

文章编号: 0258-7025(2010)08-1934-05

大芯径光纤传输兆瓦级 Nd:YAG 激光脉冲实验

赵兴海¹ 胡建平² 高 杨¹ 马 平² 谭 刚¹ 吴嘉丽¹

(¹ 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)
(² 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 实验研究了芯径为 600 μm 的全石英光纤传输脉宽为 5 ns, 波长为 1064 nm 的高峰值功率脉冲激光的传输特性。采用 N-ON-1 测试方法, 获得光纤损伤阈值和光纤传能特性曲线。光纤 50% 概率损伤阈值为 24 mJ, 平均输出激光能量达到 14 mJ, 峰值功率接近 3 MW。可将光纤传能特性曲线分为 3 个过程: 未损伤段(平稳传输段)、光纤端面等离子体击穿段(非平稳传输段)和光纤体损伤段(传输截止段)。分析了光纤损伤形貌和损伤机理。研究表明, 同时提高光纤端面等离子体击穿阈值和光纤初始输入段损伤阈值是提高光纤传能容量的关键。

关键词 光纤光学; 光束传输; 激光损伤; 高峰值功率激光

中图分类号 TN253; TN012 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1934

Experiment on Delivery of Megawatt Nd:YAG Laser Pulses by Large-Core Optical Fibers

Zhao Xinghai¹ Hu Jianping² Gao Yang¹ Ma Ping² Tan Gang¹ Wu Jiali¹

(¹ Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract The experimental study on transmission characteristics of high-peak power laser pulses with width of 5 ns and wavelength of 1064 nm via all-silica fibers with core diameter of 600 μm are demonstrated. According to N-ON-1 test mode, the laser induced fiber damage threshold and transmission efficiency curve are obtained. The 50% probability damage threshold is 24 mJ, the average output energy is 14 mJ, and the peak power approaches to 3 MW. The three processes of fiber delivery high-peak power laser pulsed are presented, which are undamaged stage (steady state), laser-induced plasma stage (unsteady state) and laser-induced fiber core damage stage (transmission cut-off). The damaged morphologies and damage mechanism are investigated. The synchronous increases of laser induced plasma threshold and entry damage threshold can improve optical fiber capability for high power laser delivery.

Key words fiber optics; laser beam delivery; laser damage; high-peak power laser

1 引 言

光纤传输高能高功率激光具有柔性好、安全性高、坚固耐用等优点, 在激光加工、光纤探测、光纤激光器和激光点火等方面有重要的应用价值^[1~11]。目前, 传输高功率的 Nd:YAG 脉冲激光普遍采用大芯径的全石英阶跃折射率光纤, 芯径在 0.4~1 mm 之间。随着光纤技术的发展, 采用光子晶体

光纤、空芯光纤传输高功率激光的研究也已广泛地展开^[4,5], 但是光子晶体光纤、空心光纤等特种光纤由于受到制造工艺和加工材料的限制仍然存在传输损耗大、弯曲损耗明显、柔韧性差和价格昂贵等缺点。因此, 采用大芯径石英光纤传输高功率激光仍然是目前进行高能光纤传输系统设计的首选。前期的实验研究表明, 光纤前端面最易损伤, 这是由

收稿日期: 2009-11-10; 收到修改稿日期: 2010-01-04

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, 助理研究员, 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

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^[6,7]。光纤端面损伤阈值是限制光纤传能容量的主要因素。另外,光纤初始输入端、弯曲部分等也是经常损伤的部位。因此,如何提高光纤抗激光损伤能力和对光纤损伤过程的研究显得尤为重要。美国圣迪亚国家实验室对石英光纤传输 Nd:YAG 脉冲激光特性进行了较多实验研究^[8,9]。实验激光脉宽为 13~16 ns,分析了激光诱导光纤损伤的主要模式,获得了激光诱导光纤损伤阈值;实验证明了光纤端面抛光、激光预处理可以提高光纤端面损伤阈值。S. W. Allison 等^[1]实验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。B. Richou 等^[2]认为光纤端面损伤是由激光诱导电击穿引起的,光纤端面损伤阈值与注入激光能量分布密切相关。R. M. Wood^[10]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(包括拉曼散射和布里渊散射)的影响,但根本上是由光纤的激光诱导损伤阈值决定的。国内对光纤传能特性的研究相对还较少,陈吉祥等^[11]开展了关于 Nd:YAG 脉冲(10 ns)激光的光纤耦合传输特性实验,获得了塑料包层石英光纤的一些基本损伤特性;徐世祥等^[6]实验研究了 XeCl 准分子高峰值功率脉冲(60 ns)激光对石英光纤的损伤阈值并对其损伤机理进行了探讨。

光纤输出激光能量和光束质量是描述光纤传能的两个重要参数。光纤传能受到光纤损伤阈值的限制,输出光束质量受到发射条件、光纤芯径以及光纤材料本身、非线性效应等多方面因素的影响。光纤传输系统的传输特性对整个光纤激光系统的可靠性、稳定性和安全性有重要的影响。本文采用武汉烽火科技公司生产的芯径为 600 μm ,数值孔径 0.22,长度在 1~2 m 的全石英阶跃折射率光纤传输 5 ns 的 Nd:YAG 脉冲激光,对其传输特性、损伤特性进行了实验研究。选用芯径 600 μm 石英光纤的原因是它在柔韧性和传输容量两个方面都具有较高的期望值;而采用激光脉宽 5 ns 的原因是它在传输稳定性方面较好。

2 实 验

图 1 为光纤传输测量实验装置。激光源为调 Q Nd:YAG 激光器,输出激光为 TEM₀₀ 模,光斑直径为 8 mm,光束质量 $M^2=1.2$ 。激光波长为 1064 nm,脉宽(FWHM)为 5 ns,能量稳定度为 $\pm 5\%$,最大输出激光能量达到 1.5 J,通过调节激光振荡器和放大器的电压,可以调节输出能量大小,而不改变脉宽。聚焦

透镜采用焦距为 2 m 的平凸透镜。光纤放置在精密五维光纤调整架上,保证激光与光纤的精确对准,光纤端面经过精密机械抛光。激光能量计采用美国 EM500 大能量探头能量计测量,测量精度小于 $\pm 1\%$ 。注入光斑大小和有效面积用 CCD 测量,如图 2 所示,测得光斑平均等效面积为 0.215 mm²。

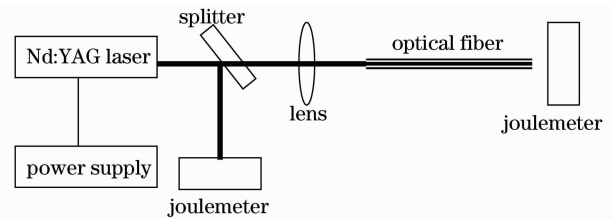


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

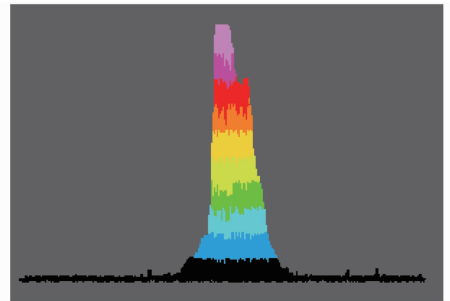


图 2 注入光斑能量分布

Fig. 2 Energy distribution of the input laser beam

光纤端面损伤测试,采用 N-ON-1 方式:激光能量脉冲由小到大逐渐增加到破坏阈值,激光束以相同的时间间隔多次辐照在元件的同一点上。因为能量的逐渐升高方式,也类似一种激光预处理的过程,可以部分消除光纤端面的微小缺陷和内应力。单脉冲能量从 3~5 mJ 开始,每次增加 2.5 mJ 直到光纤出现不可逆性损伤,重复频率小于 0.5 Hz。

3 实验结果

选取光纤传输 Nd:YAG 脉冲激光典型数据作图,如图 3 所示。当注入激光能量较小(5~25 mJ)时,光纤的传输效率稳定在 70%;当注入激光能量继续增大,光纤端面发生等离子体击穿现象,光纤传输效率下降到 66%,随着激光脉冲能量的增大,光纤传输效率下降到 62%;进一步增加注入激光能量到 34 mJ 时,输出能量为 0,此时光纤发生了灾难性的体损伤。

实验研究表明,随着注入激光能量的增加,光纤传输会经历 3 个阶段:

1) 注入激光能量 E_{in} 小于等离子体击穿阈值

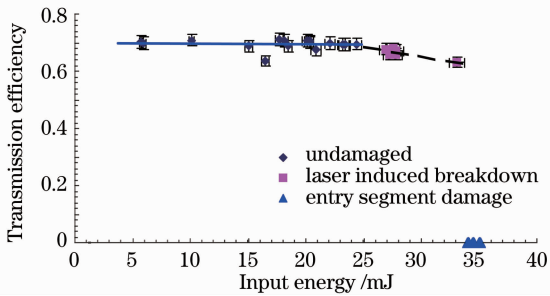


图3 典型的光纤传输 Nd:YAG 激光脉冲效率曲线

Fig.3 Typical transmission efficiency curve of fiber delivery Nd:YAG laser pulses

E_{LB} 。此时,光纤以恒定的传输效率 η 传输激光能量,随着 E_{in} 的增大,输出激光能量 E_{out} 线性增大,即 $E_{out} = E_{in} \times \eta$ 。光纤传能特性较稳定,如图3中“undamaged”曲线域所示的“平稳传输段”。

2) $E_{LB} \leq E_{in} < E_{LD}$, E_{LD} 为光纤初始输入段损伤阈值。这个阶段光纤仍然有大量的激光能量输出,但是非常不稳定。这个阶段最为复杂,在 N-ON-1 测试方式下,随着辐照的不断进行,光纤端面损伤越来越严重,光纤传输效率呈现下降趋势,但有时由于等离子体的吸收和屏蔽作用也会对激光诱导光纤端面损伤起抑制作用。等离子体的吸收和屏蔽以及光纤端面的局部损伤是造成传输效率下降和光纤传输稳定性下降的主要原因。 $E_{out} = E_{in} \times \eta(D_F, A_b)$, $\eta(D_F, A_b)$ 为此阶段的光纤传输效率,它是自变量光纤端面损伤程度 D_F 和等离子体吸收和屏蔽量 A_b 的函数。如图3中“laser induced breakdown”曲线域所示的“非平稳传输段”。

3) $E_{in} \geq E_{LD}$ 。 E_{LD} 涉及的影响因素很多,很难精确地测量。因此,这里代表了一个不确定量,也就是说并不是所有的测试光纤都会经历这个阶段,由于光纤端面损伤以及等离子体的屏蔽效应,使得大量的激光能量损耗,但当透过光纤端面的激光能量 E_{Co} 在光纤注入初始段形成的激光功率密度 P_{Co} 大于等于此位置的激光损伤功率阈值 P_{LD} 时,就引起了体损伤。而由于受光纤端面损伤、等离子体的屏蔽效应或者激光光纤准直度等方面的影响,可能在光纤内部永远不会形成这样高的激光功率密度点,所以不会导致光纤体损伤的发生。本实验证明了这个结论,在测试中只有不到 1/3 的光纤观察到了完整的 3 个阶段。如图3中“entry segment damage”曲线域所示的“传输截止段”。

当光纤端面光学击穿阈值在较高的情况下,有可能第二阶段和第三阶段出现顺序互换。也就是说当

光纤端面还没有达到等离子体击穿阈值 E_{LB} 时,已经发生了比较严重的光纤初始输入端损伤。实验未出现这种情况,此种情况暂不讨论。根据文献[12]计算光纤 50% 概率损伤阈值为 24.0 mJ,光纤端面发生损伤前输出激光能量平均值为 14.0 mJ,最小的输出能量为 9.3 mJ,最大输出为 17.7 mJ。采用光学显微镜对光纤端面损伤形貌进行观测,如图4所示,端面损伤区域呈现麻点状的烧蚀损伤形貌。

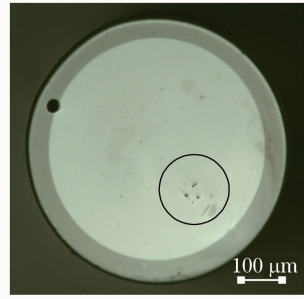


图4 典型的光纤端面损伤形貌

Fig.4 Typical damage morphology at optical fiber end face

为了进一步表征光纤端面的损伤形貌,采用美国瓦克(Wyko)的白光干涉仪对其进行了测量,结果如图5所示。光纤端面形成一个凹坑,直径为 200~350 μm ,它的大小与注入光斑大小、激光功率密度有关;深度在微米量级,表明了激光对光纤端面的烧蚀和气化程度。另外,激光诱导光纤端面损伤前后,端面的粗糙度由原来的数十纳米增大为 100~200 nm,从而导致光纤端面散射增强。

光纤初始输入端损伤发生在距离光纤输入端面 5~30 mm 之间,炸裂长度为 1~3 mm。当光纤注入初始输入段发生损伤时,光纤传输效率迅速下降,伴随有微小的炸裂声,经过连续几个脉冲后,几乎无能量输出,如图6所示。

4 分 析

通过对光纤的输入输出脉宽进行测量,发现前后无明显变化,结合传输效率曲线可得出光纤内并未发生非线性效应(受激布里渊散射和受激拉曼散射)。因此,光纤的传输效率受到光纤端面耦合的直接影响。当光纤端面未损伤前,光纤耦合效率的变化在较小的范围内($\pm 2.5\%$),在误差范围内可以认为是不变的。但是当光纤端面发生光学击穿后,耦合效率明显下降($> 10\%$),此时激光光纤的耦合效率改变是由输入端面损伤、等离子体吸收和屏蔽造成的,因此传输效率下降,但此时光纤输出端仍有大

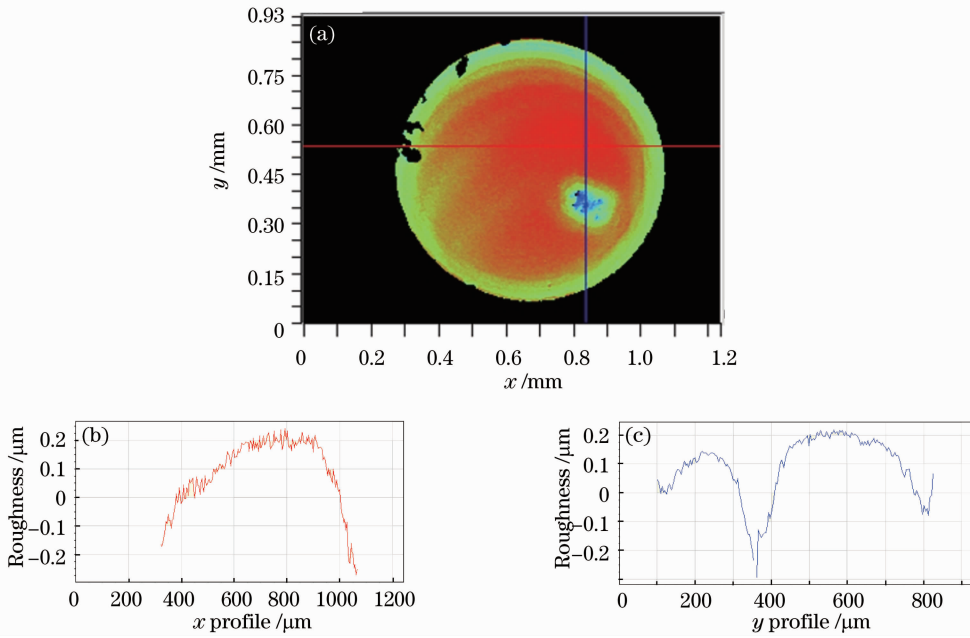


图 5 瓦克的白光干涉仪测试结果。(a)光纤端面干涉测量 2D 显示图;(b) x 方向的粗糙度;(c) y 方向的粗糙度

Fig. 5 Test results of Wyko white light interferometer. (a) 2-dimensional interactive display; roughness of fiber end face in x profile (b) and y profile (c)

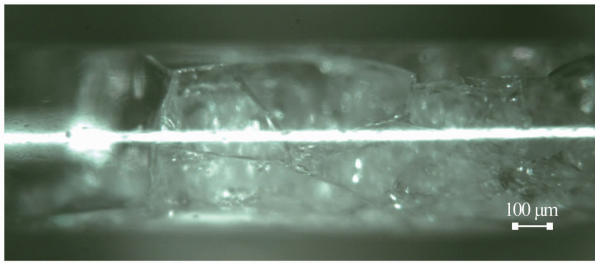


图 6 光纤初始输入段损伤形貌

Fig. 6 Optical fiber initial entry segment damage morphology

量的激光能量输出。

通过光学显微检测,光纤入射端面呈现烧蚀型坑状损伤,坑内存在众多麻孔。整体这种坑状损伤为光纤表层烧蚀气化后形成的,而众多麻孔损伤应为亚表层缺陷烧蚀气化后形成的。综合分析表明这些损伤是由激光驻波场和烧蚀共同作用的结果^[13,14]。光纤初始输入端发生损伤的原因主要是由于注入激光与光纤存在角度误差,注入激光在第一次全反射区附近激光能量高度集中,它可能是未被调制时的数倍甚至高一个数量级^[15],而在光纤纤芯与包层的界面处又是缺陷密集区,因此容易引起激光诱导损伤。

5 结 论

通过芯径为 $600\ \mu\text{m}$ 的全石英光纤传输脉宽为

5 ns 的调 Q Nd:YAG 激光实验研究发现,光纤传输激光脉冲容量主要受到光纤端面等离子体击穿阈值和灾难性损伤阈值的限制。光纤端面等离子体闪光是光纤端面发生损伤的标志,光纤初始输入段的电场增强效应是导致其炸裂性损伤的主要原因。光纤注入端面损伤形貌为深度在微米量级,损伤直径为 $200\sim 350\ \mu\text{m}$ 的凹坑,坑内成麻点状。实验中光纤输出激光能量的平均值为 14 mJ,峰值功率达到 3 MW。因此,提高光纤端面等离子体击穿阈值和光纤初始输入段损伤是提高光纤传能容量的关键,它可以通过光纤端面激光预处理、激光准确对准、采用短焦距聚焦透镜等方式实现。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 B. Richou, I. Schertz, I. Gobin *et al.*. Delivery of 10-MW Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers; dependence of the laser-intensity profile on beam propagation [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 1610~1614
- 3 Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian *et al.*. Characteristics of high-peak pulsed laser induced damage to fibers [C]. *SPIE*, 2007, **6825**: 682516
- 4 A. P. Yalin, M. DeFoort, B. Willson *et al.*. Use of hollow-core fibers to deliver nanosecond Nd:YAG laser pulses to form sparks in gases [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2083~2085
- 5 Y. Matsuura, A. Tsuchiuchi, H. Noguchi *et al.*. Hollow fiber optics with improved durability for high-peak-power pulses of Q-switched Nd:YAG lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(8): 1279~1282

- 6 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 准分子激光感生破坏特性的实验研究[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(8): 645~648
- 7 Zhao Xinghai, Gao Yang, Su Wei *et al.*. Analysis on the Nd:YAG laser-induced damage to fiber end faces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 923~926
赵兴海, 高 杨, 苏 伟 等. 光纤端面 Nd:YAG 激光诱导损伤分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 923~926
- 8 R. E. Setchell. Laser-induced damage in step-index, multimode fibers [C]. *SPIE*, 1992, **1848**: 15~23
- 9 R. E. Setchell. An optimized fiber delivery system for Q-switched, Nd:YAG lasers [C]. *SPIE*, 1997, **2966**: 608~618
- 10 R. M. Wood. Summary of the factors affecting the power and energy capabilities of optical fibres [C]. *SPIE*, 1996, **2870**: 457~467
- 11 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. Quantum 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]. *量子电子学报*, 1994, **11**(3): 144~149
- 12 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]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(10): 1627~1631
- 13 Hu Jianping, Zhang Wenhui, Duan Lihua *et al.*. Laser-induced damage of transmission optics at 1064 nm [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(6): 49~51
胡建平, 张问辉, 段利华 等. 透射光学元件的 1064 nm 激光损伤特性[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(6): 49~51
- 14 Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian *et al.*. Studies on nanosecond laser induced damage to silica fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 5027~5035
赵兴海, 高 杨, 徐美健 等. 纳秒激光诱导石英光纤端面损伤特性研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 5027~5035
- 15 Zhao Xinghai, Gao Yang. Effect of injection misalignment on multimode fiber power delivery characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1842~1847
赵兴海, 高 杨. 激光注入误差对多模光纤传能特性影响分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1842~1847