

纳秒激光诱导石英光纤端面损伤特性研究*

赵兴海^{1)†} 高 杨¹⁾ 徐美健²⁾ 段文涛²⁾ 於海武²⁾

1) 中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

2) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2007 年 11 月 6 日收到, 2008 年 2 月 25 日收到修改稿)

实验研究了石英光纤的纳秒激光诱导损伤行为. 实验条件下全部为光纤端面损伤, 按照损伤形貌可以分为坑状损伤、熔融损伤和溅射损伤三类. 提出了光纤端面损伤的判断方法和损伤阈值的测试方法, 通过线性拟合得出实验条件下石英传能光纤的零概率损伤功率密度阈值为 3.85 GW/cm^2 . 总结了光纤端面损伤的过程, 分析了激光诱导光纤端面损伤机理, 指出光纤端面的杂质缺陷是造成光纤抗激光损伤能力下降的内因. 因此, 通过改善光纤端面质量还可较大程度提高光纤传输激光能量. 实验发现光纤注入端面损伤点几乎全部发生在端面中心区域, 这个现象是由于注入光斑中心点功率密度极高, 从而造成光斑中心点辐照区域损伤的概率大大增加. 因此, 通过光束匀化可以提高注入光纤激光能量, 减小光纤端面的损伤概率.

关键词: 激光诱导损伤, 高峰值功率, 光纤传能, 损伤阈值

PACC: 4281C, 4281D, 4285F

1. 引 言

在高功率激光光路设计中, 光学元件的损伤是限制激光功率提高的瓶颈^[1-8]. 激光光纤传输系统中, 最脆弱的部分为光纤. 激光起爆系统中激光的能量密度和功率密度都非常高^[8], 其值与石英光纤损伤阈值接近, 几乎达到石英光纤传输激光功率容量的极限. 因此, 研究光纤在高能量密度和高功率密度激光下的损伤特性, 不但具有较高的学术价值, 也是构建高效、可靠、安全的光纤传能系统的关键之一.

目前, 对 Nd:YAG 高峰值功率激光诱导光纤损伤特性研究的公开报道还较少. 国内, 文献[2]对 Nd:YAG 脉冲激光的光纤耦合与传输特性进行实验研究后得出: 光纤端面的灰尘会使激光损伤阈值成倍降低, 使用短焦透镜将激光注入光纤可以避免激光脉冲能量集中在少数几个低阶模上, 耦合对准对于提高光纤的损伤阈值有一定作用, 但是文献[2]对此没有给出合理的解释. 文献[3]通过对 XeCl 准分子高峰值功率脉冲(60 ns)激光诱导石英光纤的损伤

阈值研究结果指出, 光纤损伤全部发生在光纤端面, 光纤切割面的损伤阈值为 $7-10 \text{ J/cm}^2$, 研磨面为 $4.5-6 \text{ J/cm}^2$. 美国 Sandia 国家实验室开展了对光纤传输高峰值功率激光的研究. Setchell^[4,5]测量了实验用光纤的损伤阈值, 得到的主要结论如下: 未经 CO_2 激光预处理的光纤, 损伤的能量密度阈值为 185 J/cm^2 . 经过 CO_2 激光预处理的光纤, 损伤的能量密度阈值为 215 J/cm^2 . 光纤易损伤部位是光纤的输入输出端面、应力集中部位和初始输入段. 激光注入光纤的条件对光纤的损伤阈值影响很大, 使用短焦透镜注入激光可以提高光纤的激光损伤阈值, 主要原因是降低了光纤初始输入段的损伤概率. Allison 等^[6]实验研究发现: 使用短焦透镜注入激光可以提高光纤的激光损伤阈值, 大量的光纤损伤为光纤初始输入段损伤. Wood^[7]认为光纤传输激光能量的容量受到各种线性和非线性效应(包括受激拉曼散射和受激布里渊散射)的影响, 最终是由光纤的激光诱导损伤阈值决定的. 总之, 前人的研究已经对光纤损伤特性进行了初步的宏观把握, 而对更加深入的问题均没有涉及, 比如光纤损伤的判断标准、测试方法、损伤阈值获得、具体损伤形貌分析以及针对不同

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目(批准号: 2007A05001)、国防科技预研基金(批准号: 51305070402)和中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金(批准号: S20070202)资助的课题.

† E-mail: xinghaiustc@126.com

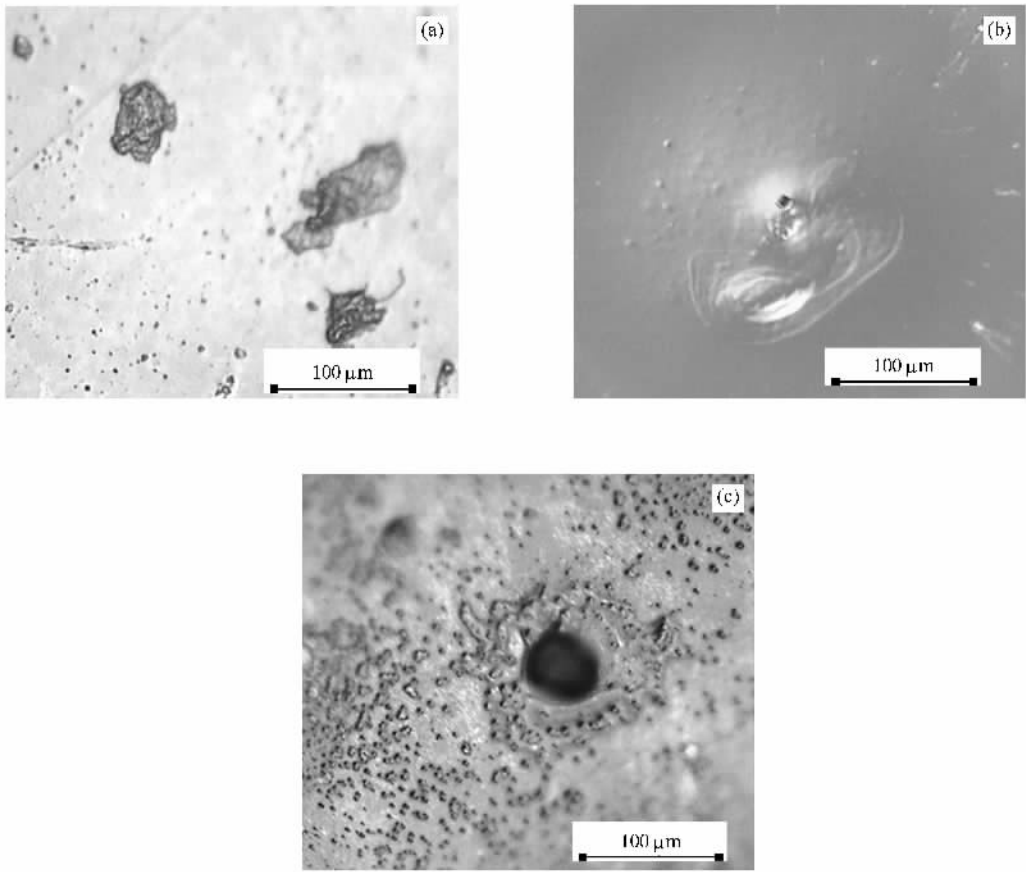


图3 光纤端面损伤形貌 (a)坑状损伤 (b)熔融损伤 (c)溅射损伤

溅射损伤(图3(c))一般发生在激光功率密度较高的情况下,为功率损伤类型,波及范围直径可达百微米甚至数百微米,类似于“火山喷发”。它可能是缺陷晶核受激光辐照后产生等离子体喷溅形成,其形状和熔融损伤类似,只是附近微小区域内有等离子体喷溅烧蚀形成的粗糙疤面。溅射损伤使光学元件的表面散射增大。

3.2. 光纤端面损伤阈值

实验采用 N-ON-1 方式测试单根光纤的激光损伤阈值,再采用 1-ON-1 方式统计这种类型光纤在某脉冲能量下的损伤概率,最后用作图法或拟合法反推出光纤在零损伤概率下的能量密度或功率密度^[10],即为光纤损伤阈值。

激光等离子体点燃的经验判据为^[11]

$$P^{2/3} t^{0.5} \lambda^{0.36} > (0.95-1.5) \times 10^2, \quad (1)$$

式中 P 为入射激光功率密度,单位为 W/cm^2 ; t 为脉冲宽度,单位为 s ; λ 为波长,单位为 μm 。

由(1)式可知,激光等离子体点燃只与激光本身的参数有关。实际上,激光等离子体点燃还与靶表面

特性(如缺陷、杂质、环境等)有关。强激光辐照下,激光作用于靶产生等离子体时伴随有等离子体闪光,损伤形貌表现为熔融型或炸裂型,并且根据下面的分析光纤端面发生灾难性损伤的根本原因是等离子体的产生,因而可用等离子体闪光作为光纤端面损伤的客观依据^[9-11]。因此,我们主要采用等离子体闪光法和显微镜观察法相结合对光纤损伤进行直观、方便的判断^[10]。

这里可以近似认为透镜聚焦后的光斑能量是高斯型分布(如图2),注入光斑的有效面积为^[12]

$$A_{\text{eff}} = \frac{Q}{E_0} = \frac{\pi w_0^2}{2}, \quad (2)$$

式中 w_0 为光斑能量密度降为峰值的 $1/e^2$ 时的光斑半径, Q 为光斑内总能量, E_0 为峰值能量密度。

通过对芯径为 $400 \mu\text{m}$ 的石英包层阶跃折射率多模石英光纤损伤阈值测量,获得损伤概率曲线^[8],进行线性反推得到光纤的零概率损伤阈值为 9.4 mJ ,零概率损伤能量密度为 $58.6 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。光纤损伤全部为端面损伤。利用 200 倍相衬显微镜观察光纤端面,发现有明显的损伤点,如图4(b)所示。

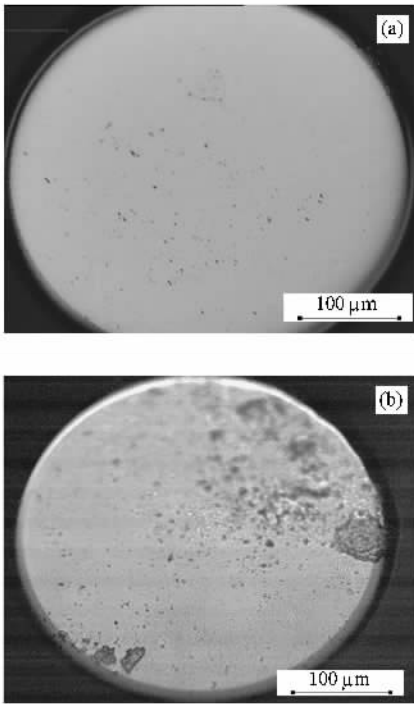


图4 光纤端面损伤前后对比 (a)损伤前 (b)损伤后

4. 实验结果分析

4.1. 损伤过程

在光纤的激光诱导损伤实验中,采用 N-ON-1 加载方式,这个过程相当于激光预处理.随着辐照激光能量的增大,光纤端面可能发生损伤的过程如下:(1)当激光脉冲能量很小时,端面无任何变化.(2)当激光脉冲能量稍微增大后,端面发生微小变化,小部分杂质和缺陷消失,光纤表面变“干净”了.(3)激光脉冲能量继续增大,端面出现明显坑状损伤点,但不影响光纤的传能性能.(4)激光脉冲能量进一步增大,出现局部熔融现象,表面发生小形变.(5)当激光脉冲能量达到损伤阈值后产生等离子,伴有等离子闪光和响声,光纤输出激光能量下降.(6)继续辐照激光脉冲,出现严重的熔融现象或喷溅现象,光纤表面受到严重破坏.前两个过程可以视为激光预处理的等效过程;中间的两个过程根据具体的损伤点大小,定义为损伤或者非损伤;最后两个过程为灾难性损伤.

4.2. 损伤机理

本文的激光诱导光纤损伤实验全都为光纤端面

损伤,在光纤输入口附近(此处功率密度可以认为与输入端面功率密度相近)和初次发射区(此处功率密度可能远远大于输入端面激光功率密度)^[13]均未发现损伤迹象.这个结果说明光纤端面的损伤阈值远低于体损伤阈值,也说明光纤端面质量还有很大的改善空间.光纤激光诱导损伤阈值降低的根本原因是光纤端面的杂质缺陷.

激光引起光纤端面光学性质变化的主要机理为热效应、自由载流子的光学产生效应和场效应.热效应主要导致光纤端面的熔融和形变;自由载流子的光学产生效应导致等离子体的产生和吸收系数的增大,最终引起爆炸性的材料损伤.场效应主要引起各种非线性效应,包括自聚焦和多光子吸收.

根据上述的实验结果分析,我们认为导致光纤端面发生灾难性损伤的直接原因是等离子体的产生.当光纤端面有等离子体闪光出现,说明在激光辐照区产生了电子崩击穿.根据从早期的直流电子崩击穿概念引入的光学材料破坏的电子崩模型对光纤端面等离子体溅射损伤进行了分析.该模型可以描述如下:介质原子中某个电子可通过吸收入射激光能量而加速,如果吸收的能量足够大,这个导带电子可能与价电子碰撞而使其离化,因此一个导带电子就变成了两个.重复这一电子倍增过程,导带电子数将急剧增加,直到在样品局部区域形成强烈吸收激光的等离子体,然后通过等离子体与后续激光的相互作用,使得初始损伤发展为宏观的灾难性破坏^[14].

电子崩击穿模型假设预先存在少量的自由电子,电介质材料内含有的金属杂质、缺陷、杂质离子或电子缺陷等都能提供自由电子.文献[14]中采用半定量处理方法得到近似解.对于宽带隙介质,损伤时的激光电场强度阈值 E_{th} 为

$$E_{th}^2 = \frac{6E_g m^2 V_s}{kT e^2} \left(\omega^2 + \frac{E_g}{mL_{ac}^2} \right) \frac{1}{\ln(t_p / M\theta)}, \quad (3)$$

式中 V_s 为固体中的声子速度, L_{ac} 为电子-声子的碰撞平均自由程, M 为再生的电子数, t_p 为激光脉冲宽度, $E_g / (mL_{ac}^2)$ 为电子-声子碰撞频率的平方, θ 为材料参数和电场强度的函数, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, e 为电子电荷, m 为电子质量, ω 为激光频率.

激光与光纤端面作用时,由于初始阶段的激光热作用,引起光纤端面及其亚表层处的缺陷和杂质熔化和气化,导致光纤端面坑状损伤和轻微熔融损伤.随着自由电子迅速增多,当自由电子和离子浓度

增加到一定数量后,将产生光学击穿,形成等离子体.等离子体继续吸收后续的激光能量,自身温度急剧升高,到过热状态后体积将迅速膨胀,形成冲击波.因此,激光等离子体及其冲击波对光纤端面同时存在热破坏和机械破坏,由于高温等离子体的热破坏和向外膨胀,就形成了类似“火山口”的严重熔融损伤或者炸裂损伤.在等离子体向外膨胀喷溅过程中,可能伴随着大量的高温熔融物抛撒,在光纤端面形成麻点状的大面积溅射损伤.大量等离子体也可以由多光子电离生成.多光子电离机制和电子崩电离机制有一定的相似性,都是因为导带电子数剧增导致电介质材料初始损伤的形成,只不过这里引起导带电子数剧增的原因是价带电子对激光的多光子吸收^[15-17].入射激光的光子能量约为固体材料带隙能量的 1/3 时,多光子吸收会对价带电子的电离过程产生重要作用.但是发生多光子吸收要比雪崩电离困难得多.常用多光子吸收的电离率方程为^[18]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{2\omega}{9\pi} \left(\frac{m\omega \sqrt{1+\gamma^2}}{\hbar\gamma} \right)^{3/2} Q \left(\gamma \frac{\tilde{E}_g}{\hbar\omega} \right) \times \exp \left\{ \frac{-\pi \frac{\tilde{E}_g}{\hbar\omega} + 1 \left[K \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) - E^* \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) \right]}{E^* \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right)} \right\} \quad (4)$$

这里 $\gamma = \omega \sqrt{mE_g} / (eE)$, \cdot 表示其中的整数部分, K 和 E^* 分别为第一类和第二类完全椭圆积分, \hbar 为 Planck 常数除以 2π . 能隙带宽 \tilde{E}_g 可表示为

$$\tilde{E}_g = \frac{2E_g}{\pi} \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{\gamma} E^* \left(\frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) \quad (5)$$

函数 Q 可表示为

$$Q(\gamma, \kappa) = \left[\frac{\pi}{2} K \left(\frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) \right]^{3/2} \times \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left\{ \frac{-\pi n \left[K \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) - E^* \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) \right]}{E^* \left(\frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right)} \right\} \times \Phi \left\{ \left[\frac{\pi^2 (2x+1-2x+n)}{2K \left(\frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right) E^* \left(\frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} \right)} \right]^{1/2} \right\} \quad (6)$$

式中

$$\Phi(z) = \int_0^z e^{y^2 - z^2} dy$$

为 Dawson 积分.

当 $\gamma \gg 1$ 时,一般情况下 $\frac{e^2 E^2}{4m\omega^2 E_g} \ll 1$ (4) 式可以简化为

$$J \propto \frac{t_p}{t_p (E_g / (\hbar\omega)) + 1} = t_p^{1-K(E_g / (\hbar\omega) + 1)} \quad (7)$$

式中 J 为电离激光能量密度.由(7)式得出,当 $E_g \ll \hbar\omega$ 时,激光损伤阈值与激光脉冲宽度无关;当 $E_g \gg \hbar\omega$ 时,发生多光子吸收过程,损伤阈值与激光脉冲宽度呈线性关系.一般而言,随着入射激光频率的增加,损伤阈值将降低^[12].

另外,光纤端面或内部的微小缺陷(如小坑、划伤、气泡等)都会使光纤局部的电场增大引起电场击穿,造成光纤的损伤.根据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得到^[3]:对于石英光纤,这三种缺陷分别使光纤的损伤阈值降至原来值的 0.25、0.54、0.23 倍.但当缺陷的线度小于 30 nm 后,静电连续理论成立,缺陷区域的电场集中受限,因此对光纤损伤阈值的影响很小.利用端面抛光、激光预处理等技术减小光纤端面的缺陷或杂质的数量和大小有利于提高光纤抗激光损伤能力.

4.3. 光纤输入端面中心损伤现象

这次激光诱导光纤损伤实验共测量了 15 根光纤,其中有 9 根光纤的输入端面发生了比较严重的熔融损伤和溅射损伤,并且它们全部发生在光纤端面的中心附近(图 5).假设实验中激光和光纤基本对准,考虑到注入光斑能量为高斯分布(如图 2 所示).由此可以得出:在光纤端面缺陷分布均匀的情况下(至少在入射光斑范围内),光纤端面上某点发生损伤的概率与该处的激光功率密度成正比.这为我们提供了一个思路:可以通过匀化注入光斑的能量分布,也就是减小注入光斑的峰值功率密度与平均功率密度的比值,从而可避免端面损伤“木桶效应”的出现,增大了注入激光的能量.

对光纤输出端面损伤特性的研究恰恰可以证明我们对光纤输入端面中心损伤现象的解释及光束匀化的作用.在我们的实验中,光纤输出端面全部发生了坑状损伤(图 6),没有出现熔融损伤和溅射损伤这样的严重点状损伤.首要的原因是由于激光经过光纤传输一定的距离后,传输损耗使输出激光能量降低,而且各激光模式得到充分的耦合,输出光束截面能量分布被匀化.因此,光纤输出端面只发生了对

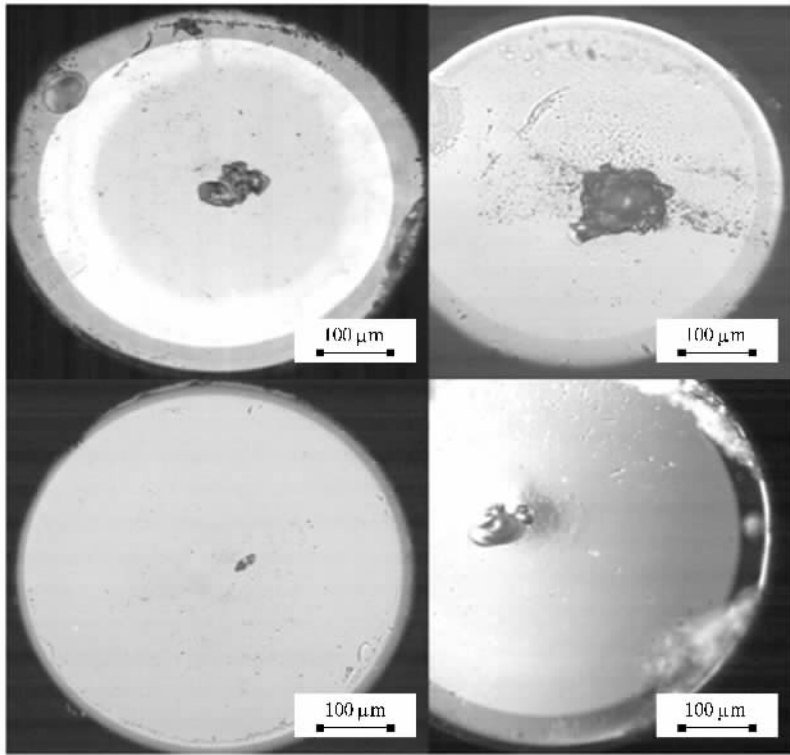


图 5 光纤输入端面中心的损伤显微镜照片

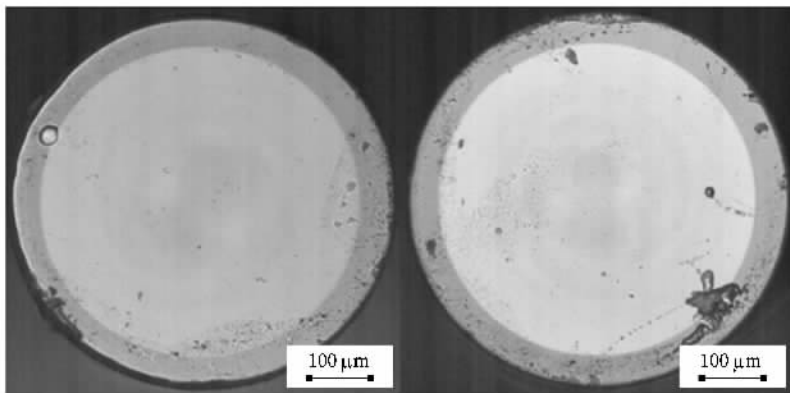


图 6 光纤输出端面的损伤显微镜照片

光纤传输激光能量影响很小的坑状损伤,主要分布在光纤输出端的纤芯与包层界面处和纤芯周边,而这些部位是缺陷分布密度较大的地方.这说明在激光功率密度分布均匀的情况下,首先损伤的部位发生在缺陷密集处,亦即此时的光纤端面某微小区域内发生损伤的概率与此处的缺陷分布密度成正比,此时缺陷密度分布决定损伤点位置.光纤端面中心损伤现象及其分析对高功率激光注入光纤耦合装置的设计有重要的指导意义.只要得知光纤与激

光的对准情况,就可以推断出可能出现严重损伤点的位置.

5. 结 论

1) 光纤端面质量是限制光纤传输高功率激光容量的主要因素之一.光纤端面易发生损伤,光纤端面损伤形貌根据损伤程度可以分为坑状损伤、熔融损伤和溅射损伤.

2) 杂质粒子、小孔洞、微粒等缺陷以一定的概率密度分布在光纤端面及其亚表层,它们是造成光纤端面激光损伤阈值低于体损伤阈值的主要原因.减少或消除缺陷就可以提高光纤的损伤阈值.对光纤端面进行精密抛光、仔细清洁、合理的激光预处理等措施可以大大减少有害尺寸的杂质颗粒,是提高光纤端面抗激光损伤的有效途径.

3) 由于注入光斑中心点功率密度极高,从而造成光斑中心点处损伤的概率大大增加,在光斑辐照范围内光纤输入端面其他易损伤点还远远未达到损伤阈值的情况下,光斑中心区域就发生了损伤,降低

了注入激光能量.

4) 在激光辐照功率密度较高且分布不均匀情况下,光纤端面某点的激光功率密度决定此处的损伤概率,在激光功率密度分布均匀情况下,光纤端面缺陷密度分布决定首先损伤点位置.

通过激光诱导光纤损伤实验分析可知,光纤端面损伤机理非常复杂,对光纤其他损伤部位的实验研究还依赖于光纤端面损伤问题的解决.因此,研究光纤端面损伤机理和提高光纤端面损伤阈值是今后进一步研究高峰值功率脉冲激光诱导光纤损伤特性的关键.

- [1] Chen X Q, Zhu X T, Zheng W G, Jiang X D, Lü H B, Ren H, Zhang Y Z, Liu C M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1206 (in Chinese) [陈习权、祖小涛、郑万国、蒋晓东、吕海兵、任 襄、张艳珍、刘春明 2006 物理学报 **55** 1206]
- [2] Chen J X, Wang A, Zheng R, Tang C J, Huo C Z, Xie H M 1994 *Chin. J. Quantum Electron.* **11** 144 (in Chinese) [陈吉祥、王安、郑 荣、唐传经、霍长征、谢海明 1994 量子电子学 **11** 144]
- [3] Xu S X, Li X S, Zhang G X 1994 *Chin. J. Lasers A* **21** 645 (in Chinese) [徐世祥、李锡善、张国轩 1994 中国激光 **A 21** 645]
- [4] Setchell R E 1992 *Proc. SPIE* **1624** 56
- [5] Setchell R E 1997 *Proc. SPIE* **2966** 608
- [6] Allison S W, Gillies G T, Magnuson D W, Pagano T S 1985 *Appl. Opt.* **24** 3140
- [7] Wood R M 1996 *Proc. SPIE* **2267** 457
- [8] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2007 *Proc. SPIE* **6825** 682516
- [9] Liang L P, Zhang L, Sheng Y G, Xu Y, Wu D, Sun Y H, Jiang X D, Wei X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3596 (in Chinese) [梁丽萍、张 磊、盛永刚、徐 耀、吴 东、孙予罕、蒋晓东、魏晓峰 2007 物理学报 **56** 3596]
- [10] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Zhao X, Yu H W 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1627 (in Chinese) [赵兴海、高 杨、徐美健、段文涛、赵 翔、於海武 2007 强激光与粒子束 **19** 1627]
- [11] Lu J, Ni X W, He A Z 1996 *Interaction Physics of Laser with Materials* (Beijing : Mechanical Industry Press) pp65, 75 (in Chinese) [陆 建、倪晓武、贺安之 1996 激光与材料相互作用物理学 (北京 机械工业出版社) 第 65, 75 页]
- [12] Yang J X, Zhuang Y F, Shen W X, Lin Z Q 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1263 (in Chinese) [杨镜新、庄亦飞、沈卫星、林尊琪 2004 强激光与粒子束 **16** 1263]
- [13] Zhao X H, Gao Y, Cheng Y S 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1987 (in Chinese) [赵兴海、高 杨、程永生 2007 强激光与粒子束 **19** 1987]
- [14] Sun C W 2002 *Effect of Laser Irradiating* (Beijing : National Defense Industry Press) pp283—285 (in Chinese) [孙承纬 2002 激光辐照效应 (北京 国防工业出版社) 第 283—285 页]
- [15] Yu B H, Dai N L, Wang Y, Li Y H, Ji L L, Zheng Q G, Lu P X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5821 (in Chinese) [余北海、戴能利、王 英、李玉华、季玲玲、郑启光、陆培祥 2007 物理学报 **56** 5821]
- [16] Deng Y P, Jia T Q, Leng Y X, Lu H H, Li R X, Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2216 (in Chinese) [邓蕴沛、贾天卿、冷雨欣、陆海鹤、李儒新、徐至展 2004 物理学报 **53** 2216]
- [17] Li X X, Jia T Q, Feng D H, Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2154 (in Chinese) [李晓溪、贾天卿、冯东海、徐至展 2004 物理学报 **53** 2154]
- [18] Gan R B 2002 *M. S. Thesis* (Chengdu : Sichuan University) pp16—18 (in Chinese) [甘荣兵 2002 硕士论文 (成都 四川大学) 第 16—18 页]

Studies on nanosecond laser induced damage to fused fibers^{*}

Zhao Xing-Hai^{1)†} Gao Yang¹⁾ Xu Mei-Jian²⁾ Duan Wen-Tao²⁾ Yu Hai-Wu²⁾

1) *Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

2) *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 6 November 2007 ; revised manuscript received 25 February 2008)

Abstract

The properties of high-peak pulsed laser induced damage to fibers have been investigated by damage experiments. It was found that all of damaged parts are located on fiber endings, and the damage topography fall into three classes: the pit damage, fusion damage and sputtering damage. The experimental setup of laser induced damage to fibers, fiber damage judgment criterions and data processing methods were developed and validated. The zero probability damage threshold was calculated by linear fitting to be 3.85 GW/cm^2 . The processes of laser induced damage to fibers were summarized and the fiber end face damage mechanism was studied. The experimental results indicated that the main factor that makes the fiber end faces susceptible to laser induce damage is the existence of surface imperfections. The nanosecond laser induce damage to fiber end faces are detected experimentally; the central areas of input end faces are damaged probably because the input laser beam is Gaussian. So the use of uniform beam for injecting the fiber is favorable to the laser-induced damage resistance.

Keywords: laser induced damage, high-peak power, fiber delivery power, damage threshold

PACC: 4281C, 4281D, 4285F

^{*} Project supported by the Key Program of Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2007A05001), the Advanced Research Foundation for National Defence Science and Technology of China (Grant No. 51305070402) and the Science and Technology Innovation Foundation of Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics (Grant No. S20070202).

[†] E-mail: xinghaiuestc@126.com