

光纤端面 Nd:YAG 激光诱导损伤分析

赵兴海 高 杨 苏 伟 程永生

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 采用 Nd:YAG 激光对全石英多模光纤进行激光诱导损伤实验,结果全部为光纤端面损伤,主要是由光纤端面的杂质缺陷引起的。通过对激光损伤形貌的分析,明确光纤端面损伤机理。采用 Matlab 对光纤损伤端面进行图像处理,获得光纤端面损伤点的大小、出现频率和位置分布的统计特性。通过分析发现,光纤端面损伤点位置分布服从一定的规律,光纤前端面和后端面不同;光纤端面不同大小损伤点出现频率服从高斯分布;注入激光特性参数决定光纤前端面损伤特性,光纤传能特性以及光纤端面质量决定其后端面损伤特性。

关键词 物理光学; 激光损伤; 光纤端面; 损伤形貌; 图像处理; 统计分布

中图分类号 TN249; O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0923

Analysis on the Nd:YAG Laser-Induced Damage to Fiber End Faces

Zhao Xinghai Gao Yang Su Wei Cheng Yongsheng

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The experiments of high peak pulsed laser-induced damage to fused-silica fibers have been carried out. The experimental results show that all the damage sites accrued on the fiber end-faces. The morphologies of damaged fiber end faces are observed and recorded using metallurgical microscope. Micrographs of fiber end faces are processed using a Matlab program; the distribution characterizations of damaged sites on fiber end faces are obtained. According to the computing results, we find that the damage sites distribution obey certain regularities, which are different between on the input end faces and on the output end faces; The sizes of damaged sites obey normal distribution; The location distribution of damaged sites is strongly related to input or output laser characterization; The morphologies of damaged fiber end faces are strongly related to the mechanism of laser-induced damage to fiber end faces.

Key words physical optics; laser-induced damage; fiber end faces; damage morphology; image processing; statistical distribution

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^[1~9]。在激光光纤传输系统中,最脆弱的部分为光纤。在激光起爆系统中激光的能量密度和功率密度都非常高^[3,4],其大小与石英光纤端面损伤阈值接近,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。

大量的实验研究表明光纤前端面最易损伤,是由光纤端面缺陷、瑕疵、杂质微粒等较多以及易受周围环境污染等因素决定的^[2~6]。光纤端面的损伤阈值决定了光纤传输高功率激光容量。本文主要对光纤端面损伤机理进行了分析,并采用图像处理手段,研究了光纤端面损伤特性,包括损伤点的大小、损伤点分布以及不同大小损伤点出现频率等统计特性。

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国防科技预研跨行业基金(51305070402)、总装引信基金(9140A05070208ZW0502)、中国工程物理研究院科学技术发展基金重点课题(2007A05001)和中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金(S20070202)资助课题。

作者简介: 赵兴海(1984—),男,硕士,主要从事光纤传能和微电子机械系统等方面的研究。

E-mail: xinghaiuestc@126.com

2 激光诱导光纤端面损伤

2.1 实验条件

实验采用调 Q Nd:YAG 脉冲激光器,波长为 1064 nm,脉宽为 25 ns(FWHM),最大输出单脉冲能量可达 200 mJ,激光束的光束质量 $M^2 \approx 1.7$,高斯光束输出;实验用光纤为国产阶跃折射率多模石英光纤,光纤端面经过精密抛光,芯径为 400 μm ,长度为 2 m 或 5 m,数值孔径 NA 为 0.22^[10]。

光纤的激光诱导损伤测试^[10],采用 N-on-1 的加载方式。激光能量由小到大,激光束以相同的时间间隔多次辐照在元件的同一点上,直到该点发生损伤。损伤发生前,这个过程可以认为是激光预处理,它有两个作用:一是激光的老化效应,即在无缺陷部位激光预处理后,损伤阈值大幅度提高。激光损伤时损伤创面在相同能量(功率)密度的激光辐照作用下,与未经过激光预处理的相比大幅度提高;二是存在缺陷时的激光清除机制。激光预处理可以去除光纤端面部分小的杂质和缺陷,特别是对结瘤缺陷的激光清除,在预处理过程中,使其形成较小的孔洞等轻微创面,而坑状损伤的抗激光再损伤能力较强,这就避免了结瘤缺陷在远大于其损伤阈值的能量密度下造成光纤端面灾难性损伤,从而提高了光纤的抗激光损伤能力。整个过程可能伴有偶然的微弱火花现象。实验中以光纤端面发生强烈的等离子体闪光作为光纤端面发生功能性损伤的判据。

2.2 实验结果

对损伤后的光纤端面采用显微镜观测。发现光纤前端面容易出现中心损伤现象,且多表现为较严重的熔融损伤,其典型损伤形貌如图 1(a)所示;而光纤输出端面损伤多表现为众多小“烧蚀坑”,分布较为均匀,其典型损伤形貌如图 1(b)所示。

激光引起光纤端面光学性质变化的主要机理为:热效应和自由载流子的光学产生效应、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;而对于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。光学元件表面存在杂质和缺陷时极易对第二种效应进行“放大”。

根据实验得到的光纤端面损伤形貌,可以推断,在纳秒级高峰值功率激光辐照下,3 种效应均起作用,但起主导作用的是自由载流子的光学产生效应。光纤损伤几乎全部为端面损伤,并且约有 50% 以上出现的是等离子体损伤形貌,而几乎全部光纤端面功

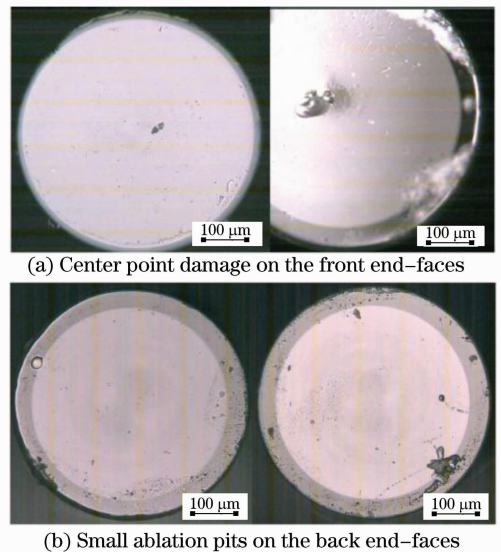


图 1 光纤端面典型损伤形貌

Fig. 1 Typical damage morphologies of fiber end faces
能性损伤是由于等离子体产生引起的。高功率激光通常为短脉冲激光,脉冲宽度为 10~30 ns,它对光纤端面的损伤是瞬间完成的。高功率激光对光纤端面的损伤,主要起因于光学击穿。电子雪崩电离时,导带电子随激光电场振荡,获得与带隙相等的能量,随后发生的冲击电离将另一个价电子送进导带,因此形成光学击穿。

导致光纤端面发生灾难性损伤的直观原因是等离子体的产生。当光纤端面有等离子体闪光的出现,说明在激光辐照区产生了电子崩击穿。根据 Yablonoitch 和 Bloembergen 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^[11]。该模型可以描述为: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。重复上面的电子倍增过程,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。

3 图像处理分析

为了迅速准确地获得损伤的光纤端面损伤点统计特性,采用 Matlab 软件对图像进行处理的办法来获得。将图像[图 2(a)]转化成二值图像,如图 2(b)所示;通过自编的程序进行图像识别获得损伤点的大小、损伤面积比、位置等信息。在图形统计

中,通过分析损伤点的面积和整个光学元件的面积,可以得到损伤点的面积与总面积的比值,定义光纤端面的损伤面积比 η 为

$$\eta = S_D/S_F,$$

式中 S_D 为损伤点的面积, S_F 为光纤端面的面积。

分别对光纤前端面和后端面损伤图像进行分析。其中较典型的如图 2(a)和图 3(a)所示。经过图像处理后发现,对于光纤前端面,具有很明显的中心损伤点现象,它是由于注入激光能量为高斯分布,光斑中心点的激光功率密度很高,容易导致光斑中心点发生严重的熔融损伤。图 2(a)中中心损伤点

的损伤面积占据了光纤端面的 5.88%,而光纤端面总的损伤面积为 7.16%。图 2(c)表示了不同线度的损伤点出现的频率,由此可知,边长(假设损伤点为正方形)约为 $2 \mu\text{m}$ 的损伤点数量最多,除了中心损伤点外损伤点的大小一般小于 $20 \mu\text{m}$,并且近似服从高斯分布。由图 2(d)可以看出,光纤前端面损伤点的位置分布服从高斯分布,原因为注入激光能量分布为高斯分布。即在光纤端面抛光良好、缺陷分布均匀的情况下,光纤端面出现损伤点的概率与此处的激光能量密度或功率密度有关。

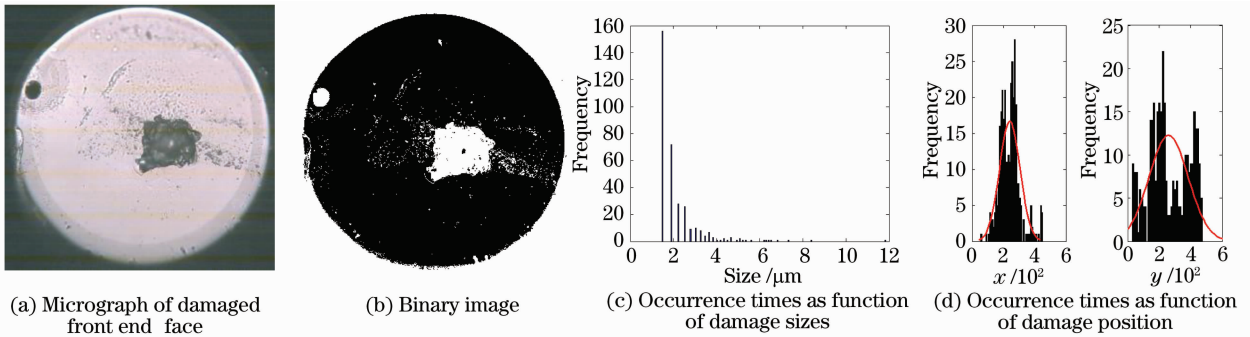


图 2 光纤前端面损伤图像处理结果

Fig. 2 Results of fiber front end-face image processing

光纤后端面损伤与光纤前端面损伤存在很大的差异。光纤后端面损伤点多表现为较小的坑状损伤,分布较为均匀或者多分布在光纤芯与包层交界

区域,典型情况如图 3(a)所示。损伤面积比为 2%,小于前端面损伤面积比。损伤点的特征尺寸(即边长)一般在 $20 \mu\text{m}$ 以内,近似服从高斯分布,出现频

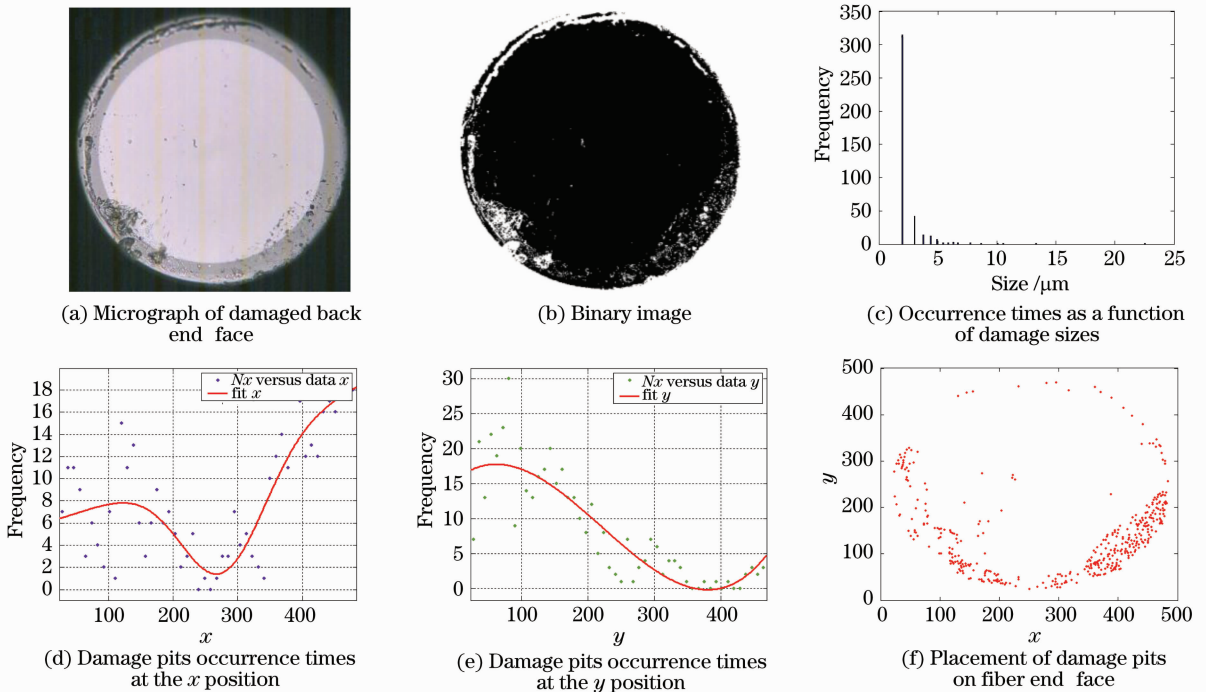


图 3 光纤后端面损伤图像处理结果

Fig. 3 Results of fiber back end-face image processing

率最高的损伤点特征尺寸约为 $2\ \mu\text{m}$, 与前端面相同, 如图 3(c) 所示。但是, 不同位置出现的损伤特性与前端面有很大的区别, 如图 3(d) 和图 3(e) 所示, 损伤点大量出现在光纤芯边缘地带, 近似为 v 形分布。这与光纤传输激光能量特性有很大的关系。根据前期的研究^[12], 单模高斯激光经过一定长度的多模光纤传输后, 由于模式耦合激光能量分布被匀化, 有的甚至到包层中传播。因此, 光纤输出端面激光能量分布近似为平顶分布。由于光纤纤芯与包层交界处的缺陷较多, 产生损伤点多, 如图 3(f) 所示。

4 结 论

激光诱导光纤损伤主要发生部位为光纤端面。光纤端面损伤机理主要有热效应、自由载流子的光学产生效应、场效应。对于光纤传输纳秒 Nd:YAG 激光, 光纤发生原理性损伤主要是由于自由载流子的光学效应导致的。光纤端面损伤特性具有一定的规律性, 它与激光特性和光纤端面质量有关。光纤前端面损伤主要表现为比较严重的中心点损伤形貌, 光纤后端面损伤主要表现为分布小坑状损伤, 分布主要集中在纤芯和包层界面区域。出现频率最高的损伤点特征尺寸约为 $2\ \mu\text{m}$ 。激光诱导光纤损伤具有一定的随机性和规律性, 采用图像处理和数据统计的方法来获得光纤端面损伤特性, 具有较大潜力, 并且有助于研究光纤端面损伤机理。

参 考 文 献

- 1 Chen Jixiang, Wang An, Zheng Rong *et al.*. Characteristics of Q-switched Nd:YAG pulsed laser-multimode fiber coupling and transmission system[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1994, **11**(3): 144~149
陈吉祥, 王安, 郑荣等. 调 Q Nd:YAG 脉冲激光-光纤耦合

- 与传输特性的研究[J]. 量子电子学, 1994, **11**(3): 144~148
- 2 Xu Shixiang, Li Xishan, Zhang Guoxuan. The XeCl excimer laser induced damage properties of the UV silica fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(8): 645~648
徐世祥, 李锡善, 张国轩. 紫外石英光纤 XeCl 准分子激光感光破坏特性的实验研究[J]. 中国激光, 1994, **A21**(8): 645~648
- 3 R. E. Setchell. An optimized fiber delivery system for Q-switched Nd:YAG lasers[C]. *SPIE*, 1997, **2966**: 608~618
- 4 R. E. Setchell. Laser-induced damage studies on step-index, multimode fibers[C]. *SPIE*, 1992, **1624**: 56~61
- 5 S. W. Allison, G. T. Gillies, D. W. Magnuson *et al.*. Pulsed laser damage to optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(19): 3140~3145
- 6 R. M. Wood. Summary of the factors affecting the power and energy capabilities of optical fibers[C]. *SPIE*, 1996, **2267**: 457~467
- 7 Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian *et al.*. Characteristics of high-peak pulsed laser induced damage to fibers [C]. *SPIE*, 2007, **6825**: 682516
- 8 Liang Liping, Zhang Lei, Sheng Yonggang *et al.*. Studies on the laser-induced damage resistance of sol-gel derived $\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2$ composite high refractive index films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(6): 3596~3601
梁丽萍, 张磊, 盛永刚等. 溶胶-凝胶 $\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2$ 高折射率光学膜层的抗激光损伤性能研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(6): 3596~3601
- Huang Jin, Lü Haibing, Ye Lin *et al.*. Damage threshold improvement of fused silica chip by CO_2 laser pretreatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 723~726
黄进, 吕海兵, 叶琳等. 利用 CO_2 激光预处理提高熔石英基片的损伤阈值[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 723~726
- 10 Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian *et al.*. Experimental methods of pulsed laser induced damage to fibers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1627~1631
赵兴海, 高杨, 徐美健等. 脉冲激光诱导光纤损伤实验方法[J]. 强激光与离子束, 2007, **19**(10): 1627~1631
- 11 Sun Chengwei. Effect of Laser Irradiating[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 283~285
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 283~285
- 12 Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian *et al.*. Study on power delivery characteristics of fibers for high peak power pulse laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 444~448
赵兴海, 高杨, 徐美健等. 高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性研究[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(3): 444~448