

石英光纤的传能效率、损伤阈值和损伤积累效应研究

高 杨¹,赵兴海¹,赵 翔¹,苏 伟¹,程永生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:对激光起爆用全石英光纤传输高峰值功率 Nd:YAG 激光的传能特性进行了理论和实验研究。实验采用调 Q 激光源,单脉冲功率超过 1 MW;传能光纤为阶跃折射率多模石英光纤,芯径有 400 μm 、600 μm 两种,包层直径分别为 440 μm 和 660 μm 。研究表明:光纤芯径、数值孔径、长度等都会影响光纤的传能效率;当注入激光功率超过一定阈值后,光纤内的非线性效应,比如 SRS 和 SBS 将很明显,造成激光能量损耗;参照 ISO/DIS 11254-1.2 标准对光纤零概率损伤阈值进行了测量,为 58.6 J/cm²;光纤有匀化输出光斑能量分布的作用;光纤端面发生一定程度的损伤后,光纤仍可传输部分激光能量,并存在损伤积累效应。

关键词:激光起爆;传能光纤;激光诱导损伤;损伤阈值;激光雷管

中图分类号: TN253; TJ439.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-1194(2009)01-0001-04

A Study on Power-delivery Efficiency Laser, Laser-induced Damage Threshold and Damage Accumulation Effect of Silica Fiber

GAO Yang¹, ZHAO Xing-hai¹, ZHAO Xiang¹, SU Wei¹, CHENG Yong-sheng¹,
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 power-delivery characteristic of all-silica fibers delivering high-peak power pulse Nd:YAG laser is studied theoretically and experimentally. The fibers are applied to laser initiation. The experimental laser source is Q-switched laser with single pulse above 1MW; the power-delivery fibers are step-index multimode fibers of two types, which are of 400 μm and 600 μm core diameter, and 440 μm and 660 μm cladding diameter respectively. The study shows that the power-delivery efficiency of the fiber can be affected by the factors such as its core diameter, NA (Numerical Aperture) and length. In case laser power is beyond the threshold, the nonlinear effects such as SRS and SBS will be serious, causing laser power loss. The zero-probability damage threshold is measured to be 58.6 J/cm² according to 11 254-1.2 of the ISO/DIS standard. Energy distribution of laser spots from fibers is uniform. Part of the laser energy can still be delivered by the fibers with damage accumulation effect, even if the fiber end face is partly damaged.

Key words: laser initiation; power-delivery fiber; laser-induced damage; damage threshold; laser detonator

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、激光武器等方面的用途越来越广

泛。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。随着激光技术的发展,对光纤传输高峰值功率脉冲激光在军事方面的应用需求越来越迫切,一个典型的应

* 收稿日期:2008-09-21

基金项目:武器装备预研项目资助(编号不公开);中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目资助(2007A05001);中物院电子工程研究所科技创新基金资助(S20070202);武器装备预研基金项目资助(9140A05070208ZW0502)

作者简介:高杨(1972-),男,四川绵阳人,博士,副研究员,硕士生导师,研究方向:微光机电系统在引信技术中的应用。

E-mail: gaoyang@caep.ac.cn.

用是激光起爆技术。激光起爆技术利用激光能量作为精密点火源,点燃或者起爆炸药,从根本上消除了火工品的静电防护、电磁干扰等问题,使引信与火工品的安全性大大提高;激光能量通过光纤传输,有利于实现引信与起爆控制系统的小型化,也支持多点分布式起爆的概念^[1]。

在激光起爆系统中,光纤传输的脉冲激光峰值功率密度高达 GW/cm^2 ,会引起光纤内的非线性效应,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^[2]。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。

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。本文通过实验和理论计算,分析了用于激光起爆的全石英光纤的能量传输特性。

1 实验原理和实验装置

光纤传能特性测试实验装置原理,如图 1 所示。实验采用调 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;光纤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 可以得到比较大耦合效率^[3]。

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。

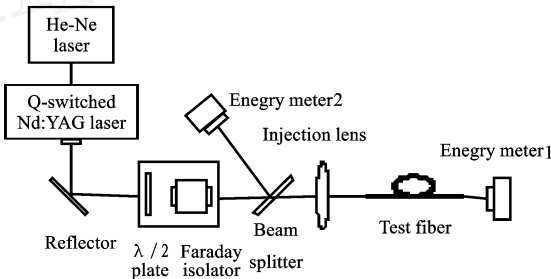


图 1 光纤传能特性测试实验装置原理图

Fig. 1 The schematic diagram of optical fiber delivery power test setup

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,我们对光纤的传输效率进行了测试,测试结果如图 2 所示。

表 1 实验用光纤参数

Tab. 1 Experimental fiber parameters						
Fiber No.	1	2	3	4	5	6
Length/ m	2	2	2	2	5	0.9
Core diameter/ μm	400	400	400	400	400	600
Surface characteristics	cleaved	cleaved	polished	polished	polished	polished

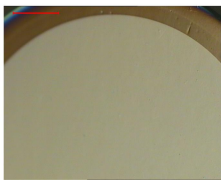


图 2 经剖光的光纤端面显微照片

Fig. 2 The microscope photo of polished surfaces of fiber end face

结合图 2、表 1 可以得出以下结论:传输的能量越高、光纤长度越长、芯径越小传输效率越低;芯径 600 μm 光纤比芯径为 400 μm 光纤在输入能量相同时,传输效率高 15 %~20 %,长度为 5 m 光纤比 2 m 光纤在相同的输入能量传输效率低 3 %~10 %。

随着注入激光能量的提高,由于光纤内的非线性效应,主要是受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊

散射(SBS),光纤传输效率明显下降。

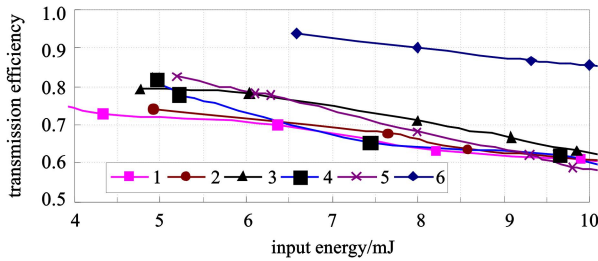


图3 光纤的高峰值功率激光传输效率曲线

Fig.3 Input laser energy vs. transmission efficiency

石英光纤中,SRS产生的激光阈值功率为^[4]:

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

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 $400 \mu\text{m}$, 长度 2 m , $g_R = 1 \times 10^{-13} \text{ m/W}$, $\alpha = 0.022 \text{ dB/m}$, 计算得到在我们的实验条件下的 SRS 产生的阈值功率约为 10^5 W 。

SBS 的产生激光阈值功率可以表示为^[4]:

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

式中, $g_B = 5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ 。

计算得到在我们实验条件下 SBS 产生的激光阈值功率约为 $2.6 \times 10^3 \text{ W}$ 。

由上述计算结果可以看出,石英光纤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 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 方式统计这一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^[5],即为光纤损伤阈值。

激光等离子体点燃的经验判据是^[6]:

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

式中, P 为入射激光功率密度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$), t 为脉冲宽度 (s), λ 为波长 (μm)。

式(3)说明,激光等离子体点燃只与激光本身的参数有关。但实际情况却复杂得多,还与靶表面特性(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。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

光作为光纤端面损伤的客观依据^[5-7]。因此,我们主要采用等离子体闪光法和显微镜观察法两者相结合的方法对光纤损伤进行直观、方便的判断^[5]。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等离子体击穿,光纤端面就发生了损伤。

在实验中,可以近似认为透镜聚焦后的光斑能量分布是高斯的,注入光斑有效面积为^[8]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{Q}{E_0} = \frac{\pi w_0^2}{2} \quad (4)$$

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 $400 \mu\text{m}$ 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^[9],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 J/cm^2 。光纤损伤全部为端面损伤。利用 200 倍显微镜观察光纤端面,发现明显的损伤点^[10-11],示例如图 4 所示。

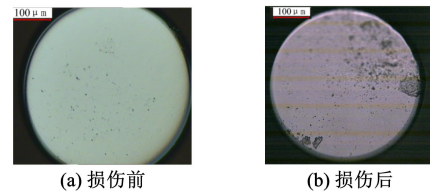


图4 光纤端面损伤前后照片对比

Fig.4 Contrast of undamaged and damaged fiber entrance face

2.3 光纤损伤积累效应

通过大量实验发现,光纤端面发生灾难性损伤后,仍有一定的激光能量输出,输出激光能量与损伤面积成负指数关系;随着光纤输入面损伤面积的增大,输出激光能量减小。实验还发现,光纤端面经过多次脉冲辐照后,其损伤特性和传能特性与单脉冲损伤不同。实验结果如图 5、图 6 所示:当注入激光的功率超过光纤端面损伤阈值时,随着辐照次数的增加,损伤程度会扩大,即光纤损伤积累效应;当光纤输入端面的激光功率低于光纤端面的损伤阈值时,无论辐照多少次,都不会引起端面损伤的扩大,光纤输出激光能量几乎没有变化,甚至略有上升趋势,可能是由于激光清除了光纤端面部分杂质和缺陷的原因。

实验采用的激光脉冲间隔为 1 s ,经过多次超过光纤损伤阈值的激光脉冲连续辐照导致光纤端面损伤程度加重,损伤面积扩大,引起耦合效率下降是光

纤输出激光能量下降的原因。

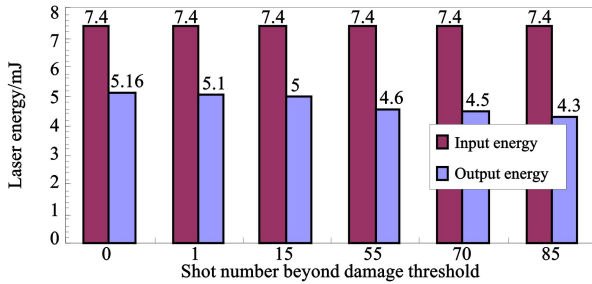


图5 超过光纤损伤阈值功率的激光脉冲辐照后输出能量变化

Fig. 5 The dependence of output energy with shot number beyond damage threshold of injection laser

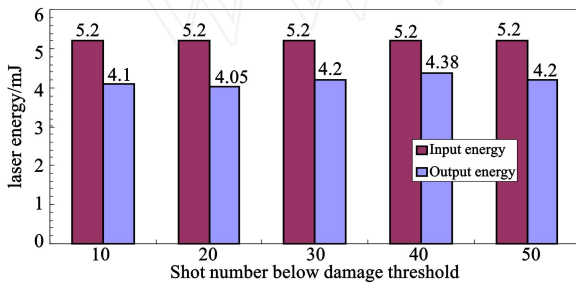


图6 低于光纤损伤阈值功率的激光脉冲辐照后输出能量变化

Fig. 6 The dependence of output energy with shot number below damage threshold of injection laser

3 结论

对高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性进行了详细的实验研究和分析,包括光纤传输效率、损伤阈值和损伤特性等。根据实验结果,随着注入激光能量的增加(5~10 mJ),光纤传输效率下降了20%左右;实验用光纤端面零概率损伤阈值为58.6 J/cm²,仍不能完全满足我们设计的激光雷管起爆的激光能量密度要求(~100 J/cm²);实验发现光纤端面存在损伤积累效应。石英光纤传输高峰值功率脉冲激光的容量限制因素主要是光纤内的非线性效应和光纤端面损伤阈值。光纤端面损伤阈值下降的主要原因是端面缺陷和杂质,因此,大力改善光纤端面抛光质量和进行激光预处理显著提高损伤阈值;提高光纤内SBS和SRS的产生阈值、抑制非线性效应可以显著提高激光能量的利用率。相关结果对于激光起爆系统的优化有重要意义。

参考文献:

- [1] Yong L D, Nguyen T, Wasch J. Laser initiation of explosives, pyrotechnics and propellants: a review. [R]. New York: Department of defence, 1995.
- [2] Roger M Wood. Summary of the factors affecting the power and energy capabilities of optical fibres[J]. SPIE, 1996, 2870: 457-467.
- [3] 李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. 应用激光, 2004, 24(5): 276-278.
LI Yu, ZHANG Kuo-hai, LI Qiang, et al. Research on fiber optic coupling for the high-power laser beam (In Chinese) [J]. Applied Laser, 2004, 24(5): 276-278.
- [4] Govind P Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
Govind P Agrawal. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics (In Chinese) [M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, et al, transl. Beijing: publishing house of electronic industry, 2002.
- [5] 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(12): 1 627-1 630.
ZHAO Xing-hai, GAO Yang, XU Mei-jian, et al. Experimental methods of pulsed laser induced damage to fibers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1 627-1 630.
- [6] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
LU Jian, NI Xiao-wu, HE An-zhi. Physics on reciprocity of laser and material [M]. Beijing: Mechanical Industry press, 1996.
- [7] 梁丽萍, 张磊, 盛永刚, 等. 溶胶-凝胶 ZrO₂-TiO₂ 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): 3 596-3 606.
LIANG Li-ping, ZHANG Lei, SHENG Yong-gang, et al. Studies on the laser-induced damage resistance of sol-gel derived ZrO₂-TiO₂ composite high refractive index films[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(6): 3 596-3 606.
- [8] 杨镜新, 庄亦飞, 沈卫星, 等. 激光光斑有效面积的准确测定[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(10): 1 263-1 266.
YANG Jing-xin, ZHUANG Yi-fei, SHEN Wei-xing, et al. Precise measurement of the effective area of laser spot (in Chinese) [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(10): 1 263-1 266.
- [9] 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. Asia: SPIE, 2007: 1-7.

(下转第14页)

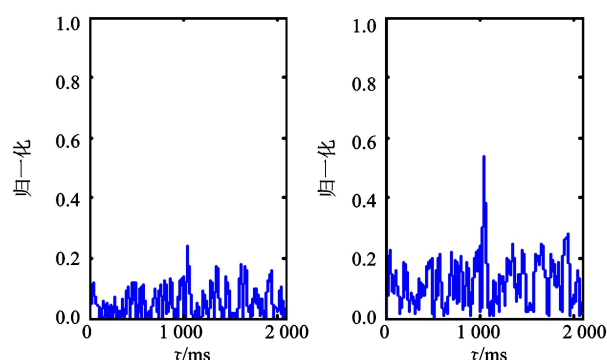


图8 干扰抑制前后的系统相关输出情况比较

Fig.8 Output of systemic correlation before and after excision

6 结论

仿真分析表明:FRFT变换对PRPPM-PRBC复合引信的有用信号和噪声不敏感;在特定的旋转角度下,LFM干扰呈现冲击现象;基于FRFT的LFM干扰抑制方法可使相关输出明显改善。然而,对引信而言, (α, u) 二维平面的FRFT计算量偏大,后续研究的重点是探索有效的算法,使该干扰抑制思想能在无线电引信达到实际工程化应用。

参考文献:

- [1] Lach R, Amin M G, Lindsey A R. Broadband interference excision for software-radio spread-spectrum communications using time-frequency distribution synthesis [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, (17): 160-170.
- [2] Barbarossa S, Scaglione A. Adaptive time varying cancela-
- tion of wideband interferences in spread spectrum communications based on time-frequency distributions[J]. IEEE Trans, 1999, (4): 957-965.
- [3] Amin M G. Interference mitigation in spread spectrum communication systems using time-frequency distributions [J]. IEEE Trans. ,1997, (1): 90-102.
- [4] 张淑宁,赵惠昌,吴兵.基于分数阶傅里叶变换的伪码体制引信线性调频干扰抑制技术[J].兵工学报,2006,29(1):32-36.
ZHANG Shu-ning, ZHAO Hui-chang, WU Bing. LFM interference excision of pseudo random binary code fuze based on FRFT[J]. Acta Armamentarii, 2006, 29(1): 32-36.
- [5] 邓建平,赵惠昌,涂友超. PRPPM-PRBC复合引信抗线性调频干扰性能分析[J]. 宇航学报,2008,29(4):1425-1429.
DENG Jian-ping, ZHAO Hui-chang, TU You-chao. Performance research of anti-LFM jamming of PRPPM-PRBC compound fuze[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1425-1429.
- [6] DENG Jian-ping, ZHAO Hui-chang, ZHOU Xin-gang. Waveform analysis of PRPPM-PRBC compound systemic fuze [C]// IEEE. 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. US: IEEE, 2007: 1219-1222.
- [7] 韩培尧. 雷达抗干扰技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1980.
- [8] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理(第1版)[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [9] Almeida L B. The fractional fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42: 3084-3091.
- Acta Physica Sinia, 2008, 57(8): 5027-5033.
- [11] GAO Yang, ZHAO Xing-hai, SU Wei, et al. Investigations on fibers for high-peak power pulsed Nd: YAG lasers for laser detonator[C]// Photonics Europe 2008 of Proc. of SPIE 6998. EU: SPIE, 2008: 1-7.
- [10] 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):5027-5033.
ZHAO Xing-hai, GAO Yang, XU Mei-jian, et al. Studies on nanosecond laser induced damage to silica fibers[J].

(上接第4页)