

文章编号:1001-5078(2007)05-0391-03

高功率激光光纤耦合特性研究

赵翔, 苏伟, 李东杰, 高杨

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 成都 621900)

摘要:实现高功率激光的光纤耦合对高功率激光应用有着重要的作用。文中简要介绍了高功率激光耦合的关键技术,包括激光光纤耦合条件、耦合效率、光纤的选择和端面处理、光纤损伤机理及其阈值条件等方面。

关键词:光纤;损伤;耦合

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Properties Research on Fiber Optic Coupling for the High-power Laser

ZHAO Xiang, SU Wei, LI Dong-jie, GAO Yang

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, Chengdu 621900, China)

Abstract: Realization of high-power laser coupling is an important and of unique value in high-power laser application. Research improvements are introduced in brief in this article, including selecting optical fiber and fiber-end surface preparation, fiber damage theory and threshold, coupling conductions, coupling efficiency.

Key words: fiber; damage; couple

1 引言

高能量、高峰值功率的脉冲光源与光纤的耦合一直是科研人员关注和研究的重要课题之一,至今没有得到彻底地解决。目前,高功率、高能量激光主要通过导光臂进行传输,不仅损耗大、系统复杂,而且不方便使用。因此,加强高功率激光光纤耦合技术的研究,特别是基础理论研究,对高功率激光的应用必将起到积极地推动作用。

2 激光光纤耦合条件

激光和光纤的耦合必须满足以下基本条件:

$$w < d/2; \theta < 2NA \quad (1)$$

式中, w 为光纤端面处激光光斑半径; d 为光纤纤芯直径; θ 为激光聚焦后的发散角(全角); NA 为光纤的数值孔径。

一般情况下,激光束在通过理想无衍射、无像差

光学系统时,光束参数乘积是一个不变量^[1],缩小焦斑直径就会增大发散角,因此在实际耦合时要兼顾光斑直径和发散角两者都要满足要求。

如果使用的光纤为大芯径多模空芯传能光纤,除了满足式(1)的要求外,还应该考虑其他一些因素。目前,国内外比较认可的耦合条件有如下两种:

第一种最佳耦合条件是在考虑入射光源为 TEM_{00} 模时,以模式匹配方式获得的^[2]:

$$\frac{w}{a} = 0.6435$$

式中, w 为入射光束束腰直径; a 为空芯光纤内径。

基金项目:国防十一五预研重点项目资助课题。

作者简介:赵翔(1974-),男,工程师,在读博士,主要从事高功率激光耦合,光纤损伤机理以及高功率激光光纤传输效应等研究工作。E-mail: zhaoxiang7410@sina.com

收稿日期:2006-09-04; **修订日期:**2006-10-31

以这种方式耦合,光纤中存在的主要是 EH_{11} 模式,理论上的耦合效率可达 99% 以上。

第二种最佳耦合条件是在入射光源为平行光时,以几何光学方法得到的^[3],具体结构如图 1 所示。

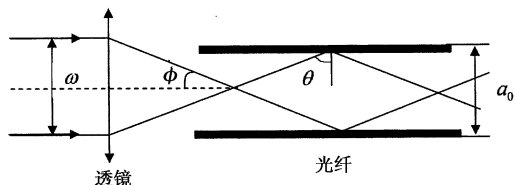


图1 耦合示意图

在最佳耦合条件下,入射光线与光纤轴线的夹角 ϕ 应满足: $\phi = \cos^{-1}(\lambda/2a_0)$

由图得到: $\theta = 90^\circ - \phi$, $\tan\theta = \frac{w}{2f}$

求得耦合透镜的焦距为 f 应为:

$$f = \left(\frac{a_0 w}{\lambda}\right) \times \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a_0}\right)^2\right]^{1/2} \approx \frac{a_0 w}{\lambda}$$

在满足光纤耦合条件,光强不超过光纤损伤阈值的情况下,耦合效率的大小与很多因素有关,比如光束形式、光束质量、耦合透镜的结构、聚焦焦斑大小、光束发散角、光纤的材料特性、光纤的数值孔径、光纤端面状态等。国内外有很多学者投入很大精力进行了大量的理论分析和实验研究,取得了一定成果。

陈吉星等人计算了激光能量在光纤端面的相对衍射损耗为:

$$\frac{\Delta w}{w} = e^{-2\left(\frac{d}{w}\right)^2}$$

式中, w 为光纤端面处激光束宽; d 为光纤纤芯直径。当 $w = \frac{2d}{3}$ 时, $\frac{\Delta w}{w} = 1\%$ 。因此,光纤端面处的激光光斑直径不大于光纤纤芯直径 $2/3$ 为宜。也有学者指出,在实际使用中,当 w/d 不能小于 0.4, 否则入射光在光纤中传输的损耗相当大,耦合引起的能量损失也相当大^[4]。杨祥林等人研究了激光与光纤的对准误差对耦合效率的影响,它包括三方面,即轴向误差 η_a 、纵向误差 η_s 、角度误差 η_θ , 并给出如下三个经验公式^[5]:

$$\eta_a = 1 - \frac{w^2(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha) - R^2(\theta - \sin\theta\cos\theta)}{\pi w^2}$$

式中, $\theta = \arcsin \frac{d^2 + R^2 - w^2}{2dR}$; $\alpha = \arcsin\left(\frac{R}{w}\sin\theta\right)$; d 为纵向误差。

$$\eta_s = \frac{S_f}{S_0} = \left(\frac{w}{w + s \tan\theta_c}\right)^2$$

式中, S_f 为激光光斑面积; S_0 为光纤纤芯面积; w 为激光焦斑半径; θ_c 为光纤的临界入射角; s 为轴向误差。

$$\eta_\theta = \exp\left(-\left(\frac{\pi n_2 w \theta}{\lambda}\right)^2\right)$$

式中, w 为激光束的束腰半径; n_2 为光纤的包层折射率; λ 为激光的波长; θ 为角度误差。

3 光纤的选择和端面处理

高功率激光光纤耦合技术研究中,光纤的选择至关重要。一般来说使用的是多模光纤。多模传能光纤主要分为两种:塑料包层石英光纤(PCS)和石英包层石英光纤(HCS)。塑料包层光纤的损伤阈值较低,可传功率较小,数值孔径范围较宽,最大可在 0.37 左右。石英包层石英光纤的损伤阈值较高,可传输功率较大,但数值孔径较小,在 0.2 左右^[6]。因此在数值孔径允许的情况下,选用石英包层石英光纤较好。

要实现光纤的可靠和高效耦合,对光纤端面进行处理是非常必要的。一是可以提高光纤端面的损伤阈值;二是可以提高光纤的透过率。常用的措施有抛光、镀增透膜。目前,抛光技术发展很快。离子抛光、化学腐蚀等超抛光技术比传统抛光技术可以提高光纤的损伤阈值;超抛光技术可以使均方粗糙度低于 0.1nm,而传统的抛光技术在 1~2nm^[7]。增透膜的设计较成熟,经典的由一层 MgF_2 构成,有时为了更低的反射率,需选用 3 层或多层膜。膜料的性质对膜层效果有决定性作用。因此,除了理想的折射率外,每次镀膜时的稳定的折射率、均匀的膜层、低吸收性以及牢固性都非常重要。

4 光纤的损伤阈值

石英光纤的损伤机理包括电子的雪崩电离、自聚焦、多光子电离和光自陷等。对光学元件损伤阈值的定量测量,可以遵循国际标准化组织规定的步骤。但由于光纤材料本身结构的特殊性,对它的标定目前国际上并没有达成共识。大多数学者认为,光纤材料的损伤阈值以其作为光学元件形式的损伤阈值为参考值进行修正,并配以实验确定最终结果。

一般说来,光纤的损伤阈值主要取决于表面光洁度和初始条件,而不是体材料,并与很多激光参量和材料的参量有关。根据大多数的理论和实验表

明,损伤阈值在材料表面初始条件一定的情况下,还与入射激光的脉宽、波长、透镜焦距、准直度、激光调节作用有很大的关系。

4.1 脉宽的影响

对于 100ps 以上的脉冲,传统方式的热聚焦会引起熔化和沸腾,从而导致损伤^[8]。其损伤阈值与 t_p^α 成正比(t_p 为脉宽)^[9],这与很多实验结果是非常吻合的。从 20ps 到超出 100ns 的范围内,观察到 t_p^α 随 α 值在 0.3 ~ 0.6 之间变化。当脉宽降到 100ps 以下时,从长脉冲热控制区到碰撞、多光子电离和形成等离子体控制的烧蚀区之间,有一个渐变区^[10]。若脉冲短于 20ps,那么在发射激光脉冲过程中,电子就没有足够的时间耦合到晶格中。损伤阈值继续随脉宽的缩短而下降,但速率低于 $t_p^{0.5}$ 。

4.2 波长的影响

波长对损伤阈值的影响比较复杂。在典型条件下,对于较短波长,损伤阈值也较低;当波长最短时,损伤阈值将急剧降低。

4.3 透镜焦距的影响

短焦距透镜与长焦距透镜相比,短焦距透镜能够提高光纤的损伤阈值。可以从两个方面来分析:

1)从耦合模式角度来看,长焦距透镜的入射光锥角度小,更接近于 Marcuse 的基模激励条件,从而绝大部分能量集中在基模,而短焦距透镜的入射光锥角度大,入射激光能量能较均匀的分配到更多的模式而不是集中在少数几个低阶模上,从而提高了损伤阈值;

2)从数值孔径角度来看,短焦距透镜比长焦距透镜的数值孔径更接近光纤的数值孔径,从而对提高激光损伤阈值有利。

4.4 准直度的影响

光纤与激光的准直度对损伤特性影响颇大。目前虽无理论公式对此进行标定,但国内外大量实验表明,对于单脉冲峰值功率兆瓦量级的高能量激光来说,准直度的要求非常严格。纵向误差和角度误差的影响将是致命的,而对于轴向误差的影响可能要好得多。因为轴向误差的大小也许只会对耦合效率产生一定的影响,而不至于使光纤破坏。从几何光学分析可知,输入激光在第一次全反射区附近为能量集中区,容易引起激光损伤。

4.5 光纤退火工艺的影响

在很多镀有厚膜层或薄膜层的光学材料上,始

终可观察到这样的结果:使光束的一个分量在开始发射时刚好处于单次脉冲的损伤阈值以下,然后逐渐增大其能量密度,通过这一过程可以永久地显著增大损伤阈值^[11]。根据一般经验,至少需要 5 次发射才能使光学器件达到调节所需最大阈值的 85%。此外,在调节中,第一次发射的能量密度大约是未调节的损伤阈值的一半。事实上,上述由弱到强的调节过程类似于对光纤进行退火处理,有利于提高光纤的损伤阈值。

因此,对于一定的材料,经验所得的定标律对阈值的变化仍具有指导作用。

5 结论

本文简要介绍了高功率激光耦合的基本特征和技术难点,从理论设计方法、耦合机理研究、光纤损伤特性、光纤材料特性和工艺几方面进行了深入分析和讨论。

参考文献:

- [1] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社,1999:64.
- [2] A Chester, R Abrams. Mode loss in hollow-wave-guide laser[J]. Appl. phys., 1972, 21: 576 - 579.
- [3] T Hidaka, K Kumada, J Shimada. GeO₂-ZnO₂-K₂O glass as the cladding material of 940cm⁻¹ laser light transmitting hollow-core-wave-guide[J]. Appl. phys., 1982, 52: 5284 - 5287.
- [4] 周桂耀,侯峙云,侯蓝田. 低损耗耦合器的研究[J]. 中国激光,2001,28:418 - 420.
- [5] 杨祥林,等. 光纤传输系统[M]. 南京:东南大学出版社,1991:141.
- [6] 李钰,张阔海,等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. 应用激光,2004,24(5):85.
- [7] W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社,2003:584.
- [8] J R Bettis, R A House II, A H Guenther. Natl. Bur. Stand. (U. S.) [S]. Spec. Publ., 1976, 462:338.
- [9] R M Wood. Laser damage in optical materials[M]. Boston: Hilger, 1986.
- [10] B C Stuart, M D Feit, S Herman, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. Phys. Rev. Lett., 1996, B53: 1749.
- [11] L Sheehan, M Kozlowski, F Rainer, et al. Large-area conditioning of optics for high-power laser system[A]. SPIE Proc., 1994, 2114: 559.