

紫外石英光纤 XeCl 准分子激光感生破坏特性的实验研究

徐世祥 李锡善 张国轩

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 给出国产阶跃型石英光纤的 XeCl 准分子激光感生破坏特性的测量结果, 并对其形成原因进行了分析。

关键词 石英光纤, 激光感生破坏

1 引 言

激光感生光纤破坏是限制光纤最大可传输能量的主要因素之一, 因此, 测量光纤的激光感生破坏特性, 并分析其造成破坏的原因对于提高国产光纤抗激光破坏能力的研制水平具有重要意义。

2 测量装置和方法

测量装置见图 1, XeCl 准分子激光经开关 S 和光阑 I_{ris} 后, 被分束器 BS 分成两束。一束至探测器 D_1 (用于监视激光器输出能量的波动), 另一束经柱透镜 C (使激光束垂直和水平方向的发散角趋于一致) 后通过扩束镜 BET , 被透镜 L 聚焦进入光纤。光纤的输出能量由探测器 D_2 接收。准分子激光的输出脉冲能量为 200 ~ 400 mJ, 脉宽为 60 ns。所用光纤为国产阶跃型

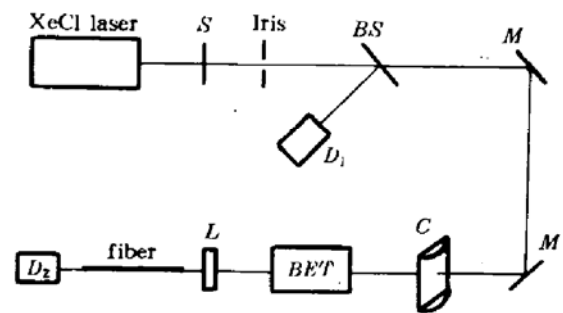


Fig. 1 Experimental setup

S : switch; BS : beam splitter; D_1 : detector 1; M : mirror;
 C : cylindrical lens; BET : beam-expanding telescope;
 L : lens; D_2 : detector 2

紫外纯石英光纤和普通市售石英光纤, 芯径规格有 $\phi 600 \mu\text{m}$, $\phi 650 \mu\text{m}$, $\phi 700 \mu\text{m}$, $\phi 750 \mu\text{m}$, $\phi 800 \mu\text{m}$ 五种, 数值孔径均为 0.39。光纤端面有研磨面和切割面两种。

为提高耦合效率, 耦合光学系统应与光纤的数值孔径相匹配。光纤的入射端应置于透镜 L 的焦后, 以避免由于焦点落在光纤内部而引起介质击穿。

测量方法是将准分子激光能量从小调到大, 并在各个能量点上记录 D_1 , D_2 的读数 T_1 , T_2 , 观察 T_1/T_2 值的变化。当光纤端面第一次冒火花时, T_1/T_2 值也开始较为明显地下降, 我们定义

此时入射光纤的能量密度即为光纤的破坏阈值。令 X 为 D_2 直接在透镜 L 后焦点处的 T_2/T_1 值, S 为入射光斑面积, 则破坏阈值为

$$L_t = T_1 X / S \quad (1)$$

图 2(a), (b), (c) 是实验得到的三种典型破坏现象的照片。图 2(a) 为点状破坏, 对光纤的透过率影响很小, 为破坏的第一阶段。图 2(b) 中光纤端面局部区域发生熔化现象, 此时端面开始冒火花, 透过率也开始明显下降, 此为破坏的第二阶段。图 2(c) 光纤端面严重破坏, 此时端面不仅冒火花, 且伴有“噼噼”的响声, 透过率严重下降, 为破坏的第三阶段。可见本实验测到的光纤表面破坏一般处于破坏的第二阶段。

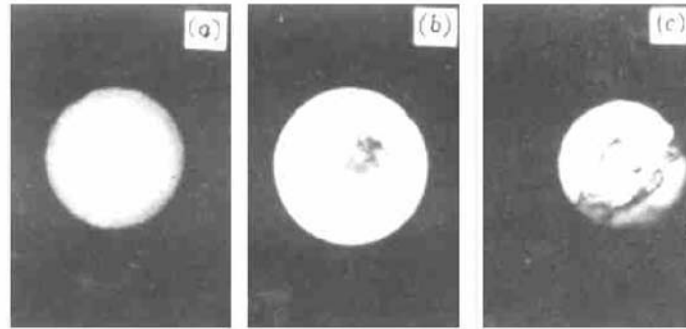


Fig. 2 Three typical appearances of laser induced damage at the ends of the fibers
(a) point-shaped damage; (b) local range melting; (c) catastrophic damage

3 实验结果

石英光纤传输紫外高功率激光时, 容易产生激光感生破坏, 其破坏形式有两种: 表面破坏和体内破坏。实验中测到的光纤破坏都发生在光纤端面。可见, 光纤表面破坏阈值明显低于体内破坏阈值。

表 1、表 2 是实际测量结果, 由此可得另一结论: 光纤切割面的破坏阈值为 $7 \sim 10 \text{ J/cm}^2$, 而研磨面为 $4.5 \sim 6 \text{ J/cm}^2$, 后者明显低于前者。

Table 1 The surface thresholds of the silica fibers
(the ends of fibers cut by score)

Type	Pcs-11	Pcs-11	Pcs-11	Pcs-12	Pcb-2	Pcb-2	Pcb-2
Core diameter (μm)	600	650	700	750	800	750	700
Damage Thresholds (J/cm^2)	10	9	9	7.5	7	8	8.5
Note	Comercially available silica fiber				Pure silica fiber		

Table 2 The surface thresholds of the silica fibers
(the ends of fibers worked by mechanistic-polishing)

Type	Pcs-11	Pcs-11	Pcs-11	Pcs-12	Pcb-2	Pcb-2	Pcb-2
Core diameter (μm)	600	650	700	750	800	750	700
Damage Thresholds (J/cm^2)	5	6	4.5	5	4.5	6	4.5
Note	Comercially available silica fiber				Pure silica fiber		

4 结论分析

一般说来,产生激光感生破坏的原因为:1) 光纤内部或表面存在吸收杂质或缺陷;2) 光纤内部激光自聚焦或外部透镜聚焦引起介质击穿。

按 R. W. Hopper 等人的理论分析^[1],光纤内部导热性较好、线度较大(对于石英光纤,光脉宽为 60 ns 时,这种线度 $\gg 0.9 \mu\text{m}$)的杂质粒子或导热性较差的杂质粒子会吸收激光能量而热膨胀产生局部应力,从而引起应力破坏。在现有的工艺条件下,1 μm 量级的杂质粒子大多数能被除去,所以后者的作用是主要的。

光纤内部导热性较好、线度较小(对于石英玻璃光纤,光脉宽为 60 ns 时,这种线度 $\ll 0.9 \mu\text{m}$)的杂质粒子对光纤破坏阈值的影响的主要机制是热效应。杂质粒子因吸收激光能量而温度升高,于是与周围介质发生热传递,当温度达到介质熔点时,就会使光纤介质内部发生局部熔化。这种线度的粒子是不易除去的,故对光纤的破坏阈值影响较大。

光纤内部或表面的缺陷,如小凹坑、裂口、沟槽、气泡会使光纤内部或表面的局部区域电场增大,从而降低了光纤的破坏阈值。在当前的工艺条件下,这些缺陷线度一般可控制在 1 μm 量级以内。此时,根据 N. Bloembergen 等人用静电学理论对圆形孔、圆柱形孔和椭圆形裂缝对电场集中影响的分析结果^[2]可知:对于石英光纤,这三种缺陷分别使光纤的破坏阈值降至原来的 0.25, 0.54, 0.23 倍。当这些缺陷的线度小于 30 nm 时,静电连续理论成立,缺陷区电场集中受限,此时对破坏阈值的影响很小。

在强激光场下,透明介质的折射率随光强的增强而增大,从而使激光在介质内部发生自聚焦。根据 Nicolaas Bloembergen 等人的结论^[3]可知:对于石英光纤,当激光波长为 308 nm,脉宽为 60 ns 时,产生自聚焦的激光阈值能量约为 245 mJ。故本测量过程中无自聚焦现象发生。

根据以上分析,限制光纤抗破坏能力的主要因素为线度在 1 μm 以内的导热性较差的杂质粒子的热膨胀应力效应、线度 $\ll 0.9 \mu\text{m}$ 导热性好的杂质粒子的热传导效应和线度在 30~1000 nm 间的缺陷等。

由于光纤端面除了存在由光纤材料的不均匀性和纯度引起的缺陷和杂质外,还存在由于端面处理过程中引入的缺陷和污染,这是光纤表面破坏阈值小于体内破坏阈值的主要原因。

对于研磨面,研磨精度约为 0.5 μm ,与切割面比较精度较低,且研磨时还会引入磨料等外界杂质的污染,所以研磨面的抗激光破坏能力就比不上切割面。然而光纤的切割精度受光纤芯径的影响^[4]。从理论上说,对于石英光纤能切割出理想端面(整个端面为一完全镜区)的最大芯径为 $\phi 315 \mu\text{m}$ 。所以大芯径光纤的切割精度除受切割工艺水平限制外,更主要的是受原理上的限制。目前国外光纤研磨面的破坏阈值已达 20 J/cm²(激光波长 308 nm,光脉宽为 28 ns)^[5]。按光纤的表面破坏阈值与光脉宽平方根成正比的理论^[6],此值相当于 60 ns 时的 30 J/cm²。

从表 1、表 2 还可知:相同类型的光纤,即使用同样的方法处理光纤端面,其测量值仍具有较大的离散性(相对误差高达 35.3%)。这是由于激光感生光学材料的破坏本身具有概率统计特性(脉冲能量越大,产生破坏的概率越大)^[7]。另外,光纤质量的差异、激光输出的稳定性、测量时各根光纤端面的离焦量差异(离焦量不同,入射光斑的均匀性也不同)和测量时的读数误差都是引起测量值离散的因素。所以这种离散性是不可避免的。

综上所述,提高光纤材料的纯度和均匀性、改进光纤结构、提高光纤端面研磨精度和防止

外界污染是提高光纤抗激光破坏能力的有效途径。

致谢 感谢楼祺洪教授及其课题组人员的指导和帮助;感谢乔景文老师在显微照相方面的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 R. W. Hopper, D. R. Uhlmann. *J. of Appl. Phys.*, 1970, **41**: 4023
- 2 N. Bloembergen. *Appl. Opt.*, 1973, **21**(4): 661
- 3 Nicolaas Bloembergen and fellow. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**(3): 375
- 4 D. Gloge, P. W. Smith *et al.*. *B. S. T. J.*, 1973, **52**: 1579
- 5 U. Grzesik, H. Fabian *et al.*. *SPIE*, 1992, **1649**: 80
- 6 R. S. Taylor, K. E. Leopold *et al.*. *Opt. Commun.*, 1987, **63**(1): 26
- 7 Michael Bass, David W. Fradin. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**(9): 890

The XeCl Excimer Laser Induced Damage Properties of the UV Silica Fiber

Xu Shixiang Li Xishan Zhang Guoxuan

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

Abstract The measurement of the XeCl excimer laser induced damage properties of the UV silica fibers is made. The theoretical analysis is also investigated correspondingly.

Key words UV silica fiber, laser induced damage