

文章编号: 1001-3806(2009)05-0490-03

光纤端面脉冲激光诱导损伤测试实验研究

李尧, 吴涓, 林佶翔, 王雄飞, 朱辰

(华北光电技术研究所 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要: 为了研究光纤端面在脉冲激光作用下的损伤阈值, 采用掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器诱导损伤测试方法, 获得了光纤端面脉冲激光诱导损伤特性的初步结果。结果表明, 光纤端面的加工工艺、表面质量、清洁程度及激光损伤探测光源的重复频率对损伤测试结果均有不同程度的影响。

关键词: 光纤光学; 端面损伤; 激光诱导损伤; 损伤阈值

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.012

Experimental study on pulsed laser induced damage to fiber end-faces

LI Yao, WU Juan, LIN Ji-xiang, WANG Xiong-fei, ZHU Chen

(National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to study the damage threshold of fiber end faces under pulsed laser condition, a pulsed Nd:YAG laser was adopted to measure the laser induced damage characteristics. The results showed that the process, the optical quality, the surface perfection of the fiber end face, the repetition frequency of pulsed laser had important effect on the damage threshold.

Key words: fiber optics; end-face damage; laser induced damage; damage threshold

引言

随着光纤激光器技术的发展和功率水平的日益提高, 对光纤端面的抗激光破坏能力的要求也越来越高。光纤端面的激光损伤阈值成为限制光纤激光器功率进一步增大的瓶颈, 是光纤激光器整体抗激光损伤性能中的一项重要的指标。因此, 对光纤端面激光损伤阈值的定量测量成为一项亟待解决的技术问题, 这一问题的解决对高功率光纤激光器的发展和应用有着十分重要的现实意义。

尽管激光诱导光学元件损伤测试的研究已开展多年^[1-3], 并形成了国际标准 ISO11254, 但是由于光纤结构、尺寸的独特性, 光纤的激光诱导损伤阈值的测试方法还没有一套统一的标准, 对该方向的研究还很有限。Fibertek 公司的 TORRUELLAS 等人^[4]测试了掺 Yb 光纤预制棒的体激光诱导损伤阈值, 对于脉冲宽度为 6ns ~ 7ns 的激光诱导损伤光源, 光纤的单脉冲激光诱导损伤阈值约为 900J/cm²。并指出, 抛光石英光纤的表面光学损伤的数值要比体激光诱导损伤阈值测量值至少小 4 倍。美国 Sandia 国家实验室的 SETCHELL 等人^[5]

指出, 对于脉冲宽度为 13ns 的 Nd:YAG 激光, 未经 CO₂ 激光预处理的光纤, 其损伤的能量密度阈值为 185J/cm²。中国工程物理研究院的 ZHAO 等人^[6]测试计算了石英光纤的端面零概率损伤阈值为 58.6J/cm²。

本文中搭建了光纤端面在调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光下的损伤测试平台, 以实验室条件模拟实际应用情况, 获得了一种光纤端面脉冲激光诱导损伤阈值的测试方法, 并获得了初步结果; 在此基础上, 研究了特定情况下光纤端面的损伤规律, 以期能为光纤激光器的研究提供参考依据。

1 实验方法

1.1 实验装置

脉冲激光诱导损伤阈值测试实验平台见图 1。激光系统包括调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器、用于准直的

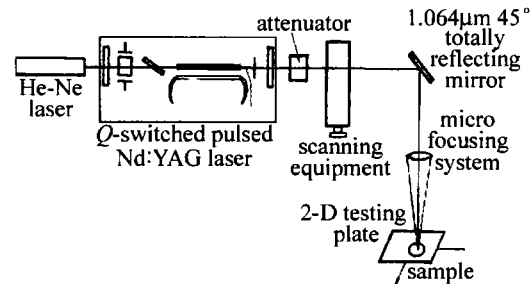


Fig. 1 Schematic of experimental setup of pulsed laser induced damage to fiber end-faces

作者简介: 李尧(1977-), 女, 工程师, 主要研究领域为高功率光纤激光器及放大器。

E-mail: nkliyao@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-19

He-Ne 激光器、能量调节系统、移动扫描装置、分束器、显微聚焦系统、样品台以及能量探测器等。测试装置放置在 1000 级的洁净间内。

激光损伤探测光源为调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器。脉冲激光工作波长为 $1.064\mu\text{m}$, 激光输出模式为 TEM₀₀ 模, 工作频率 10Hz 内可调。

将处理端面后的光纤样品固定在特制的石英夹具中, 放置在 2 维移动平台上。令调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器发出的激光经过显微聚焦系统后聚焦到光纤样品的端面。

采用刀口法确定激光光斑尺寸。首先以调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器在 10Hz 工作, 经移动扫描从示波器中直接测出光束直径 D , 则激光辐射光斑直径 d 为:

$$d = \frac{v_1}{v_2} D \quad (1)$$

式中, v_1 为旋转扫描速度, v_2 为示波器扫描速度。

焦点处光束直径为 d_f , 由下式得出:

$$d_f = \frac{2\lambda}{\pi d} f \quad (2)$$

式中, λ 为激光辐射波长, f 为透镜焦距 ($f=10.72\text{cm}$)。经测试, 激光光斑辐照到光纤端面上的有效光斑直径 $d_f=83\mu\text{m}$ 。

采用强流光电管接收, TDS3052 示波器显示, 测出半功率点的宽度 τ_w 。经测试, 激光脉冲宽度为 7.5ns。

实际激光能量密度 E_p 由下式决定:

$$E_p = \frac{4TE_w}{\pi d_f^2} \quad (3)$$

式中, E_w 为激光单脉冲能量, T 为聚焦系统的透过率。对透镜, $T=1$; 对光学系统, $T=0.7$ 。

1.2 实验方法

在国际标准 ISO11254 中, 光学表面激光损伤阈值的测试方法分为光学表面为镀膜面和未镀膜面(裸表面)两种情况。在激光诱导损伤阈值测试中, 针对激光束与光学表面辐照次数的不同, 激光对样品的损伤方式主要有以下几种: 1-on-1 方式: 样品表面每个位置仅被辐照 1 次, 测试点的间距不小于 3 倍样品表面处激光光斑直径, 以消除激光预处理的可能影响, 选用不同能流密度的激光对样品表面进行辐照, 在同一样品上, 每一能流密度至少照射 10 个位置, 计算每一能流密度的损伤几率, 应确保被测样品具有零损伤和 100% 损伤的几率; s-on-1 方式: 用相同能量的激光以相同时间间隔在材料同一点辐照多次; n-on-1 方式: 激光能量脉冲由小到大逐渐增加到破坏阈值, 激光束以相同时间间隔多次辐照在样品的同一点上。

由于光纤端面很小, 直径仅有 $400\mu\text{m}$, 因此, 选择

采取 n-on-1 测量方式进行光纤端面激光损伤实验。在实验中, 激光单脉冲能量从 2mJ 开始, 每次以 1Hz 频率发出 5 个脉冲辐照向光纤端面同一点, 观察光纤端面是否发生损伤, 如果损伤, 则停止实验; 如果未发生损伤, 则增大激光辐照能量, 每次能量增加 0.15mJ, 继续重复上述实验, 直至光纤端面出现非可逆损伤。在测试过程中, 目视观察到等离子体火花或用 100 倍显微镜观察到任何光纤表面永久性地改变, 即认为表面已出现损伤。

1.3 光纤样品

实验中采用的光纤样品为掺 Yb 双包层光纤, 纤芯直径 $20\mu\text{m}$, 内包层直径 $400\mu\text{m}$ 。对光纤端面分别进行了不同处理, 包括对光纤端面进行抛磨、切割及镀膜处理。抛磨处理是使用 2 轴研磨抛光机通过散粒磨料手工操作的方法对光纤端面进行加工。经过此种抛磨处理后, 再经 Veeco 公司生产的 WYKO 表面轮廓仪对光纤端面进行测试, 其均方根表面粗糙度达到 0.6nm。切割处理是采用宝石刀切割光纤端面, 由于切割质量不佳, 因此未能测出其表面粗糙度指标。镀膜处理是在光纤端面镀增透膜, 该过程在具有行星转动和大功率 APS 离子源的德国 LEYBOLD 真空镀膜设备中完成, 所镀膜系材料为 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$, $T_{970\text{nm}-980\text{nm}} > 99\%$ 。

实验开始前, 需要特别注意光纤端面的清洁。使用专用的光纤清洁擦拭纸和摩斯级乙醇擦拭光纤端面, 并利用 100 倍光纤端面放大观察仪检查端面清洁程度, 尽量减小光纤端面的杂质。

2 实验结果

测试结果表明, 发生损伤时, 切割端面对应的激光能量密度最小为 $66\text{J}/\text{cm}^2$, 最高可达 $96\text{J}/\text{cm}^2$; 而抛磨端面损伤时对应的激光能量密度范围在 $57\text{J}/\text{cm}^2 \sim 65\text{J}/\text{cm}^2$ 之间。此外, 光纤端面的清洁程度会严重影响脉冲激光的损伤阈值。当光纤端面有脏点时, 出现损伤时对应的激光能量密度由 $57\text{J}/\text{cm}^2$ 下降到 $45\text{J}/\text{cm}^2$ 。如果在光纤端面镀增透膜, 由于光纤的涂敷层为有机聚合物, 其耐温特性在 100°C 附近, 不能耐受高温, 因此必须采用低温镀膜方法。这样造成膜面牢固性很差。从激光损伤结果明显可见, 镀膜端面出现损伤时对应的激光能量密度非常低, 仅为 $5.7\text{J}/\text{cm}^2$, 比未镀膜时的抗损伤性能降低了 10 倍。

使用 Nikon MM-800 显微镜仔细观察光纤端面的损伤, 得到如图 2 所示照片。图 3 为镀膜端面在损伤测试前后的对比照片。

为了研究光纤端面的光学质量对激光诱导损伤特性测试结果的影响, 提高了光纤端面的抛磨处理工艺,

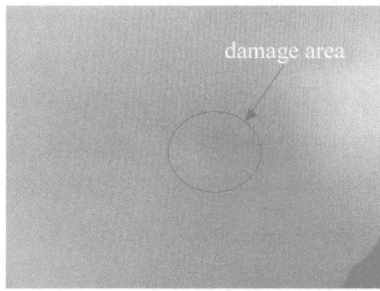


Fig. 2 The photograph of fiber end-face after laser induced damage

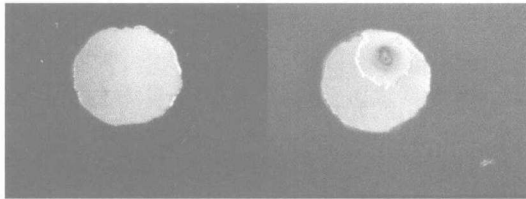


Fig. 3 The photographs of fiber coating surfaces before and after laser induced damage

使用新型 500 目 CeO_2 抛光粉磨料对光纤端面进行抛光,并严格控制抛光过程的压力、时间等参量。经过以上工艺改进后,经测试,光纤端面的均方根表面粗糙度提高到 0.42nm。测试结果如图 4 所示。

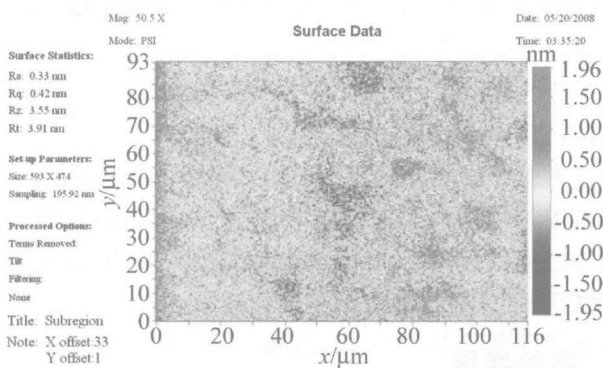


Fig. 4 The root mean square roughness of the fiber end-face after polished

针对上述经端面抛磨工艺改进后具有更好光学质量的光纤样品,同样进行了 n -on-1 方式的单脉冲激光诱导损伤测试,并获得了较好的结果。实验表明,发生损伤时,光纤端面可承受的激光能量密度大大提高,多次实验均达到 $100\text{J}/\text{cm}^2$ 以上,最高可承受激光能量密度达到 $130\text{J}/\text{cm}^2$ 。

以上实验结果为单次脉冲 (1Hz) 的损伤测试结果。而在一定重复频率下,样品的破坏阈值通常比单脉冲的情况低,这种现象称为激光破坏的累积效应。在实际情况中,样品也是要在一定重复频率下工作,光纤总是要经受多次激光的作用。所以,在研究激光破坏时,人们不仅关注单次激光对光纤的作用,更关心多个脉冲对同一点进行辐照时,光纤端面所发生的种种变化。因此,作者进一步在一定重复频率下开展了同样的激光诱导损伤测试。

令激光损伤探测光源在 10Hz 条件下工作,以一定能量辐照光纤端面,每次连续工作时间为 60s,若光纤端

面发生损伤,则立即停止实验并记录激光工作时间;若未发生损伤,则在激光工作 60s 后停止。继续提高激光能量,重复上述实验,直至光纤端面出现损伤为止。

实验结果表明,对于同一个光纤端面,当激光单次工作时,光纤端面发生损伤时对应的激光能量密度可达到 $128\text{J}/\text{cm}^2$,而在激光以 10Hz 条件工作时,发生损伤时其对应的激光能量密度下降至 $40\text{J}/\text{cm}^2$,工作时间 7s。

造成以上结果的原因是多脉冲激光损伤的积累效应^[7-8]。多脉冲激光损伤是材料内微观缺陷吸收激光后的非线性发展积累过程。一般材料在制备和加工过程中,存在大量的微观缺陷,这些微观缺陷具有比材料本征吸收大得多的吸收率,在材料与激光脉冲相互作用的过程中,缺陷吸收将占主导地位,缺陷吸收可在材料内部形成局部高温,局部高温达到一定程度就会造成材料缺陷处首先发生热爆炸、雪崩离子化等过程,从而使缺陷进一步扩大,但材料局部或整体的结构/物性并未发生宏观损伤,只是引起材料内微观缺陷的爆炸和发展。这种微观损伤初始时破坏程度很小,对材料光学特性影响很小。然而每个微观缺陷的爆炸和发展,将增加对后续激光脉冲的吸收,导致更大的微观损伤发生。这种微观缺陷损伤的发展最终导致材料灾难性损伤。值得注意的是,每个激光脉冲强度不能低于一个最小值,否则在材料中不能产生微观损伤,再多的激光脉冲也不能发生宏观损伤。

3 结论

建立了一套光纤端面在调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器作用下的损伤测试系统,并获得了光纤端面脉冲激光诱导损伤特性的初步结果。研究了光纤端面的处理工艺、光学质量、清洁程度及激光损伤探测光源的频率对损伤测试结果的影响。结果表明,对光纤端面进行高质量的抛磨处理,保证端面的清洁是提高光纤端面抗激光损伤能力的有效途径。由于多脉冲激光损伤的积累效应,多脉冲激光对光纤端面的破坏能力要远大于单脉冲激光。为了更好地模拟实际应用的效果,还需针对光纤端面在不同重复频率激光作用下抗损伤特性的规律,开展进一步的实验研究。

参考文献

- [1] GUENTHER K H, HUMPHERYS T W, BALMER J E, *et al.* 1.06 μm laser damage of thin film optical coatings: a round-robin experiment involving various pulse lengths and beam diameters [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(21): 3743-3752.
- [2] ZHU Y N. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optical coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 532-535 (in Chinese).

(下转第 496 页)

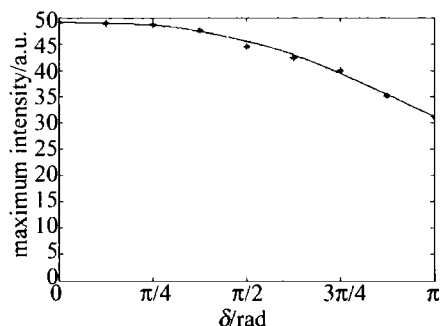


Fig. 6 Variation of the maximum intensity with random jitter within different ranges

但并不十分显著;而在 $|\Delta\phi_4| \leq \pi/2$ 范围随机抖动时峰值光强明显降低,抖动的影响已经不可忽略;当 $|\Delta\phi_4| \leq \pi$ 的范围随机抖动时峰值光强下降得最厉害。通过在不同范围内系统随机抖动对峰值光强影响来看,对在文中析的7个光源的系统而言,系统抖动应该控制在 $|\Delta\phi_4| \leq 3\pi/8$ 范围内,远场才不会受到较大影响,一般来说,光源的数目越少,对系统的抖动要求就越严格。

3 结论

运用傅里叶光学分析法推导出系统抖动造成单个光源引入相位差时的远场光强表达式。以正六边形阵列为例给出了当系统分别引入相差 $\Delta\phi_4$ 为 $0, 3\pi/8, 5\pi/4, \pi$ 时对远场光强带来的影响,描绘了中心光斑的能量与总能量的比值以及峰值光强随相差的变化曲线,研究了系统在不同范围内随机抖动时对远场峰值光强所产生的影响,并进行了讨论。研究表明,系统的抖动不仅使得远场的峰值光强的减小,中心亮斑的能量降低,而且还可能使中心光斑的位置偏移,远场对称性遭到破坏。列阵单个光源的随机抖动分析表明,对7个光源系统而言,抖动至少应该控制在 $3\pi/8$ 范围内,否则远场亮斑会明显变弱。

参考文献

[1] ZHANG P, GAO L J, WU Z. A study on the coherent composition of multiple laser beams [J]. Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(2): 66-69 (in Chinese).
 [2] WU B, LIU Y Z. Coherent combination of high power fiber laser beams

[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006 (8): 56-61 (in Chinese).

- [3] LI Y Z, FAN D Y. Beam combining of fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005 (9): 26-29 (in Chinese).
 [4] HOU J, XIAO R, JIANG Z F, *et al.* Coherent beam combination of three ytterbium fiber amplifiers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1585-1588 (in Chinese).
 [5] XIAO R, HOU J, JIANG Z F. Coherent combining of fiber lasers [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 516-518 (in Chinese).
 [6] THOMAS S. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam [J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12188-12195.
 [7] CHEO P K, LIU A, KING G G. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(5): 439-441.
 [8] HUO Y M, CHEO P K, KING G G. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6230-6239.
 [9] CORCORAN C J, PASCH K A. Self-Fourier functions and coherent laser combination [J]. J Phys, 2004, A37(37): L461-L469.
 [10] CORCORAN C J, DURVILLE F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. A P L, 2005, 86(20): 201118/1-201118/3.
 [11] XIAO B, ZHOU P, HOU J, *et al.* Effect of partial coherence of laser has on the irradiance distribution of coherent combining of fiber laser arrays in far field [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(2): 819-823 (in Chinese).
 [12] ZHOU P, HOU J, CHEN Z L, *et al.* Effect of partially coherence of high power fiber laser on coherent combination [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1254-1256 (in Chinese).
 [13] CAO J Q, LU Q S, HOU J, *et al.* Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 351-358 (in Chinese).
 [14] WANG Sh Y, LIN D Y, WANG Ch, *et al.* Recent progress of fiber beam combination [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 657-661 (in Chinese).
 [15] SHI X M, DOU R H, WANG C G, *et al.* Using Fourier optics to study features of combined beams in far field [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1942-1946 (in Chinese).
 [16] BOCHOVE E J, CHEO P K, KING G G. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. Opt Lett, 2003, 20(14): 1200-1202.
 [17] LIAO Y B. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 38-42 (in Chinese).
 [18] LI Y Z, QIAN L J, LU D Q, *et al.* Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(5): 957-963.

(上接第492页)

[3] ZHOU W J, YUAN Y H, ZHANG D Y, *et al.* Research on damage of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ film induced-by $1.06\mu\text{m}$ CW laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 76-81 (in Chinese).
 [4] TORRUELLAS W, CHEN Y M. High peak power ytterbium doped fiber amplifiers [J]. Proc SPIE, 2006, 6102: 6102ON/1-6102ON/7.
 [5] SETCHELL E B. Laser-induced damage studies on step-index, multi-mode fibers [J]. Proc SPIE, 1993, 1848: 15-23.
 [6] ZHAO X H, GAO Y, XU M J, *et al.* Experimental measurement of

pulsed-laser induced damage to fibers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(10): 1627-1631 (in Chinese).

- [7] GONG H, LI Ch F, CUI J W, *et al.* Optical damage study of materials with high repetitive laser pulses irradiation [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(2): 228-231 (in Chinese).
 [8] WANG T, ZHAO Y A, HUANG J B, *et al.* Accumulation effect of multi-shot laser-induced damage to optical coatings [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(s1): 171-174 (in Chinese).