产纯石英光纤弯曲特性的测量结果, 得到了光纤的弯曲损耗与芯径、弯曲半径的关系曲线, 并对测量结果进行理论分析。

关键词 纯石英光纤, 弯曲传输效率

光纤发生弯曲后, 原来光纤的部分约束光(波导模)将变为隧道光甚至折射光, 从而引起弯曲损耗。弯曲损耗是衡量光纤弯曲使用条件的重要参数, 所以测量光纤的弯曲损耗特性具有重要意义。

1 测量原理

对于大芯径、弯曲半径为常数的理想阶跃型光纤, 其弯曲损耗 α_c 有下列关系式^[1]

$$\alpha_c = \frac{C_1}{R^{1/2}} \exp(-C_2 R) \quad (1)$$

式中 R 为光纤的弯曲半径, C_1 , C_2 为参数, 且有

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{aW^3} \right)^{1/2} \left[\frac{U}{VK_1(W)} \right]^2 \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{4\Delta W^3}{3aV^2} \quad (3)$$

式中 a 为纤芯半径, $\Delta = n_1 - n_2$ (n_1 , n_2 分别为纤芯和包层的折射率), $K_1(W)$ 为变形贝塞尔函数, U , V 和 W 为光波导参数, 且有

$$V^2 = U^2 + W^2 \quad (4)$$

$$U^2 = a^2(k_0^2 n_1^2 - \beta^2) \quad (5)$$

$$W^2 = a^2(\beta^2 - k_0^2 n_2^2) \quad (6)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, β 为光波导轴向传输常数。

根据 α_c 的值, 则对于一长度为 L , 弯曲半径为 R , 弯曲长度为 L_c 的光纤, 其传输关系为

$$P_{out} = \eta P_{in} \exp(-\alpha_0 L - \alpha_c L_c) = \eta P_{in} \exp(-\alpha_0 L) \exp(-\alpha_c L_c) \quad (7)$$

式(7)中 P_{in} , P_{out} 分别为光纤的输入、输出能量, α_0 为光纤在非弯曲情况下的损耗系数, η 为耦合效率。

令 $T = \eta \exp(-\alpha_0 L)$, 由(7)式得

$$T_c = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}} T} = \exp(-\alpha_c L_c) \quad (8)$$

显然 T 表示长度为 L 的光纤在非弯曲情况下的透过率, 而 $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ 则为光纤在弯曲状态下的透过率, 所以 T_c 的物理意义是光纤的纯弯曲传输效率。

2 测量装置和过程

测量装置如图 1 所示, He-Ne 激光器的输出功率为 50 mW 左右。He-Ne 激光经开关 S 后被分束器 BS 分成两束光, 其中一束由探测器 D_1 接收, 另一束经扩束器 T 后被透镜 L 聚焦, 经小孔光阑 P 后入射光纤。光纤的输出能量则由探测器 D_2 接收。

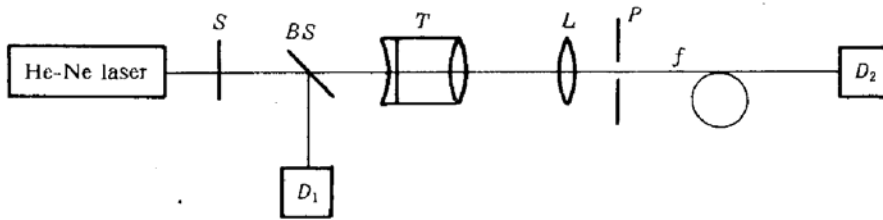


Fig. 1 Experimental setup

S : switch; BS : beam splitter; T : beam-expanding telescope; L : lens; P : pinhole; f : fiber; D_1 : detector 1; D_2 : detector 2

根据光纤传输原理, 对于多模光纤, 只有当模式耦合达到稳态分布时, 式(7)才能成立, 这就需要光纤具有一定的长度。如果光纤模间耦合很强, 则很容易建立起稳态模式分布; 而如果光纤模间耦合较弱, 就需要较长的传输距离。对于阶跃型光纤来说, 如果激发源的数值孔径与光纤的数值孔径相同, 就能实现稳定的模式分布。所以实验中必须保证耦合光学系统的相对孔径应与光纤的数值孔径匹配, 这也有利于提高光纤输入端的耦合效率。实验所用光纤的长度范围为 4.5~6.5 m。为判断光纤传输功率是否达到稳定的模式分布, 测量前我们先观察光纤不同截面的远场光斑(每个截面离入射端距离均大于 4 m), 发现其远场图基本相同。据此可认为其模间耦合近似达到稳定分布。另外, 光纤的入射端面应位于聚焦透镜 L 的焦后, 并让入射光斑充满光纤纤芯, 从而能激发所有波导模。

由(8)式可知: 只要测出光纤在平直状态和弯曲状态两种情况下的透过率, 两者之比即可得光纤的“纯”弯曲传输效率(两种状态下测量的端面耦合条件不变)。这种测量方法的实质是将光纤的非弯曲损耗归一化。所以, 实验中由于光路调整偏差、光纤端面处理质量不理想等影响光纤传输效率的因素对实验结果的影响均可忽略。从图 1 还可发现: 我们不必测量光纤在平直和弯曲两种情况下的透过率, 只要测出这两种情况下的 D_2 、 D_1 探测器的读数比即可。这不仅消除了激光输出功率波动对测量结果的影响, 而且简化了实验过程, 相应地也就减少了误差来源。实验中弯曲长度 L_c 选为 $2\pi R$ 是为了操作方便。光纤的弯曲位置应尽量靠近输入端, 但也不能太靠近, 以免输入端受力太大而改变输入耦合状态或折断光纤。

测量时, 将每根光纤在同一状态下重复测量取平均, 以减少测量过程中的随机误差。本测量结果的相对误差为 5%。

3 测量结果及分析

本实验共测量六根光纤，其中五根光纤是国产阶跃型紫外纯石英光纤，芯径分别为：600 μm ，650 μm ，700 μm ，750 μm ，800 μm 。为了比较，另外还测了一根芯径为 750 μm 的市售的普通石英光纤。它们的包层材料均为有机硅胶，数值孔径也均为 0.39。

图 2 是五根紫外纯石英光纤的测量值 ($L_c = 2\pi R$) 按(8)式拟合得到的曲线，图 3 为紫外纯石英光纤弯曲损耗与芯径的关系曲线，而图 4 则是同芯径、同数值孔径的两根光纤(一根为紫外纯石英光纤，另一根为普通市售石英光纤)的弯曲损耗特性的对比图。从这些曲线中可得到下列结论：

1) 弯曲传输效率 T_c 随弯曲半径 R 的减少而下降，而且 R 越小， T_c 下降速度越快。这是由于 R 越小，原来波导模中变为泄漏模或辐射模的模数就越多，弯曲损耗系数 α_c 越大， T_c 下降速度越快。这与(1)，(8)式所预见的相符。

2) 对于同一型号的光纤，芯径越大， T_c 随 R 的下降速度越快。这是由于大芯径光纤高阶模的数量较多，而这些模比低阶模更容易因光纤的弯曲而从纤芯漏掉。

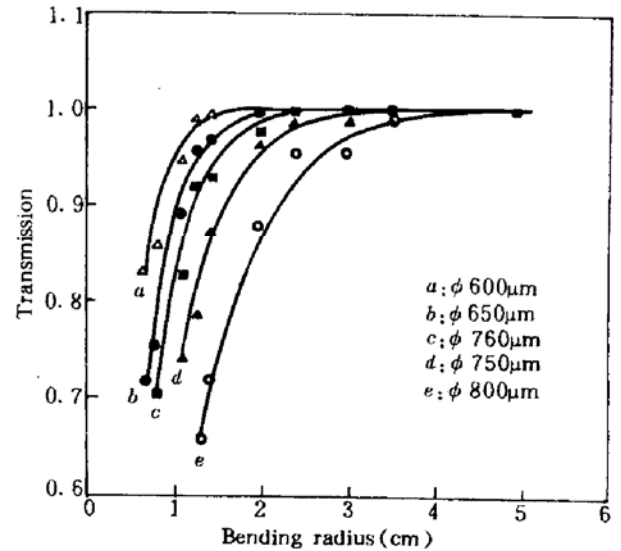


Fig. 2 The curves of banding transmission efficiency vs, bend radius with different core disimeters

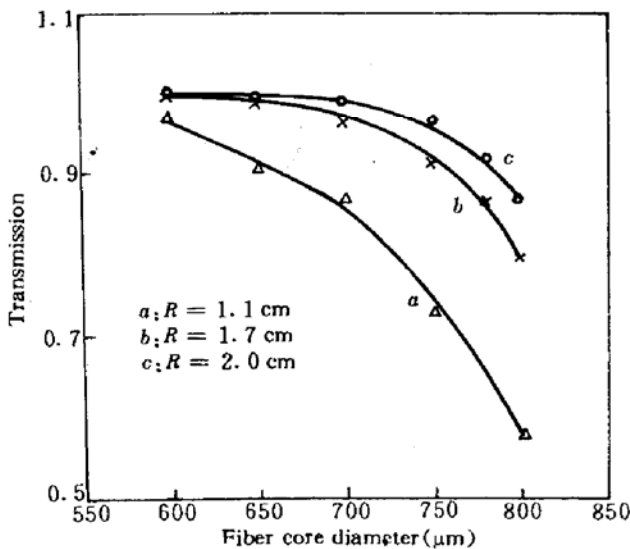


Fig. 3 The curves of banding transmission efficiency vs, core diamater with different band radii

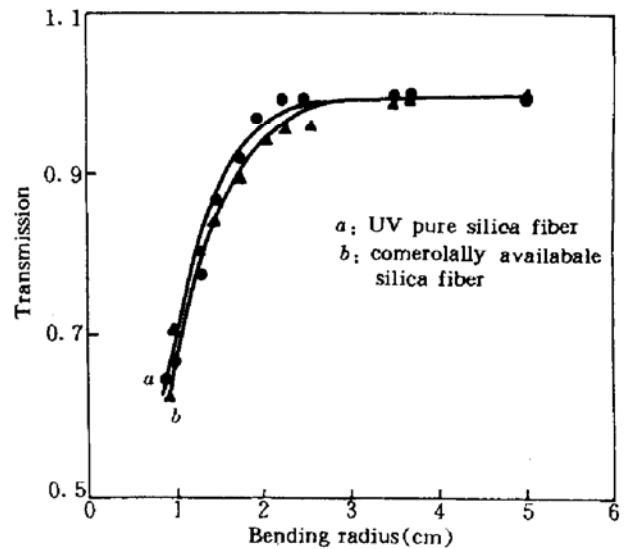


Fig. 4 The curves of banding transmission efficiency vs, bend radius with the same core diameter and the two different kind of fibers

3) 在数值孔径、芯径和弯曲半径均相同的情况下，紫外纯石英光纤与市售的普通石英光纤比较具有较低的弯曲损耗。虽然本测量方法能基本上除去非弯曲损耗的差异对测量结果的影响，然而光纤弯曲会在其横截面上产生应力，这种应力效应会使光纤轴发生几何变形和光纤折射率分布发生变化^[2]，从而导致光纤弯曲损耗的改变。其变化的程度与光纤材料的质量、性

能有关。光纤弯曲还将引起其内部场分布的变化,表现为场分布宽度变窄和场中心向远离弯曲中心的方向移动。对于大芯径光纤,高阶模数量较多,后一种现象是主要的,于是弯曲使芯层-包层边界附近的场强增强,所以此时芯层-包层边界的不均匀性的差异是引起图 4 中两条曲线分离的重要因素^[3]。总之,紫外纯石英光纤与市售的普通石英光纤比较可能材料质量和光纤的结构较好。

根据式(1)和(8),由测量值可拟合得到 C_1 、 C_2 值(见表 1)。通过这些值可估计相应种类和规格的光纤在不同弯曲条件下的弯曲损耗值。

Table 1

Core diameter (μm)	ϕ 600	ϕ 650	ϕ 700	ϕ 750	ϕ 800	ϕ 750
Length (m)	5.15	4.65	6.07	5.55	4.50	6.50
C_1 ($\text{cm}^{-1/2}$)	1.04	0.93	0.88	0.69	0.64	0.66
C_2 (cm^{-1})	4.86	3.85	3.31	2.486	1.85	2.30
Remarks	Violet pure silica fiber					Comercial silica fiber

如将光纤的弯曲传输效率 T_c 下降到 90%,所对应的弯曲半径定义为光纤的弯曲使用容限 R_c ,表 2 列出了实验所测的六根光纤的 R_c 值。 R_c 的意义是:基本上能从损耗的角度衡量光纤的弯曲使用条件。选 90% 作为标准的原因是:(1) T_c 下降至 90% 在光纤的一般使用场合是可以容忍的。(2) 从图 2,图 3 知当 $T_c < 90\%$ 时, T_c 随 R 的变小而下降的速度非常快。

Table 2

	Violet pure silica fiber					Comercial silica fiber
Core diameter (μm)	ϕ 600	ϕ 650	ϕ 700	ϕ 750	ϕ 800	ϕ 750
Length (m)	5.15	4.65	6.07	5.55	4.50	6.50
R_c (mm)	8.5	10.5	12.5	15.0	21.5	17.0

上述结论虽然是在 632.8 nm 激光波长条件下测到的,但由斯奈尔定理知:与在 632.8 nm 波长条件下比较,在紫外准分子激光波段,光纤的最大接收角较小,因而从理论上说其弯曲损耗要小些。所以用本实验的测量结果作为光纤传输紫外准分子激光的弯曲使用参考是留有余地的。选用 He-Ne 激光作为测量光源的原因是:弯曲会大大降低光纤的激光感生破坏阈值^[1],若用脉冲准分子激光作为测量光源很容易造成光纤产生激光感生破坏现象。

参 考 文 献

- 1 Ali Moslem, Bahaeddin Jassemnejad, Richard C. Powell. *Optical Material*, 1992, 1: 27~40
- 2 Kazuo Nagno, Shojiro Kawakami, Shigeo Nishida. *Appl. Opt.*, 1978, 17(13): 2080~2085
- 3 Dietrich Marcuse. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, 66(4): 311

The Effects of Bending on the Transmission Properties of Pure Silica Optical Fibers

Xu Shixiang Li Xishan Zhang Guoxuan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

Abstract Results of experimental measurements of domestic step-index silica optical fibers with the different core diameters and same numeral aperture measured as a function of fiber bending radius are presented. Some theoretical analyses are also given.

Key words pure silica optical fiber, bending transmission efficiency