

纯石英光纤的高功率紫外激光传输特性

张国轩 李锡善 徐世祥 董景兴 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

孙明武 高杞建

(中国建材研究院石英所, 北京 100024)

摘 要 报道了几种国产阶跃型纯石英光纤在传输 XeCl (308 nm) 准分子激光时的损耗特性及其破坏阈值的实验研究结果, 同时也报道了这些光纤的弯曲损耗和弯曲断裂特性. 结果表明, 这些紫外级石英光纤, 最小的透过损耗约为 0.33 dB/m, 表面破坏阈值约为 10 J/cm².

关键词 紫外光纤, 表面破坏阈值, 准分子激光器.

1 引 言

近年来, 高功率准分子紫外激光在生物、医学和材料加工等方面得到了广泛的应用^[1~5]. 在激光医学方面, 紫外激光传输光纤是激光诊断和治疗的关键元件. 早在八十年代, 国外已对紫外激光传输光纤进行了比较系统的研究, 从而使光纤的传输性能得到了很大的提高. 但是国内在这方面的研究工作开展较晚, 有关的报道也很少.

本文报道了几种自制的芯径为 $\phi 500-800 \mu\text{m}$ 的高纯石英光纤对 XeCl 准分子激光的透过特性和破坏强度的实验研究结果, 并与普通市售石英光纤进行比较, 同时还研究了光纤的弯曲损耗和弯曲断裂强度.

2 实验装置

实验装置如图 1 所示, XeCl 准分子激光器有两台, 一台的脉冲输出能量为 100—400 mJ, 重复频率 1 Hz, 脉冲宽度为 50~60 ns; 另一台的脉冲输出能量为 100~200 mJ, 重复频率为 1~20 Hz, 脉冲宽度为 50 ns, 视不同的实验要求加以选择. 激光输出经光栏 D 后, 通过一组滤光片 P 以改变光纤的输入能量, 一束光经分束器 BS 至接收器 D₁, 以监视激光能量, 另一束光经扩束后, 由透镜 L 聚焦进入光纤, 光纤输出端端的能量由接收器 D₂ 测量, 光纤耦合系统的数值孔径约为 0.23. 实验用的光纤均为阶跃型光纤, 纤芯材料为纯石英玻璃, 包层材料为有机硅, 数值孔径约为 0.39.

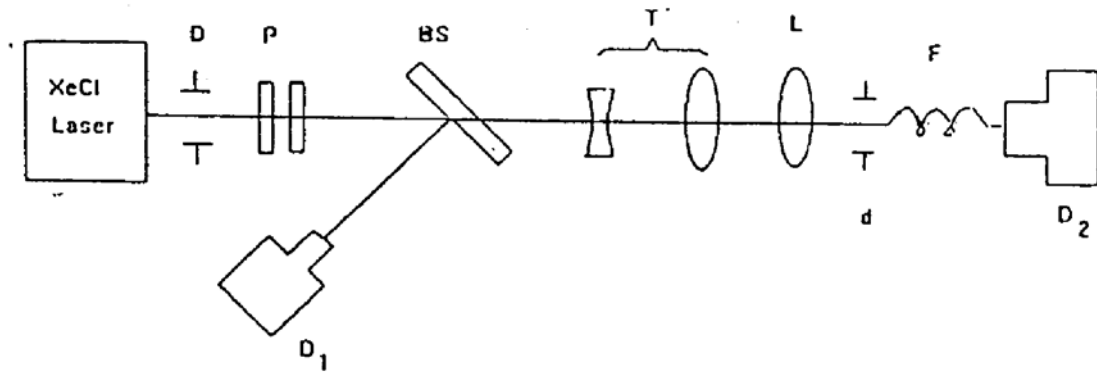


Fig. 1 Experimental arrangement for the optical fiber loss measurement.

D: diaphragm; P: filters; BS: beam splitter; D₁: detector 1; T: beam-expanding telescope; L: lens; d: pinhole; f: fiber; D₂: detector 2

3 光纤的损耗特性

不考虑非线性损耗时,一束强度为 I_0 的入射光,经长度为 L 的光纤后,光强衰减为 I :

$$I = I_0 \exp(-\alpha_0 L), \quad (1)$$

式中 α_0 为衰减系数.

一般以 dB/m(或 dB/km)表示光纤的损耗 α ,

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \log \frac{I(L_1)}{I(L_2)}, \quad (2)$$

式中 $I(L_1)$ 、 $I(L_2)$ 分别是长度为 L_1 、 L_2 的光纤输出的能量.

光纤的损耗 α_0 是波长的函数,如果不考虑红外和紫外的本征吸收,则有:

$$\alpha_0 = A/\lambda^4 + B(\lambda) + C \quad (3)$$

其中,第一项为瑞利散射,第二项为杂质吸收, C 为与波长无关的结构损耗, A 为一常数.

实验中,光纤损耗的测量采用折断法,被测光纤的长度为 2~5 m. 为了减少测量误差,对同一型号和尺寸的光纤进行多次测量和平均.

表 1 为各种芯径的市售石英光纤和实验室研制的紫外级石英光纤的损耗测量结果.

Table 1. Results of transmission measurements for the XeCl excimer laser at 308 nm

Fiber type	Core diam (μm)	NA	Attenuation coefficient (dB/m)	Transmission for 2m (%)
pcs-1-1	600	0.39	0.97	64
pcs-1-1	800	0.39	1.00	62
pcs-1-1	900	0.39	1.00	62
pcs-1-2	500	0.39	0.90	66
pcs-1-2	750	0.39	1.30	55
pcs-2-1	720	0.39	0.33	86
pcs-2-1	750	0.39	0.45	81
pcs-2-1	790	0.39	0.50	78

pcs-1-1, pcs-1-2: commercially available fibers. pcs-2-1: UV fibers

由表 1 可见,紫外级石英光纤比普通市售石英光纤的损耗小几倍,这主要是由于紫外级石英光纤的预制棒是采用化学气相沉积工艺合成(普通石英光纤采用气炼法),其均匀性好,无气

泡线,而且杂质含量也较低,因而材料的散射和吸收较小.

表 2 列出了不同工艺的普通石英光纤和紫外级石英光纤预制棒中的杂质含量.

Table 2. Comparison of the impure content in the two preforms of optical fibers

Sample number	Impurity (ppm)											
	Al	Fe	Ca	Mg	Ti	Mn	Sn	Ni	Cu	K	Na	B
1	16.04	0.67	0.47	0.11	0.58	0.19	0.3	0.1	0.08	0.04	1.07	0.04
2	0.38	0.11	0.5	0.05	0.11	0.05	1.0	0.03	0.03	0.3	0.4	0.035

number 1: the preform of visible and IR fibers (pcs-1-2).

number 2: the preform of UV fibers (pcs-2-1)

Fe^{3+} 、 Ni^{3+} 、 Ti^{4+} 等过渡金属离子在紫外区有很强的吸收带,对光纤的损耗影响很大.图 2 为两种过渡金属离子的紫外吸收.由表 2 可见,紫外级光纤的杂质含量明显低于普通石英光纤.因而其吸收损耗较小.

另外,实验中也发现,普通市售石英光纤在传输 XeCl 高功率紫外激光时,在光纤的侧面可观察到较强的散射光,而紫外级石英光纤的散射光的强度则大为减弱,由此可见,紫外级石英光纤散射也比较小.

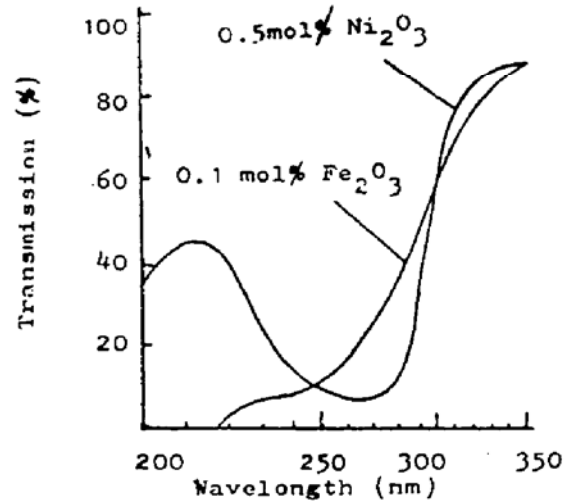


Fig. 2 UV absorption of the two transition-metal ions

4 光纤的破坏特性

已观察到的光纤破坏有两种形式,一是光纤入射表面的破坏,另一种是体内破坏,体内破坏多发生在靠近光纤输入端.光纤的体内破坏阈值一般比表面破坏阈值高几倍,甚至十几倍.在阶跃型纯石英光纤中,大多数破坏均为表面破坏.光纤表面的破坏阈值与表面状态有关,同时还与准分子激光的波长及脉冲宽度有密切的关系^[5~7].

光纤表面的破坏一般有三个阶段,当入射至光纤表面的能量密度增加时,开始出现局部的点状破坏如图 3(a)所示,这时即使是重复辐照,其表面微小的点状破坏引起的透过率下降仍很小.随着输入能量的增加,点状破坏的数目也增加,并出现第一次火花,此时可产生表面局部区域的熔化,如图 3(b)所示,但是其透过率的下降仍不十分严重.当继续增加输入能量时,光纤端面不仅出现火花,而且伴随着有“噼噼”的响声,此时透过率严重下降,以至不能使用,如图 3(c)所示.

表面破坏阈值的定义不同,其破坏阈值也不同.本文定义光纤端面出现第一次火花时入射光的能量密度作为其破坏阈值.光纤的破坏是一几率过程,由于表面状态的差异,准分子激光器的能量起伏等因素,都会使测量结果产生误差,所以多次实验的平均是必要的.

表 3 列出了几种光纤的测量结果.由表可见,端面处理的工艺不同,其破坏阈值也不同,切割端面的破坏阈值明显高于研磨端面,这可能是由于研磨光纤的表面缺陷及污染等因素造成.对于芯径较大的光纤其研磨表面的光洁度不如小芯径光纤,而且其表面污染的可能性也较大,因而其破坏阈值稍低.对于相同的端面处理工艺,普通市售石英光纤与紫外级石英光

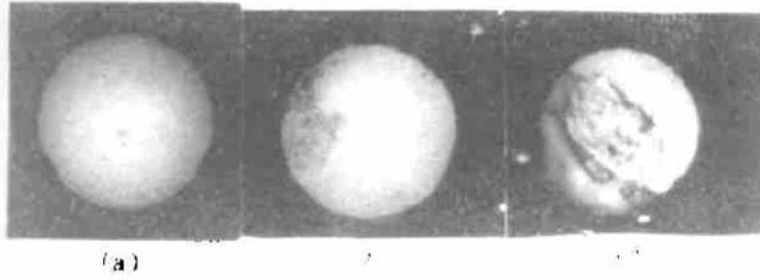


Fig. 3 Surface damage of fused silica fibers.

(a) point damage, (b) local melting of optical fiber surface; (c) the catastrophic surface damage

纤的破坏阈值基本相同.

Table 3. Surface damage threshold for several fused silica fibers at 308 nm

Fiber type	Core diameter (μm)	Damage threshold (J/cm^2)	Surface treatment
pcs-1-1	600	10	cut
pcs-1-1	500	6	polish
pcs-1-1	900	4.5	polish
pcs-1-2	600	9	cut
pcs-2-1	790	7	cut
pcs-2-1	750	6	polish
pcs-2-1	720	8.5	cut

5 光纤的弯曲损耗和弯曲断裂强度

光纤可以弯曲, 这是光纤传输的一大优点, 但是当弯曲半径较小时, 会影响其传输模式, 并产生损耗. 对阶跃型光纤, 弯曲引起的损耗系数 α_c 为^[8~10]:

$$\alpha_c = (C_1/R^{3/2})\exp(-C_2R) \quad (4)$$

式中, R 为弯曲半径, C_1 、 C_2 为与纤芯直径、纤芯和包层的折射率及光波导参数有关的系数. 对于长度为 L 的光纤, 考虑弯曲损耗时, 其总的透过率为:

$$T_o = P_{out}/P_{in} = \exp[-\alpha_0 L - \alpha_c 2\pi R]$$

因此, 光纤弯曲的归一化透过率为:

$$T_c = \exp(-\alpha_c 2\pi R) \quad (5)$$

用输出功率为 50 mW 的 He-Ne 激光测量了紫外级阶跃型石英光纤的弯曲损耗, 实验装置类似于图 1. 图 4 为弯曲引起的透过率下降与弯曲半径的关系. 由图可见, 当弯曲半径减小时, 弯曲引起的透过率下降速度逐渐加大, 当弯曲半径较小时, 其透过率急剧下降. 对相同的弯曲半径, 大芯径光纤的弯曲损耗比小芯径光纤大. 由于石英玻璃在紫外波段色散比较大, 估计对于相同的弯曲半径, 波长为 308 nm 的紫外激光的弯曲损耗可能比 He-Ne 激光要小些.

当弯曲半径继续缩小时, 光纤还会出现断裂. 测量了紫外级的高纯石英光纤的芯径与弯曲断裂的直径关系, 结果示于图 5. 由图可见, 断裂直径与光纤芯径之比基本上为一常数, 其比值约为 22. 实验表明, 紫外级石英光纤的弯曲损耗和弯曲断裂特性与市售石英光纤相近.

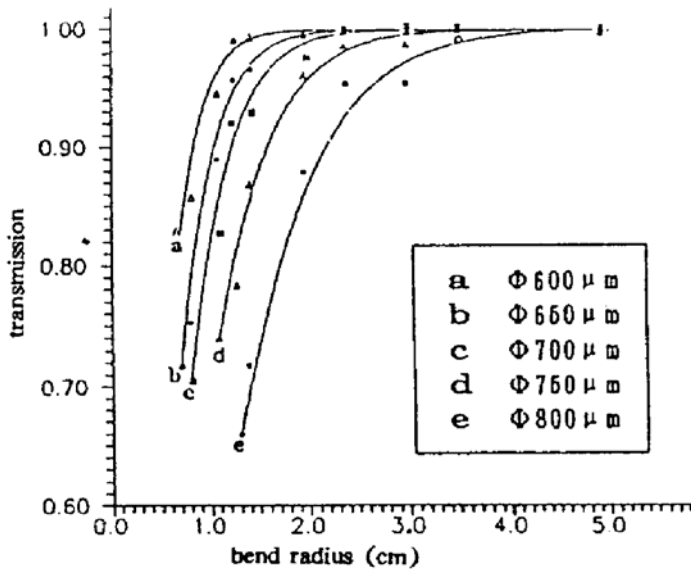


Fig. 4 Effect of bending on the transmission of fibers with the same numerical apertures (0.39) and different core diameters

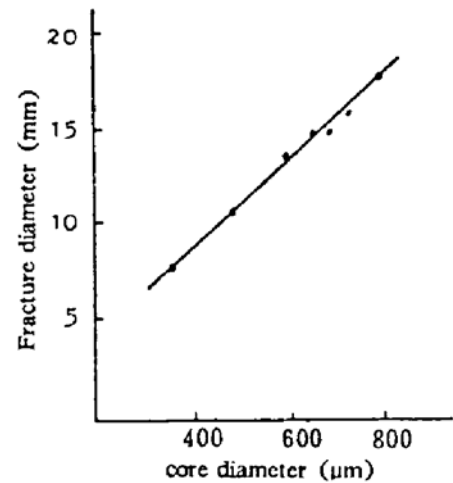


Fig. 5 Fracture diameter due to bending versus core diameter of optical fibers (pcs-2-1 type)

结 论 实验研究了几种国产高纯石英光纤对 XeCl 准分子激光的损耗特性和破坏阈值. 结果表明采用化学气相沉积工艺的石英玻璃预制棒拉制的光纤, 光学均匀性好, 杂质含量低, 因而有较好的紫外激光传输性能. 对 308 nm 的 XeCl 激光波长, 两米光纤的最佳透过率约为 86%, 最高破坏阈值为 10 J/cm^2 . 另外, 也研究了几种石英光纤的弯曲损耗和弯曲断裂特性.

本文的部分工作曾得到上海第二医科大学附属仁济医院的资助, 在此深表谢意. 对与仁济医院的包世宏、郑道声教授及董蓉、张世华、盖保康等同志的有益的讨论表示衷心的感谢. 感谢楼祺洪教授对本工作的支持和帮助.

参 考 文 献

- [1] D. L. Singleton, G. Paraskevopoulos, R. S. Taylor *et al.*, Excimer laser angioplasty; tissue ablation, arterial response, and fibers optical delivery. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(10): 1772~1782
- [2] Y. I. Kouichi, K. Kunitomo, M. Obara *et al.*, High-power KrF laser transmission through optical fibers and its application to the triggering to gas switches. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(6): 2956~2961
- [3] 赵震声, 胡雪金, 沈德立等, 准分子激光离体心肌消融术. *中国激光*, 1989, **16**(12): 749~751
- [4] 包世宏, 董蓉, 郑道声等, 准分子激光照射人体正常主动脉的组织效应. *中国激光*, 1991, **18**(6): 377~380
- [5] R. S. Taylor, K. E. Leopold, R. K. Brimacombe *et al.*, Fiber optical delivery system for the excimer recanalization of human coronary arteries in open heart surgery. *Proc. SPIE*, 1988, **906**: 225~230
- [6] R. S. Taylor, K. E. Leopold, R. k. Brimacombe *et al.*, Dependence of the damage and transmission property of fused silica fibers on the excimer laser wavelength. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3124~3134
- [7] R. S. Taylor, K. E. Leopold, S. Mihailov *et al.*, Damage measurement of fused silica fibers using long optical pulse XeCl laser. *Opt. Commun.*, 1987, **63**(1): 26~31
- [8] A. B. Sharma, A. H. Al-Ani, S. J. Halme, Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(19): 3297~3301
- [9] D. Marcuse, Curvature loss formula for optical fibers. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 216~220
- [10] E. F. Kuester, D. C. Chang, Surface-wave radiation loss from curved dielectric slabs and fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**(11): 903~907

Transmission Characteristics of Fused Silica Fibers at High-Power UV Excimer Laser Wavelength

Zhang Guoxuan Li Xishain Xu Shixiang

Dong Jingxing Wei Yunrong

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

Sun Mingwu Gao Sijian

(*China Building Materials Academy, Beijing 100024*)

(Received 31 August 1993; revised 9 December 1993)

Abstract Results are presented here of the transmission properties and the surface damage threshold of several types of step-index silica-core optical fibers at the XeCl wavelength (308 nm), transmission loss and the fracture limits of these fibers due to bending are measured also. The minimum transmission loss of the UV fibers is about 0.33 dB/m and surface damage threshold is about 10 J/cm²

Key words ultraviolet fiber, surface damage threshold, excimer laser.