

高 峰 值 功 率 脉 冲 激 光 与 石 英 光 纤 耦 合 的 空 气 击 穿 问 题^{*}

范馨燕, 刘京郊

(哈尔滨工业大学 可调谐激光国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了 15 MW 峰值功率脉冲激光与 600 μm 芯径石英光纤耦合中存在的空气击穿现象。对聚焦区域的空气击穿现象进行了理论和实验研究,测得空气击穿阈值为 $0.79 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。测得固体介质的激光损伤阈值为 $2.12 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$,与理论计算结果相符。提出了七合一光纤耦合器用于解决空气击穿的办法,实验测得 7 根光纤并束的耦合效率为 67.21%。结果表明光纤耦合器可有效解决 15 MW 峰值功率脉冲激光与 600 μm 芯径石英光纤的耦合。

关键词: 高 峰 值 功 率 激 光; 空 气 击 穿; 光 纤 耦 合; 耦 合 效 率; 光 纤 损 伤

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A

调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器,由于其高的峰值功率,在材料加工、医疗等领域有很广泛的应用。在这些应用中,当需要传输激光能量到远距离或是激光很难到达的位置时,就需要使用光纤传输。目前有很多有关纳秒脉冲激光的光纤耦合的研究报道。光纤传输 MW 级峰值功率的脉冲激光,主要受到焦点处的空气击穿和光纤材料的损伤阈值的限制^[1-7],在实际工程应用中还存在很多问题。

为了避免聚焦区域的空气击穿以及光纤端面的损伤,可以使用光束整形器^[1]和衍射光学元件^[2]的方法,由于消除了能量集中点^[3]因而可以避免空气击穿。也可以将耦合装置置于真空腔中,但是真空度要求极高,约 5.05 Pa^[4],使得耦合系统以及光纤的调整结构相当复杂。因此,如此庞大的耦合系统并不适合实际应用。而且所使用的光纤芯径都在 1 mm 以上,有很大的弯曲损耗,不适于长距离传输。最近几年,有报道使用空芯光纤^[5-6]和空芯光纤束^[7]传输纳秒 Nd:YAG 脉冲激光。在能量传输方面与实芯光纤相比,空心光纤具有很强的潜在优势,因为空心光纤不仅具有高的激光破坏阈值,而且还有低的插入损耗。其致命的弱点是小的数值孔径和高的弯曲损耗,因此也只能用于短距离能量传输。

针对目前高功率光纤传输系统中结构复杂以及短距离传输这两个问题,我们提出了七合一光纤耦合器的方法,用简单的单透镜光学系统即可实现 MW 级 Nd:YAG 脉冲激光的长距离石英光纤传输。激光束经过单透镜会聚后,进入 7 根 600 μm 光纤中。将 7 根光纤端面置于透镜焦点前。很好地解决了聚焦区域的空气击穿和光纤端面的损伤。在没有真空腔的条件下,实现了 15 MW 峰值功率脉冲激光与 600 μm 芯径石英光纤的有效耦合。

1 空气击穿实验

1.1 聚焦区域的空气击穿

高功率脉冲激光经过单透镜会聚后,在聚焦区域形成一个强电场,在激光束的强电场作用下,环境气体发生电离,强烈吸收激光,压力急剧升高,体积膨胀,发生小范围的爆炸现象,称为光学击穿(或放电)。气体发生光学击穿的主要机制是电子崩过程、多光子电离和克尔效应^[8]。气体发生击穿的主要机制是串级电离,必须具备的条件是:提供初始的自由电子,并且存在很高的光电场。光纤端面的高吸收率杂质、缺陷和气体中的微颗粒在激光作用下很快汽化、电离,提供了必要的自由电子。其次,光纤端面的微缺陷处可能形成光电场的局部增强。局部强电场的存在使得自由电子的场致发射成为可能,进一步又为环境气体的串级电离创造了条件,这样多种电离机制可能耦合在一起。我们认为,气体击穿主要是由电子崩和多光子电离引起的,则大气击

* 收稿日期:2008-08-13; 修订日期:2009-03-30

基金项目:国防科技基础研究基金项目

作者简介:范馨燕(1981—),女,山西人,博士生,主要从事激光光纤耦合方面的研究;fanshong_02@yahoo.com.cn.

击穿阈值可以表示为^[9]

$$P_{th} = \frac{b\omega^2}{\alpha\nu'} \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^{x/(I-A)} \quad (1)$$

式中： $\alpha' = 4e^2/m_e c$, e 为电子电荷, c 为真空中光速, m_e 为电子质量; $\nu' = \nu/N$, ν 为电子碰撞频率, N 为单位体积内的原子数; I 是原子产生一个电子的电离能; A 是电子的二体吸附能; $b = b_3 x$, x 是原子将电子激发到高能态的激发能, b_1, b_2, b_3 为常数; ω 为激光频率。由式(1)即可估算大气的击穿阈值, 代入实验中的激光参数和干洁大气参数, 得出 8 ns 的 Nd:YAG 脉冲激光的大气击穿阈值为 10^{11} W/cm²。我们进行了空气击穿阈值实验, 使用的 Nd:YAG 激光器参数为: 峰值功率 15 MW, 脉宽 8 ns, 激光束光斑 10 mm, 发散角 8 mrad。测试光路图如图 1 所示, 激光束经过不同焦距的凸透镜会聚后, 逐渐提高激光功率, 同时观察焦点处的空气击穿现象。表 1 是对几组不同焦距透镜测得的空气击穿阈值。由于实际空气中含有气溶胶等杂质粒子, 实验测得的击穿阈值要比理论估算阈值低 2 个数量级^[9]。另外, 由表 1 的实验数据还可以看出: 光斑增大以后, 空气击穿的阈值会降低。从统计的观点来看, 增大焦区体积会使焦区内出现最大尺寸粒子的几率增大, 从而使阈值下降^[8]。

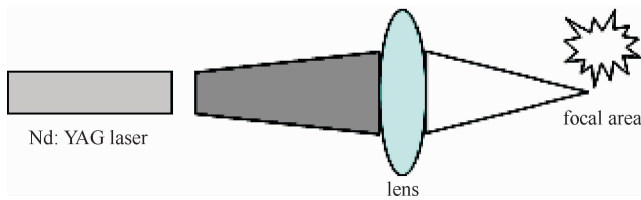


Fig. 1 Experimental setup

图 1 实验原理图

表 1 不同焦距透镜的空气击穿阈值

Table 1 Air breakdown threshold of different focal length lens

focal length/mm	area breakdown threshold/(W · cm ⁻²)
20	9.45×10^9
50	1.59×10^9
60	1.27×10^9
80	0.87×10^9
100	0.79×10^9

1.2 固体介质的激光损伤

高功率激光对光学材料的损伤主要是自聚焦效应, 由于入射光强分布为高斯型, 使得介质的折射率也有类似的分布, 因此光束中心部分的相速度变小, 而在边缘部分则较大, 使光波的等相位面变成凹面, 光束逐渐会聚成很细的光丝, 形成自聚焦现象。当自聚焦光束的功率密度大到一定程度后, 就会引发电子崩电离和多光子电离, 使得材料产生丝状和炸裂破坏。

在强激光作用下, 材料的折射率与激光电场强度的关系为

$$n = n_0 + \frac{1}{2} n_2 |E|^2 \quad (2)$$

推得激光束的临界自聚焦功率为

$$P_{th} = c\lambda_0^2/64\pi n_2 \quad (3)$$

对于调 Q 脉冲激光对固体材料的作用, 主要是源于非线性电子极化率的物理机制, 非线性折射系数 $n_2 = 10^{-19} \sim 10^{-18}$ (SI)。则估算出光学材料的自聚焦功率为 $10^8 \sim 10^9$ W/cm²。选用高导热性和高熔点的蓝宝石晶体, 晶体尺寸为 40 mm × 10 mm × 8 mm, 将聚焦区置于蓝宝石晶体内部, 当激光功率密度达到 2.12×10^9 W/cm² 时, 在晶体内部发生损伤, 伤点深 1 mm。图 2 为蓝宝石晶体损伤图片。

再选用石英玻璃片, 晶体尺寸为 $\phi 25.4$ mm × 3 mm, 将聚焦区置于石英玻璃片晶体内部。结果发现, 当激光功率密度达到 2.12×10^9 W/cm² 时, 在晶体内部形成内雕效果。图 3 为损坏后的石英玻璃的照片。

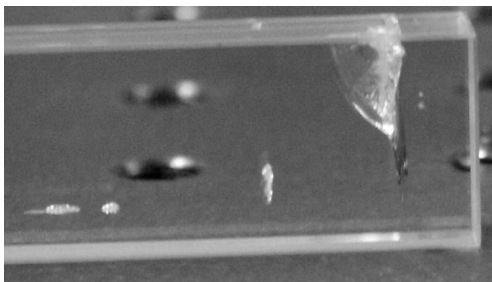


Fig. 2 Damaged sapphire crystal

图 2 蓝宝石晶体损伤图片

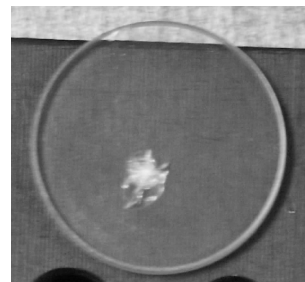


Fig. 3 Damaged quartz glass crystal

图 3 石英玻璃体损伤照片

2 七合一光纤耦合实验

为了避免空气击穿,我们提出将七合一光纤耦合器用于高峰值功率脉冲激光的耦合中,七合一光纤耦合器的原理图如图 4 所示。7 根光纤通过熔融耦合在一起,输入端面为 7 根光纤,输出尾纤仍为单根光纤。目前七合一光纤耦合器虽然在原理上可行,但是受国内光纤拉制工艺的限制,耦合效率不是很高,且抗激光损伤功率也有限。我们进行了 7 根光纤并束耦合实验,实验装置如图 1 所示。光纤束端面置于透镜焦点前,降低了光纤端面的功率密度,同时将焦点处的高功率分配到 7 根光纤中,因此可以消除焦点处的空气击穿,而且不会造成光纤损伤。激光器参数同前,透镜焦距为 100 mm,并束光纤选为 PDF-S-S-600 型光纤,芯径 600 μm ,数值孔径为 0.22,长度 1 m。光纤纤芯是二氧化硅,包层是掺 F 的二氧化硅,相比塑料包层光纤,该光纤具有较高的抗激光损伤阈值^[10]。激光束经透镜会聚后,会聚全角为 0.05 rad,满足光纤的数值孔径要求。光纤端面都经过研磨抛光处理。图 5 为 7 根光纤并束后的端面示意图, r 表示单根光纤芯径(包层半径), R 表示激光光斑半径。由图 5 可以看出,7 根光纤并束后,光纤之间必然存在空隙,耦合效率将低于单根光纤的耦合效率。

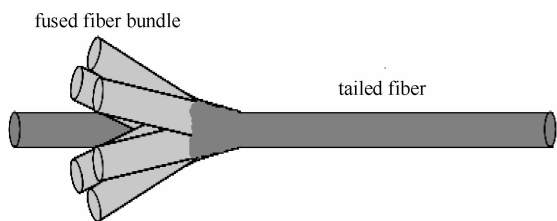


Fig. 4 Schematics of seven-fiber coupler

图 4 光纤耦合器原理图

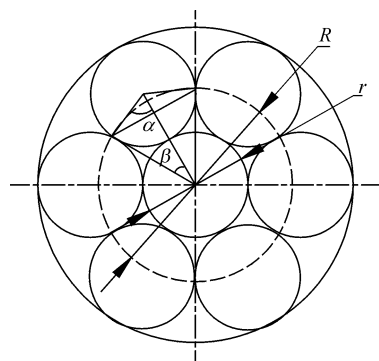


Fig. 5 Schematic of seven-fiber bundle surface

图 5 7 根光纤端面示意图

理论耦合效率为

$$\eta = \begin{cases} \frac{\pi r^2 + 6\{r^2\alpha - r^1 \sin\alpha \cos\alpha + R^2\beta - R^2 \sin\beta \cos\beta\}}{\pi R^2}, & r < R < \sqrt{5}r \\ \frac{\pi r^2 + 6\{r^2\alpha + r^1 \sin\alpha \cos\alpha + R^2\beta - R^2 \sin\beta \cos\beta\}}{\pi R^2}, & \sqrt{5}r < R < 3r \end{cases} \quad (4)$$

图 6 为耦合效率与光斑尺寸的关系图。可以看出,耦合效率存在两个峰值点,光斑半径分别为 0.64 mm 和 0.90 mm。激光光斑由单根光纤芯径逐渐扩大时,光斑内的空气间隙也在增加,光斑增大到 0.64 mm 处时,光斑内光纤与空隙的比例最优,此时的耦合效率最高,达到了 92%。光斑继续增大,光纤之间的空隙迅速增大,耦合效率将逐渐降低,当激光光斑覆盖 7 根光纤时,此时耦合效率还有个峰值,即图中的 $R=3r$,此时的耦合效率为 78%。为了避免中心光纤的损伤,使 7 根光纤内的激光能量分布尽量均匀,应将激光光斑半径控制在 0.90 mm 左右。按照上述分析的结果,我们将光纤端面置于透镜焦点前 18 mm 处,光斑半径 0.90 mm 处,测得光纤并束耦合效率的实验结果如图 7 所示,平均耦合效率为 67.21%。对 15 MW 的激光输入功率,没有观察到光纤端面损伤,耦合效率也没有下降。测得的耦合效率略低于图 6 中分析的理论耦合效率,这是由于七

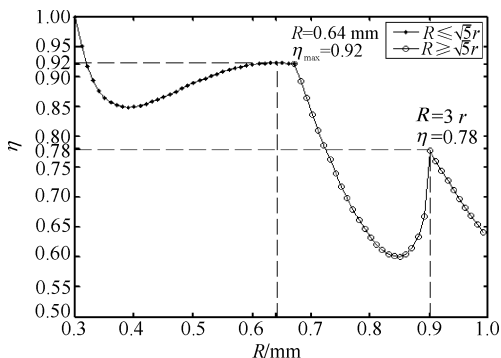


Fig. 6 Effect of laser spots on theoretical coupling efficiency

图 6 激光光斑尺寸对理论耦合效率的影响

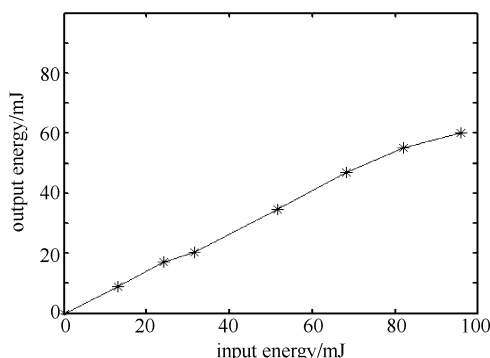


Fig. 7 Coupling efficiency of seven-fiber bundle

图 7 7 根光纤束的传输效率

根光纤之间必然存在空隙,会造成部分能量损耗。

3 结 论

本文针对高峰值功率脉冲激光与石英光纤的耦合中的空气击穿问题进行了研究。基于电子崩和多光子电离理论,给出了聚焦区域的空气击穿阈值模型,实验测得空气击穿阈值为 $0.79 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$,与理论计算结果相符。由自聚焦理论建立了强激光对光学材料的损伤阈值模型,实验测得了蓝宝石晶体的激光损伤阈值为 $2.12 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。对七合一光纤耦合器的耦合效率进行了理论分析,实验测得 7 根光纤束的耦合效率可达 67.21%。结果表明,七合一光纤耦合器可有效解决 15 MW 峰值功率脉冲激光与 600 μm 芯径石英光纤耦合中的空气击穿现象,而且具有功率可扩展性,适当扩展耦合器 N 合一的数目,即可实现功率可扩展。目前,烽火藤仓科技有限公司正在协助研发七合一光纤耦合器。

参考文献:

- [1] Mann K, Hopfmuller A, Gorzellik P, et al. Monitoring and shaping of excimer laser beam profiles[C]//Proc of SPIE. 1992, **1834**:184-194.
- [2] Liu J, Thomson M, Waddie A J, et al. Design of diffractive optical elements for high-power laser applications[J]. *Opt Eng*, 2004, **43**(11): 2541-2548.
- [3] Schmidt-Uhlig T, Karlitschek P, Marowsky G, et al. New simplified coupling scheme for the delivery of 20 MW Nd:YAG laser pulses by large core optical fibers[J]. *Appl Phys B*, 2001, **72**:183-186.
- [4] Richou B, Schertz I, Gobin I, 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.
- [5] Matsuura Y, Hanamoto K, Sato S, et al. Hollow-fiber delivery of high-power pulsed Nd:YAG laser light[J]. *Opt Lett*, 1998, **23**(23):1858-1860.
- [6] Yalin A P, DeFoort M, Willson B, 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.
- [7] Yilmaz O, Miyagi M, Matsuura Y. Bundled hollow optical fibers for transmission of high-peak-power Q-switched Nd:YAG laser pulses[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(27):7174-7178.
- [8] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002: 264-292, 92-100. (Sun Chengwei. Laser radiation effect. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:264-292, 92-100)
- [9] 强希文. 高功率激光表面大气击穿阈值的波长关系[J]. 光学技术, 1999, (5): 37-39. (Qiang Xiwen. Dependence of atmospheric breakdown threshold induced by laser beams on the laser wavelengths. *Optical Tech*, 1999, (5):37-39)
- [10] Fan Xinyan, Liu Jingjiao, Wang Lijun, et al. Optical fiber transmission of Q-switched Nd:YAG pulses of 10 MW peak power: mechanism of damage to the fiber [C]//Proc of SPIE. 2006;**614929**.

Air breakdown in coupling area of high peak power laser pulse and silica optical fiber

Fan Xinyan, Liu Jingjiao

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The air breakdown in the coupling area of 15 MW laser pulse and 600 μm silica optical fiber is investigated. The air breakdown of the focal area is theoretically and experimentally researched. The air breakdown threshold is measured as $0.79 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$. The laser induced damage threshold of the solid medium is measured as $2.12 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$, which is consistent with the theory analyze. A seven-fiber coupler is presented to solve the air breakdown problem. The coupling efficiency of the seven fiber bundle tested is 67.21%. It is concluded that the seven-fiber coupler could couple 15 MW laser pulse into 600 μm silica optical fiber.

Key words: high peak power laser; air breakdown; fiber coupling; coupling efficiency; fiber damage