

高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性

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, 四川 绵阳 621900 ;

2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要 :实验研究了光纤传输调 Q Nd:YAG 高功率脉冲激光特性,包括光纤的传输效率、输出光束特性、输出光斑能量分布以及激光诱导损伤特性。得出的主要结论为 :光纤传输高峰值功率激光引起受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)的产生是导致传输效率下降的主要原因 ;光纤输出光束束腰位置为输出端面,发散角略大于入射角,光束质量下降,输出光束截面光斑能量分布“匀化” ;光纤的端面激光损伤限制了传输激光功率的提高,其主要损伤相貌分为—坑状损伤、熔融损伤和溅射损伤,实验得出光纤端面的激光零损伤概率阈值功率密度为 3.85 GW/cm²。

关键词 :光纤传能 ; 激光损伤 ; 高峰值激光 ; 质量因子

中图分类号 :TN24 ;O484.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1007- 2276(2008)03- 0444- 05

Power delivery characteristics of fibers for high-peak power pulse laser

ZHAO Xing-hai¹, 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)

Abstract: The fiber delivery characteristics of Q-switch Nd:YAG high power pulse were investigated by experiments, including transmission efficiency, characteristics of output beam, distribution of output beam and laser induced damage to fiber end. Many conclusions were obtained as follows. SRS and SBS induce the decrease of transmission efficiency. Output beam waist is on the fiber output end, and the divergence angle is a little larger than input beam's. Quality factor is degraded, the distribution of output beam is uniform. Laser induced damage to fiber ends limits the raising of laser power passing through fibers. The damage figures include that pit damage, fusion damage, and sputtering damage. The combination method of N-ON-1 and 1-ON-1 test modes to LIDT tests was introduced. The plasma sparks at the fiber end faces indicated the fiber damage. The zero probability damage threshold was calculated according to experimental results, that is 3.85 GW/cm². The LIDT and the nonlinear effects of fibers are the main factors in limiting the power capacity of fiber delivery laser system.

Key words: Fiber delivery laser energy; Laser damage; High peak power laser; Quality factor

收稿日期 :2007- 08- 05 ; 修订日期 :2007- 09- 20

基金项目 :中物院科学技术发展基金重点课题 (007A05001) ;国防预研项目课题 (61305070402) ;中物院电子工程研究所科技创新基金资助 (20070202)

作者简介 :赵兴海 (1984-),男,山东潍坊人,研究实习员,硕士,主要研究方向为高功率激光应用技术、光纤传输研究、MOMES 技术。

Email :xinghaiuestc@126.com

导师简介 :高杨 (1972-),男,四川绵阳人,副研究员,博士后,主要研究方向为引信技术、微电子机械系统技术、激光点火技术。

Email :gaoyang@caep.ac.cn

0 引言

利用光纤进行激光能量的传输,在激光焊接、激光切割、激光钻孔、光纤激光器等方面的用途越来越广泛^[1-3]。光纤传输的优点包括体积小、传输安全和方便,通过光纤传输后光斑能量分布得到匀化。目前对光纤传能特性的研究主要集中在功率较低的连续激光,对光纤传输高峰值功率激光的研究报道很少。而随着激光技术的发展,对光纤传输高峰值功率脉冲激光的应用需求越来越迫切,其中典型应用为激光点火。它是利用激光能量作为精密点火源,点燃或者起爆含能材料。其主要优点是避免了电磁波、静电等“电”的干扰,提高了安全性;另外,激光点火路传输系统采用光纤传输,有利于系统的小型化和多点同步起爆^[4]。

在激光点火系统中光纤传输的脉冲激光峰值功率密度高达1~10京瓦,如此高的功率密度会引起光纤内的非线性效应比如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等,使激光的传输效率迅速下降,甚至会引起光纤的损伤,导致光纤传能失败^[5]。所以,研究高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性对设计安全、可靠、高效的激光传输系统至关重要。

1 实验原理

光纤传能特性测试实验装置原理,如图1所示。实

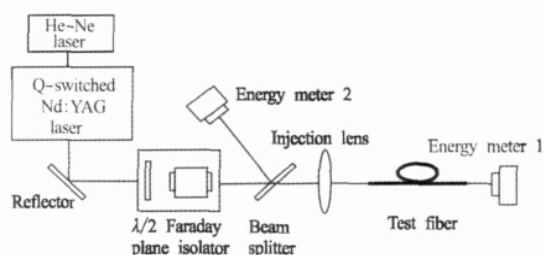


图1 光纤传能特性测试实验装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of test setup of optical fiber delivery power

验采用调Q Nd:YAG激光器,脉冲宽度为15.2 ns、波长为1 064 nm,激光为基模近高斯光束,最大单脉冲能量可以达200 mJ。采用国产石英包层大芯径阶跃折射率石英光纤,激光耦合采用单透镜注入方式,光纤被固定在五维光纤调整架上,放置在焦后位置,并利用He-Ne激光实现激光注入光纤的精确对准。注入光束的发散角小于光纤数值孔径(NA),光纤端面处激光光斑直径不大于芯径的2/3,可以得到比较大的耦合效率^[6]。

光纤输出端放置能量计1,测量输出激光能量;

在聚焦透镜前对入射激光分束,通过能量计2进行测量。图1中加入了法拉第光学旋转器,防止光纤端面或者光学元器件反射的激光返回激光器引起激光失稳,同时也防止再次反射回的光能影响能量计2的测量。通过能量计1和能量计2可以实时观测通过光纤能量输入输出的变化情况,通过相应的定标,可以计算出光纤的传输效率,若在光纤输出端放置科学级CCD便可测量输出光斑特性。

2 实验结果及分析

2.1 光纤传输效率

由图1所示的实验原理,对光纤的传输效率进行了测试,结果如图2所示。图中光纤参数见表1。

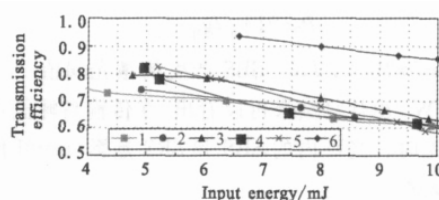


图2 光纤的高峰值功率激光传输效率曲线

Fig.2 Input laser energy vs transmission efficiency

从图2可以看出:光纤的传输效率随着注入激光能量的提高大体上呈线性递减,斜率 $K \approx -0.02$;光纤6无论在何种输入激光能量下,其传输效率都明显大于其他光纤;光纤1、2、3、4的激光传输效率曲线基本重合;光纤5的传输效率基本大于光纤1、2、4。

结合图2、表1可以得出以下结论:传输的能量越

表1 实验用光纤参数

Tab.1 Experimental fiber parameters

Parameters	1	2	3
Length/m	2	2	2
Core diameter/ μm	400	400	400
Surface characteristics	Unpolished	Unpolished	Polished (commonly)
Parameters	4	5	6
Length/m	2	5	0.9
Core diameter/ μm	400	400	600
Surface characteristics	Polished (fine)	Polished (fine)	Polished (commonly)

高、光纤长度越长、芯径越小、传输效率越低。在输入能量相同时,芯径600 μm 的光纤比芯径400 μm 的传输效率高15%~20%,长度为5 m光纤比长度2 m的传输效率低

3%~10%。

随着注入激光能量的提高, 光纤传输效率下降, 这是由于光纤内的非线性效应引起的, 最主要的是受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)。在石英光纤中, SRS 产生的激光阈值功率为^[7]:

$$P_R = 16A_{\text{eff}}/g_R \cdot L_{\text{eff}} \quad (1)$$

式中: A_{eff} 是纤芯的有效截面积; g_R 是 SRS 增益因子; L_{eff} 是有效光纤长度, $L_{\text{eff}} = 1/\alpha[1 - \exp(-\alpha L)]$, α 为光纤衰减因子; L 为光纤长度。实验用光纤芯径 400 μm , 长度 2 m, $g_R = 1 \times 10^{-13}$ m/W, $\alpha = 0.022$ dB/m。通过计算可以得到: 在文中的实验条件下, SRS 产生的阈值功率为 1×10^5 W。SBS 产生的激光阈值功率^[7]可以表示为:

$$P_B = 21A_{\text{eff}}/g_B \cdot L_{\text{eff}} \quad (2)$$

式中: $g_B = 5 \times 10^{-11}$ m/W。SBS 产生的激光阈值功率为 2.6×10^3 W。由计算结果可以看出, 在传输高峰值功率脉冲激光时, 光纤内的 SBS 和 SRS 是影响光纤传能的重要因素。

2.2 光纤输出光束特性

实验用光纤芯径 600 μm 、包层直径 660 μm 、长度 4 m, 注入光斑直径 400 μm , 激光与光纤精确对准。利用科学级 CCD 精确测量在光纤输出端不同距离的远场光斑大小, 如图 3 所示。

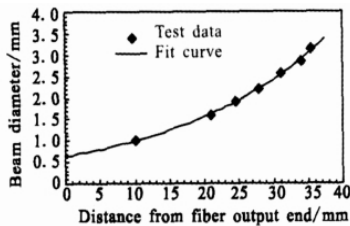


图 3 距离光纤输出端不同位置的光斑大小

Fig.3 Spot size vs the distance from fiber output end

对实验数据采用双曲线拟合处理^[8]:

$$d^2(z) = A + Bz + Cz^2 \quad (3)$$

式中: d 为光纤输出光斑直径; z 为距离光纤输出端面的距离。

由此, 得到焦点的位置 z_0 和焦斑大小 d_0 为:

$$z_0 = -\frac{B}{2C} \quad (4)$$

$$d_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \quad (5)$$

远场发散角为: $\theta_0 = \sqrt{C}$ (6)

光束质量因子为:

$$M^2 = \frac{\sqrt{AC - B^2/4}}{4\lambda/\pi} \quad (7)$$

由此, 得出输入输出光束参数, 如表 2 所示。

表 2 输入输出光束参数比较

Tab.2 Parameters comparison of input and output beams

Parameters	Waist location/mm	Waist diameter/mm	Fat-field divergence/rad	Quality factor M^2
Input beam	115.2	0.036	0.09	2
Output beam	Fiber output end	0.598	0.12	53

可以看出: 经过多模光纤传输后的激光光束束腰位置在光纤输出端面处; 束腰大小近似等于光纤芯径; 远场发散角小于光纤数值孔径, 略大于注入激光束发散角; 多模光纤使得激光束的光束质量下降, 原因是光纤不可避免地受到机械应力的影响, 比如光纤弯曲、光纤夹持等, 这些机械应力形成一个高的光纤几何形状的空间频率调制, 由于这些误差引起了模式耦合^[9]。

光纤输入端、输出端的光斑能量分布如图 4(a)、(b) 所示, 由图(a)可以看出: 光斑能量分布为高斯分布, 峰值

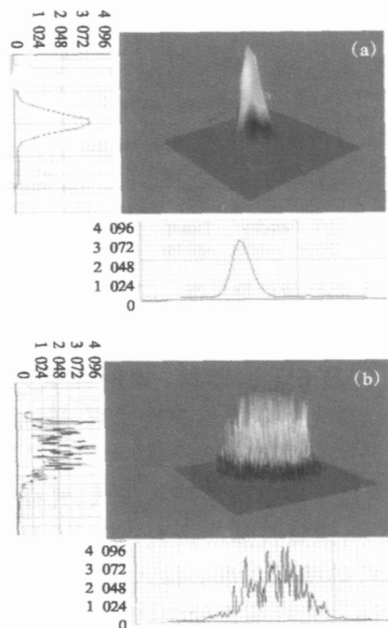


图 4 光斑能量分布

Fig.4 Energy distribution of spot

能量密度与平均能量密度之比较大。由图 4(b)可以看出,光斑的能量分布变得比较均匀。也就是说,通过一段多模光纤的传输后,在光纤高阶模中传输的光束逐渐增大,最后达到稳定分布。

2.3 激光诱导光纤端面损伤

当光纤输入端面的激光功率密度超过了光纤的损伤阈值后,光纤端面受到损伤。激光诱导损伤多发生在光纤端面处,光纤端面的损伤阈值大约只有体损伤的 $1/3$ 。光纤的端面激光损伤机理主要包括电子雪崩击穿效应、光电效应、热作用、多光子吸收效应和自聚焦效应等。引起光纤端面损伤的直接原因是高激光功率密度。对于高峰值功率脉冲激光引起的光纤端面损伤主要是由于强电场引起电子雪崩击穿。在雪崩电离中,导带电子获得激光能量,转化为动能,在固体晶格碰撞电离后放大,发生的冲击电离将另外一个电子带入导带,形成光学击穿。最终,冲击电离造成电子雪崩电离,雪崩之后的电子浓度显著增大,最后导致完全吸收了激光辐射,从而造成光纤端面的损伤。由于电场加强效应,雪崩电离容易发生在端面的凹点、瑕疵、伤痕等附近。表面的这些缺陷和不完善造成局部场强增大,根据不同的缺陷,增大倍数在 $n \sim n^4$ 之间(n 为光纤纤芯折射率)^[10]。

光纤的激光诱导损伤阈值测量装置的原理图如图 1 所示。实验中,激光损伤阈值的测试采用了 N-ON-1 方式,该过程如图 5 所示,激光能量脉冲由小到

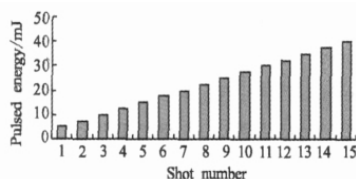


图 5 光纤测试序列

Fig.5 Test procedure used for each fiber

大逐渐增加到损伤阈值,激光束以相同的时间间隔多次辐照在元件的同一点上。因为加载的能量是逐渐升高的(可视为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。

光纤的损伤阈值测试实验中存在多种偶然因素^[11],同一种光纤,在相同的实验条件下测得损伤阈值不会完全相同,甚至可能相差较大。也就说在任意一个较高能

量单脉冲激光的辐照下,每根光纤都有一定的损伤几率。为此,建议将 1-ON-1 方式和 N-ON-1 方式结合起来,即采用 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阈值能量密度或功率密度,结果如图 6 所示。

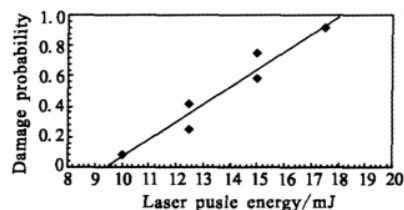


图 6 损伤概率曲线图

Fig.6 Dependence of damage probability on laser pulse energy

图 7 为通过相衬显微镜放大 300 倍检测得到的光纤端面损伤形貌照片。通过实验得到光纤端面损伤的主要形貌为坑状损伤、熔融损伤、溅射损伤。

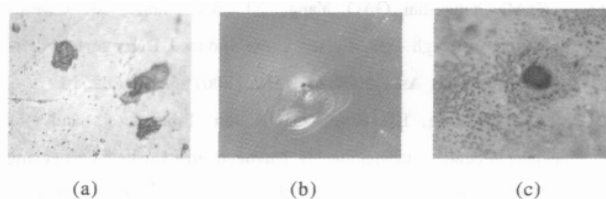


图 7 光纤端面损伤形貌

Fig.7 Figures of fiber end damaged face

坑状损伤(图 7(a))比较常见,直径一般为数微米到数十微米,在多次激光辐照情况下,这类损伤有时会长期稳定,有时会很快扩展。结瘤缺陷在低能量密度激光损伤后形成的坑状损伤,与光学元件表面的固有孔洞缺陷类似,对光纤的光学性质影响比较小。熔融损伤(图 7(b))也主要与激光能量有关,尺度一般为 $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。图中出现的“小火山口”可能是由于此处存在亚表层(深表层)存在缺陷,吸收激光能量,发生小喷射造成的。图中的环形区域是由于此区域应变损伤表层的“浸润”效应。溅射损伤(图 7(c))一般发生在激光功率密度比较高的情况,为大面积的区域损伤,波及范围直径可达数百微米。它可能是缺陷中晶核被激光辐照后,产生等离子体喷溅形成的,其形状和熔融损伤类似,只是附近小区域内由于等离子体喷溅烧蚀形成粗糙疤面,使光学元件表面散射增大。

根据激光点火系统的应用要求,文中只把激光引起的熔融损伤和溅射损伤定义为功能性损伤。实验测得光纤端面发生熔融损伤和溅射损伤的零损伤概率阈值功率密度为 3.85 GW/cm^2 。

3 总 结

通过高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性实验及其结果分析,可以得出以下主要结论:(1) 光纤内的非线性吸收严重降低了光纤传输高峰值功率脉冲激光,随着注入激光功率的增大,传输效率几乎线性下降;(2) 输出激光束的束腰位置在光纤输出端面上,输出光束发散角略大于输入光束发散角,光纤输出激光束质量下降,截面能量分布“匀化”;(3) 光纤端面的激光诱导损伤是限制光纤传输激光功率提高的瓶颈,光纤端面的损伤形貌主要可以分为坑状损伤、熔融损伤、溅射损伤。熔融损伤和溅射损伤对光纤的光学性质影响较大。

参考文献:

- [1] ZHAO Xing-hai, GAO Yang, XU Mei-jian, et al. Characteristics of High-Peak Pulsed Laser Induced Damage to Fibers [C]//Photonics Asia 2007 of SPIE, 2007, 6825: 682516.
- [2] LOU Qi-hong, HE Bing, ZHOU Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination [J]. Infrared and Laser Engineering 楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干光束. 红外与激光工程, 2007, 36 (2): 155-159.
- [3] CHEN Zi-lun, HOU Jing, ZHOU Pu, et al. Theoretical study on the phase noise by thermal effects in fiber amplifier [J]. Infrared and Laser Engineering 陈子伦, 侯静, 周朴, 等. 光纤放大器热效应引起的相位噪声理论分析. 红外与激光工程, 2007, 36 (6): 817-819.
- [4] YONG L D, NGUYEN T, WASCH J. Laser initiation of explosives, pyrotechnics and propellants: a review [R]. New York: Department of Defence, 1995: 2-38.
- [5] WOOD R M. Summary of the factors affecting the Power and Energy Capabilities of Optical Fibers [C]//Proceedings of SPIE 1996, Third International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, 1996, 2870: 457-467.
- [6] LI Yu, ZHANG Kuo-hai, LI Qiang, et al. Research on fiber optic coupling for the high-power laser beam [J]. Applied Laser (李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究. 应用激光), 2004, 24(5): 276-278.
- [7] AGRAWAL G P. Principle & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Translated by JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, TNA Bin, et al. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, (AGRAWAL G P. 非线性光纤光学原理及应用. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等译. 北京: 电子工业出版社), 2002: 190-226.
- [8] LEI Hong, LI Qiang, ZUO Tie-chuan. Measurement method of high power laser beam parameters [J]. Journal of Optoelectronics·Laser (雷旬, 李强, 左铁钊. 大功率激光光束参数的测量方法. 光电子·激光), 2000, 11 (4): 372-374.
- [9] KUHN A, BLEWETT I J, HAND D P, et al. Optical fiber beam delivery of high-energy laser pulses: beam quality preservation and fiber end-preparation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34: 273-288.
- [10] KOECHNER W. Solid-state Laser Engineering [M]. Translated by SUN Wen, JIANG Ze-wen, CHENG Guo-xiang. Beijing: Science Press (W 克希耐尔. 固体激光工程. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社), 2002: 584-587.
- [11] HU Jian-ping, MA Ping, XU Qiao. Laser damage threshold measurement of the optical elements [J]. Infrared and Laser Engineering (胡建平, 马平, 许乔. 光学元件的激光损伤阈值测量. 红外与激光工程), 2006, 35(2): 187-191.

书 讯

《非球面光学制造与测量技术文集》(内部资料)

《非球面光学制造与测量技术文集》介绍了目前非球面制造与测量技术的发展现状和趋势,涵盖了古典加工及现代先进制造技术中涉及光学非球面的优秀论文。内容包括:非球面光学系统设计、加工与检验;非球面光学加工;非球面零件光学检测技术研究;大口径透镜凸面零检验的补偿器设计;大口径离轴非球面制造技术—研磨、抛光技术;主动抛光盘磨制非球面的工艺与面形检测;主动抛光盘磨制非球面镜面控制技术研究;大半径平凸柱面透镜的加工;光学零件柱面加工机研制;红外线聚光非球面透镜的单点金刚石镜面切削方法;计算机控制光学非球面的抛光等。

全书 208 页,有需求者请速与《红外与激光工程》发行部联系。电话:(022) 23009865/23009946。