

文章编号: 0258-7025(2007)12-1639-04

# 一种新型高峰值功率激光注入光纤耦合技术

赵兴海, 高 杨

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 分析了导光锥的导光原理和激光注入光纤耦合原理, 通过射线理论分析并提出了导光锥的设计方法。通过对实验用导光锥进行导光率测试和耦合传输特性实验研究得到: 导光锥的导光率为 99%, 导光锥与光纤耦合效率大于 73%; 导光锥端面的激光诱导损伤阈值能量密度为  $56 \text{ J/cm}^2$ , 阈值功率密度为  $2.25 \text{ GW/cm}^2$ ; 在光纤发生端面损伤前其输出端输出激光能量达到 50 mJ。采用导光锥实现高峰值功率脉冲激光注入光纤耦合可以有效地提高光纤传输激光容量。

**关键词** 激光技术; 光纤耦合; 导光锥; 激光诱导损伤; 高峰值功率

**中图分类号** TN 012; TN 249 **文献标识码** A

## A Novel Coupling Technique of Optical Fiber for High Peak Power Pulse Laser

ZHAO Xing-hai, GAO Yang

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The guiding and coupling principles of light cone are analyzed, and the design parameters are calculated by the ray theory. Some parameters of light cone, such as a transmitting ratio and coupling efficiency were tested: the transmitting ratio is 99%, the coupling efficiency is beyond 73%, the laser-induced damage threshold energy density of front face of cone is  $56 \text{ J/cm}^2$ , and the threshold of power density is  $2.25 \text{ GW/cm}^2$ , output laser energy reaches 50 mJ before the light cone is damaged. Finally, it is proved that high peak power pulse laser can be coupled into fibers through light cone, which can increase the capacity of laser power.

**Key words** laser technique; fiber coupling; cone of light; laser-induced damage; high peak power

### 1 引言

在激光加工中通常需要采用光纤传输高功率激光。对于大功率连续激光的耦合技术已经较为成熟<sup>[1~4]</sup>, 而短脉冲高峰值功率激光的耦合技术还存在一定的技术问题<sup>[5]</sup>, 其主要原因是由于输入光纤端面处的激光功率密度很高, 超过了光纤端面损伤阈值<sup>[6,7]</sup>。在激光点火系统中, 采用的激光源为 10~40 ns 的高峰值功率脉冲 Nd:YAG 激光, 光纤传输的激光功率密度 ( $>1 \text{ GW/cm}^2$ ) 已经达到光纤损伤的阈值范围, 而光纤输入端面损伤阈值最低, 是光纤传输高功率脉冲激光系统的薄弱环节。普通的透镜聚焦<sup>[8]</sup>耦合方式, 要求小的注入光斑, 才能得到高

的耦合效率, 但是小的注入光斑势必引起大的功率密度, 为了解决这个矛盾, 提出了导光锥光纤耦合方式。圆锥形实心导光锥是一种非成像光学元件, 它可以实现对光的会聚或者扩散。本文主要讨论通过圆锥形导光锥会聚光束, 实现激光注入光纤的耦合原理。激光从导光锥大端注入、小端输出, 小端直径略小于纤芯直径。导光锥小端和光纤的连接可以采用熔融连接或光纤直接拉锥, 实现无缝隙连接。这样, 只在导光锥大端存在激光与界面的作用, 而大端面处由于注入光斑面积较大, 因此有效降低了输入端面的激光功率密度, 解决了由于输入端面功率密度高容易导致端面损伤的问题。

收稿日期: 2007-04-17; 收到修改稿日期: 2007-07-10

基金项目: 中物院科学技术发展基金重点项目(2007A05001)资助课题。

作者简介: 赵兴海(1984—), 男, 山东人, 研究实习员, 硕士, 主要从事高功率激光技术、光纤传输技术方面的研究。

E-mail: xinghaiuetc@126.com

## 2 导光锥耦合原理

### 2.1 导光原理

对于导光锥导光特性的分析,可以采用射线光学理论,即若要使光束能在导光锥中传播必须满足全反射理论。如图 1 所示,由于激光束的发散角很小(mrad),可假设为平行入射,则反射角应该满足全反射条件

$$\alpha \geq \arcsin(n_0/n), \quad (1)$$

式中  $n$  为导光锥芯材料折射率,  $n_0$  为导光锥芯外介质折射率,  $\alpha$  为入射光束在导光锥侧壁上形成的入射角。

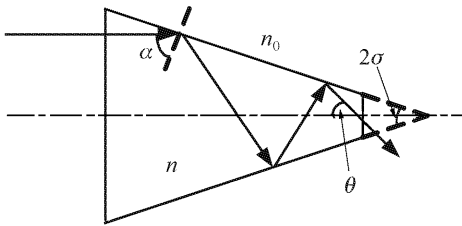


图 1 导光锥导光原理

Fig. 1 Guiding light scheme of light cone

假设光线在导光锥中发生了  $m$  次反射后射出,则由几何光学知识可以得出最后一次反射角  $\alpha_m$  为

$$\alpha_m = \frac{\pi}{2} - (2m - 1)\sigma, \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为导光锥顶角半角度。

由全反射条件

$$\alpha_m = \frac{\pi}{2} - (2m - 1)\sigma \geq \arcsin(n_0/n), \quad (3)$$

若要使光线能够在导光锥中传播,则导光锥角应该满足

$$(2m - 1)\sigma \leq \frac{\pi}{2} - \arcsin(n_0/n), \quad (4)$$

导光锥小端光线出射角  $\theta$  为

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha_m = (2m - 1)\sigma. \quad (5)$$

### 2.2 导光锥设计

当导光锥与光纤无缝连接后,光纤的接收角为

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right), \quad (6)$$

式中  $n_1$  为纤芯折射率,  $n_2$  为包层折射率。

若要使导光锥输出光束耦合进光纤中去,则导光锥出射角(入射光线的发散角)  $\theta$  应该小于光纤的接收角

$$\theta \leq \varphi, \quad (7)$$

得到

$$\sigma \leq \frac{1}{2m - 1} \arcsin\left(\frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right), \quad (8)$$

综合(4)和(8)式可以得出设计导光锥顶角时应该满足的条件

$$\begin{cases} \sigma \leq \frac{1}{2m - 1} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin(n_0/n) \right] \\ \sigma \leq \frac{1}{2m - 1} \arcsin\left(\frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \end{cases}. \quad (9)$$

在实际应用中,提出了一种透镜-导光锥耦合方案(如图 2 所示),采用透镜聚焦方式把激光聚焦成一个合适的光斑大小,注入到导光锥的大端,然后再完成激光的导光锥注入光纤耦合。此时要考虑光束被聚焦后的发散角问题。假设光束被聚焦后的发散角为  $\beta$ ,通过上面类似的分析可知,只要边缘光线能够耦合到光纤中去,则其他光线一定也可以满足全反射条件和符合光纤的最大接收角。通过射线光学理论分析,得出导光锥顶角应满足的条件是

$$\begin{cases} \sigma \leq \frac{1}{2m - 1} \left[ \frac{\pi}{2} - \beta - \arcsin(n_0/n) \right] \\ \sigma \leq \frac{1}{2m - 1} \left[ \arcsin\left(\frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) - \beta \right] \end{cases}. \quad (10)$$

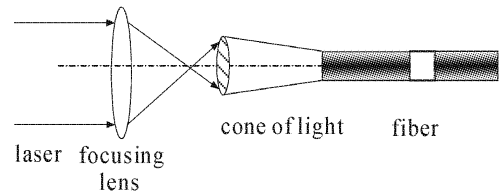


图 2 透镜-导光锥耦合方式示意图

Fig. 2 Lens-cone coupling means

## 3 注入耦合实验

实验用导光锥由光纤直接拉制而成,也可以叫作光纤锥,由中国电子科技集团第二十三所加工制造,其基本参数如表 1 所示。

表 1 光纤锥参数

Table 1 Light cone parameters

Parameters	Values
Core material	Fused silica
Core refractive index/cladding refractive index	1.458/1.44
Big end dia./small end dia.	900 $\mu\text{m}$ /400 $\mu\text{m}$
Length	20 cm

透镜-导光锥耦合实验装置如图 3 所示。其中,激光源为调 Q Nd:YAG 脉冲激光,脉宽 25 ns,最高单脉冲能量可达 300 mJ;法拉第光学旋转器是为了

防止光纤端面发射的激光返回到激光谐振腔中引起激光器不稳定;利用 He-Ne 激光器实现激光与导光锥的准确对准;能量计为美国相干公司的 MAX500,能量计 1 与能量计 2 测量值经过定标换算后即可得到输入输出激光能量;透镜焦距为 25 cm,注入光斑直径为 620  $\mu\text{m}$ 。

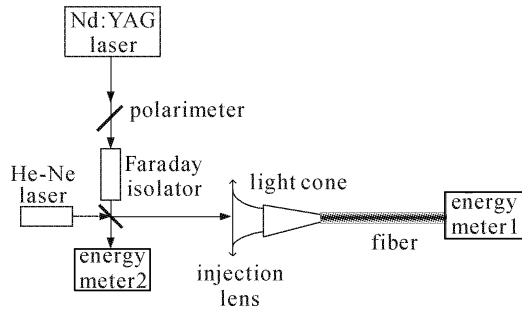


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

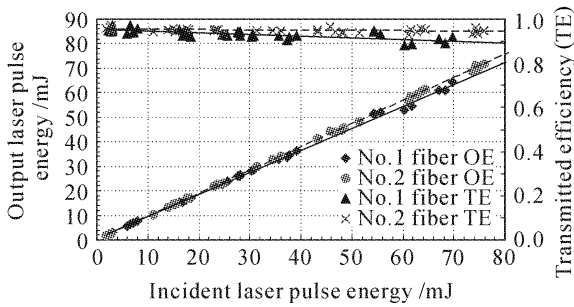


图 4 光纤锥传输激光能量特性测试结果

Fig. 4 Test results of laser energy transmission characteristic through fiber cone

实验用光纤锥的激光能量传输特性测试结果如图 4 所示。从图中可以看出,光纤锥与激光的耦合效率高达 96%,接近耦合极限。对于第一根实验用光纤锥而言,输入输出能量之间几乎为线性关系(OE 代表输出能量),也就是说随着输入能量的增加光纤锥的传输效率(TE)不变,等于耦合效率,即导光锥本身能量损耗很小,可以忽略。对于第二根光纤锥,随着输入能量的增加,传输效率略有下降,也就是说随着输入能量的增加,光纤锥发生了损耗,这与由于光纤锥内的杂质和加工参数误差等引起的光纤内线性和非线性损耗有关。

以光纤端面发生连续微弱火花的现象作为光纤锥端面损伤的判定,实验测得光纤锥的输入端面损伤阈值能量密度为 56  $\text{J}/\text{cm}^2$  (采用有效光斑大小计算),阈值功率密度为 2.25  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 。实验中发现虽然光纤锥前端面发生了轻微的火花现象,但是仍然能产生更高的能量输出,这与光纤端面损伤一般为

点损伤有关。也就是说端面的损伤只会造成耦合效率的下降,而耦合效率下降多少与光纤端面的破坏程度有关,光纤锥出现火花后传能特性测试结果如图 5 所示。可以看出,由于光纤锥端面出现了损伤,引起了耦合效率的下降,下降幅度达到 10%;但是随着输入激光能量的继续增大,输出激光能量基本呈现线性增长,当输入激光能量增大到 130 mJ 前,导光锥端面损伤没有扩大,形成了比较稳定的损伤点。

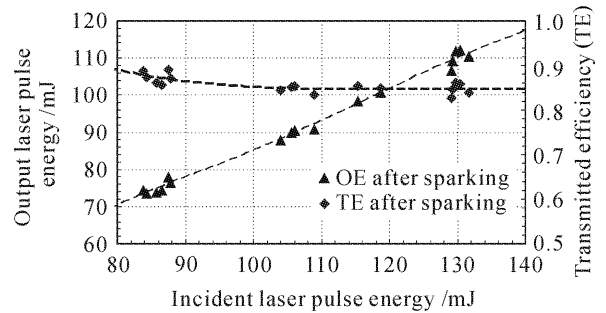


图 5 光纤锥出现火花后传能特性测试结果

Fig. 5 Test results of laser energy transmission characteristic after sparking

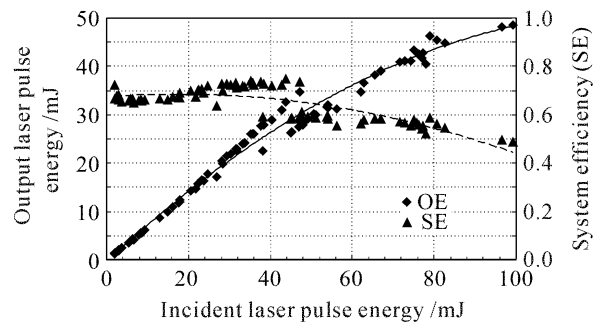


图 6 光纤锥-光纤耦合系统激光传输特性测试结果

Fig. 6 Test results of laser energy transmission characteristic on light cone-fiber coupling system

实验研究了光纤锥的光纤耦合特性。导光锥采用第一根,接收光纤的芯径为 600  $\mu\text{m}$ ,其端面与光纤锥小端的距离为 1 mm 的空隙。实验结果如图 6 所示,激光与光纤锥的耦合效率为 96%,光纤锥的传输损耗大约为 99%,光纤锥与光纤的耦合效率大于 73%。在光纤发生端面损伤前光纤输出端输出激光能量达到 50 mJ。

由图 6 中“系统效率(SE)”曲线可以看出,整个激光耦合传输系统的总传输效率可以达到 70%;随着输入能量的增大总的传输效率略有下降,原因是光纤内的非线性效应导致激光在光纤传输过程中能量损耗。

在实际应用中,导光锥与光纤之间必须实现无缝连接,才能真正降低光纤端面损伤。导光锥与光纤的连接可以采用熔融连接,另外,实验用的光纤锥可以直接由光纤拉制而成,即光纤锥和光纤可以通过工艺实现一体化制造,真正实现无缝连接。假设为满注入时,注入输入端面的激光平均功率密度降低的倍数  $k$  为

$$k = a^2/b^2, \quad (11)$$

式中  $a$  为导光锥输入端半径; $b$  为光纤芯半径。

实验用光纤锥的输入端面激光平均功率密度降低的最大倍数可达 5 倍。可见无论采用直接导光锥耦合式还是透镜-导光锥耦合式,两者皆可以有效地降低输入端面的激光功率密度,实现高峰值功率脉冲激光到光纤的可靠、高效耦合。

## 4 结 论

采用导光锥耦合方式可以有效地降低输入端面的激光功率密度,降低输入端面激光诱导损伤的概率。通过设计合理的导光锥,可以实现高峰值功率脉冲激光与光纤的高效率耦合。通过实验发现,实验用光纤锥的端面激光损伤阈值能量密度为  $56 \text{ J/cm}^2$ , 阈值功率密度为  $2.25 \text{ GW/cm}^2$ , 在光纤发生端面损伤前光纤输出端输出激光能量达到  $50 \text{ mJ}$ 。导光锥本身几乎无损耗,与激光的最大耦合效率可达  $96\%$ , 与光纤在存在一定缝隙的情况下耦合,耦合效率仍可达  $70\%$  以上。理论分析和实验结果证明了采用导光锥实现高峰值功率脉冲激光到光纤耦合的可行性,将来必定有广泛的应用空间。

致谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心

徐美健、段文涛研究实习员、於海武副研究员提供的实验帮助。

## 参 考 文 献

- Niu Gang, Fan Zhongwei, Wang Jiazan *et al.*. Technological progress of high-power fiber coupling LD [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(3):34~38  
牛 岗,樊仲维,王家赞等. 大功率半导体激光光纤耦合技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(3):34~38
- Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weimin *et al.*. Analysis and design of fiber coupled high power laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1296~1300  
周崇喜,刘银辉,谢伟民等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1296~1300
- Shi Peng, Li Xiaoli, Zhang Guifen *et al.*. Micro-prism stack beam shaper for high power laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11):1544~1547  
石 鹏,李小莉,张贵芬等. 大功率激光二极管的微片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出[J]. *光学学报*, 2000, **20**(11):1544~1547
- Gao Xin, Bo Baoxue, Qu Yi *et al.*. 808 nm output from a single-fiber-coupled laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):56~58  
高 欣,薄报学,曲 轶等. 808 nm 波长阵列半导体激光器单光纤耦合输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):56~58
- Yan Xiaoyuan, Ning Guobin, Jin Guangyong *et al.*. Research on coupling technique of optical fiber for narrow-pulse high power laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):349~350  
闫晓媛,宁国斌,金光勇等. 窄脉冲高功率激光光纤耦合技术研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):349~350
- 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
- R. E. Setchell. Laser-induced damage in step-index, multimode fibers [C]. *SPIE*, 1992, **1848**:15~23
- Zhan Yage, Lei Jianqiu, Liang Peihui *et al.*. Study of the laser beam quality and polarization degree in large-core optical power fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):173~176  
詹亚歌,雷建求,梁培辉等. 大芯径功率光纤中传输的激光束质量与偏振度研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2):173~176