

棒状光子晶体光纤种子光透镜耦合分析

李天琦, 房巨强, 雷 健, 李 宝, 毛小洁, 秘国江, 姜东升
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要: 本文对单透镜耦合系统进行了分析。分别模拟计算了当耦合透镜 $F = 103.26$ mm 时耦合效率与透镜位置的关系, 以及当透镜与光纤端面的距离为 120 mm 时耦合效率与透镜焦距的关系。利用单透镜耦合方式对棒状光子晶体光纤进行了耦合实验, 实验所用种子源是波长 $\lambda = 1030$ nm 的 SESAM 锁模固体激光器 ($M^2 \leq 1.2$), 所用棒状光子晶体光纤的芯径 $D = 85$ μm (模场直径 $D_{MF} = 65$ μm), 测得耦合效率约为 35% ~ 42%。由于光纤中掺杂的 Yb^{3+} 离子对 1030 nm 波长的激光有一定的吸收作用, 因此实际的耦合效率应该大于测定值。

关键词: 棒状光子晶体光纤; 耦合效率; 透镜耦合

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.009

Analysis of coupling lens for seed beam of ROD-PCF

LI Tian-qi, FANG Ju-qiang, LEI Jian, LI Bao, MAO Xiao-jie, BI Guo-jiang, JIANG Dong-sheng
(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: The single-lens coupling system was analyzed. The relationship between the coupling efficiency and the position of the lens is calculated when focal length of the lens is 103.26 mm, and the relationship between the coupling efficiency and the focal length of the lens is calculated when the distance between the lens and the end of fiber is 120 mm. The coupling experiment was conducted by using single-lens coupling system, and the seed in the experiment is a 1030 nm SESAM mode-locked solid-state laser ($M^2 \leq 1.2$) and the diameter of ROD-PCF core is 85 μm ($D_{MF} = 65$ μm). Finally, the measured coupling efficiency is about 35% ~ 42%. Because the doped Yb^{3+} ions in the fiber has a certain absorption effect on the 1030 nm laser, the actual coupling efficiency should be greater than the measured value.

Key words: ROD-PCF; coupling efficiency; lens coupling

1 引言

使用棒状光子晶体光纤 (ROD-PCF) 放大是一种新兴的超短脉冲放大方式。利用这种光纤可以很容易地得到大模场直径、高光束质量、大平均功率的超短脉冲激光^[1]。为了使种子光的功率在棒状光子晶体光纤中得到充分的放大, 并且光束质量的损失要最小, 种子光与棒状光子晶体光纤之间的耦合就显得尤为重要。

种子光耦合进入棒状光子晶体光纤的方式通常为透镜耦合, 这种耦合方式对透镜的位置、焦距等要求非常苛刻, 需要经过较为复杂的计算与仿真才能

获得合适的透镜焦距。透镜耦合系统在调整的时候具有一定的难度, 需要对单个透镜的多个维度进行调整, 以及对多个透镜进行配合调整^[2]才能达到最好的效果。种子光的光束质量经过多个光学系统后可能会出现恶化, 应当尽可能减少种子光通过的光学系统, 因此选择单透镜耦合作为种子光耦合进入棒状光子晶体光纤的耦合方式。

种子源产生的光束可以近似为高斯光束, 高斯光束到光纤耦合的基本原理就是高斯光束模场与光纤模场的模式匹配^[3-4], 本文仿真计算了在单透镜耦合情况下耦合效率与透镜位置和焦距的关系。利

用 $\lambda = 1030 \text{ nm}$ 的 SESAM 锁模固体激光器作为种子源 ($M^2 \leq 1.2$), 对芯径 $D = 85 \text{ }\mu\text{m}$ (模场直径为 $D_{\text{MF}} = 65 \text{ }\mu\text{m}$) 的棒状光子晶体光纤进行了耦合实验。

2 理论分析

单透镜耦合系统的原理图如图 1 所示。

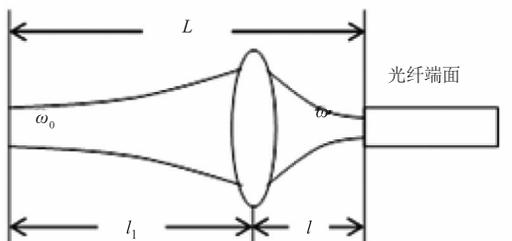


图 1 单透镜耦合原理图

Fig. 1 Schematic of the single-lens coupling system

理论推导中的光束为理想基模高斯光束, 光学系统中的透镜为理想透镜。L 是入射光束束腰与光纤端面之间的距离, l_1 为入射光束束腰与透镜的距离, l 为透镜与光纤端面之间的距离, ω_0 为入射光束束腰半径, ω 为光纤端面上的光斑半径。由已知可以得到:

$$L = l_1 + l \quad (1)$$

设透镜焦距为 F 则该系统的传播矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由已知入射光束的共焦参数为:

$$f = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (3)$$

则入射光束束腰处的 q 参数为:

$$q_{in} = if \quad (4)$$

通过该系统变换后透镜平面上的 q 参数为:

$$q_{out} = \frac{Aq_{in} + B}{Cq_{in} + D} \quad (5)$$

则输出光束束腰与聚焦镜的距离为:

$$l_2 = -\text{Re}(q_{out}) \quad (6)$$

输出光束的共焦参数为:

$$f_1 = \text{Im}(q_{out}) \quad (7)$$

输出光束的束腰半径为:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{f_1 \lambda}{\pi}} \quad (8)$$

输出光束在光纤端面上的 q 参数为:

$$q = if_1 + (l - l_2) \quad (9)$$

输出光束在光纤端面上的光斑半径为:

$$\omega = \omega_1 \sqrt{1 + \frac{(l - l_2)^2}{f_1^2}} \quad (10)$$

对于经过系统变换后的基模高斯光束, 其在光纤端面上的模场分布可以表示为^[5]:

$$U(r, l - l_2) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{U_0 \omega_1}{\omega} \exp\left[-jk(l - l_2) - \frac{jk}{2q} r^2\right] \quad (11)$$

其中, U_0 为模场振幅, 波数 k 为:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (12)$$

对于光子晶体光纤, 其端面模场分布为可以近似为高斯分布^[6-7]:

$$U_{\text{ROD-PCF}}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} U_{\text{ROD-PCF0}} \exp\left[-\frac{r^2}{D_{\text{MF}}/2}\right] \quad (13)$$

其中, $U_{\text{ROD-PCF0}}$ 与 D_{MF} 分别为 ROD-PCF 的模场振幅和模场直径。则理想的耦合效率为^[7]:

$$\eta_0 = \frac{\left| \int_S U \cdot U_{\text{ROD-PCF}}^* dS \right|^2}{\int_S |U|^2 dS \cdot \int_S |U_{\text{ROD-PCF}}|^2 dS} \quad (14)$$

其中, S 为光端面所在平面; $U_{\text{ROD-PCF}}^*$ 为 $U_{\text{ROD-PCF}}$ 的共轭场。

3 仿真与分析

结合式(1)~(14)分别计算出当透镜焦距、入射光束束腰与光纤端面的距离一定时耦合效率随透镜位置的变化关系以及当透镜与光纤端面的距离、入射光束束腰与光纤端面的距离一定时耦合效率随透镜焦距的变化关系。对于光纤端面当光束入射并且通过光纤传导输出时, 光纤的前后两个端面会产生菲涅尔反射损耗。一般来说单独一个端面的菲涅尔反射损耗约为 3.5%~4%, 光纤的前后两个端面总的菲涅尔反射损耗约为 8% 左右^[6]。当忽略高斯光束与光纤耦合的失准损耗时, 前两种情况下的耦合效率如图 2 与图 3 所示。模拟计算所用的参数为: 光纤棒的模

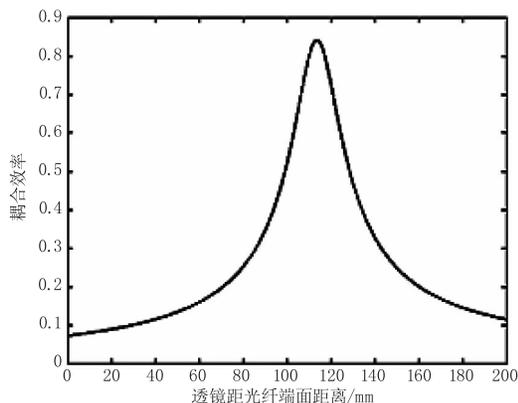


图 2 耦合效率与透镜位置的关系

Fig. 2 The relationship between the coupling efficiency and the lens position

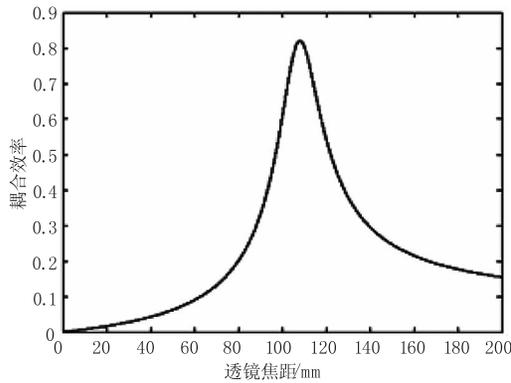


图3 耦合效率与透镜焦距的关系(l_1 与 l 为定值)

Fig. 3 The relationship between coupling efficiency and lens focal length
场直径 $D_{MF} = 65 \mu\text{m}$, 所用光束的波长 $\lambda = 1030 \text{ nm}$, 束腰半径 $\omega_0 = 0.4 \text{ mm}$, 光束质量 $M^2 = 1$, 入射光束束腰与光束端面之间的距离 $L = 885 \text{ mm}$, 第一种情况所用的透镜焦距 $F = 103.26 \text{ mm}$, 第二种情况透镜与光纤端面的距离 $l = 120 \text{ mm}$ 。

从图 2 可以看出, 当入射光束束腰与光纤端面的距离光纤端面以及透镜的焦距一定时, 耦合效率随着透镜与光纤端面的距离增大而先增大后减小。从图 3 可以看出, 当入射光束束腰与光纤端面的距离以及透镜与光纤端面距离一定时, 耦合效率随着透镜焦距增大而先增大后减小。两种情况下最大耦合效率均可达到 80% 以上。

从图 2 中可以看到, 当透镜焦距为 103.26 mm 且与端面的距离在 $90 \sim 150 \text{ mm}$ 之间时耦合效率会急剧地变化。从图 3 中可以看到, 当透镜固定在距离端面 120 mm 处时, 透镜的焦距在 $80 \sim 140 \text{ mm}$ 之间时耦合效率会急剧地变化。

实验中可能还会遇到横向对准误差所带来的横向偏移损耗, 以及角度误差所带来的角度偏移损耗, 这两种损耗也会在一定程度上造成耦合效率的下降, 具体的影响情况在所引文献[6]有很详细的解释。因此在实际实验中, 要求耦合透镜的调整架有非常高的调节精度。

4 实验

4.1 实验方案

实验所种子源为输出波长 $\lambda = 1030 \text{ nm}$ 、光束质量 $M^2 \leq 1.2$ 的 SESAM 锁模固体激光器, 所用光纤棒为 NKT 公司生产的 aeroGAIN-ROD-PM85, 纤芯直径为 $D = 85 \mu\text{m}$ 、模场直径 $D_{MF} = 65 \mu\text{m}$ 、纤芯数值孔径 $NA = 0.015$, 为了避免较高的菲涅尔反射损耗, 光纤两端面均镀有增透膜。在光学实验台上分别搭建两种实验光路, 所使用的透镜焦距均为 $F = 103.26 \text{ mm}$, $M_1 - M_4$ 为 45° 全反射镜。实

验光路图如图 4 所示。

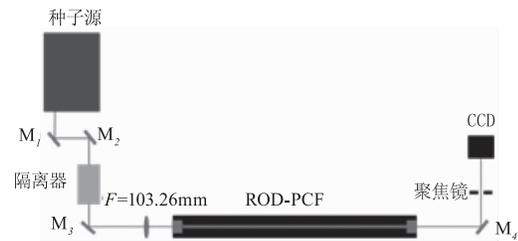


图4 单透镜耦合实验光路简图

Fig. 4 The light path diagram of single-lens coupling system

单透镜耦合的情况下, 种子源产生的光束经过两次反射通过隔离器, 再经过一次反射并由透镜耦合进入光纤棒。由于光纤棒对于各种对准误差特别敏感, 因此, 透镜的镜架必须可以调节镜子的前后、左右、上下、俯仰、左右倾斜五个维度并且精度很高。

单透镜情况下的调整过程是: 首先调节 M_2 与 M_3 使光束基本水平, 并且左右偏差较小, 光斑高度与光纤架的高度基本一致; 然后在光路中加入光纤棒, 使光纤棒的前端与光斑的中心对准, 并调节光纤棒的后端, 用荧光片反复观察, 直到通过光纤棒的光强度最大为止; 接着在光纤棒的后端加入 CCD 和一个透镜, 并调节 CCD 与透镜的位置, 使得 CCD 上可以看到光斑的全貌为止; 最后将透镜的放到模拟计算所得到的最佳位置附近, 调整透镜使得 CCD 上的光斑为一个接近圆形或圆形的光斑, 并且周围的杂散光亮度最低为止。

测量功率时光路图如图 5 所示。

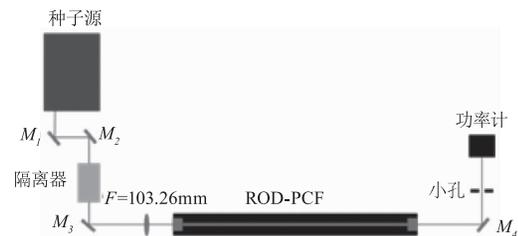


图5 功率测量光路简图

Fig. 5 Schematic diagram of power measurement

在测量功率之前在功率计的前面加入一个小孔以阻挡纤芯光以外的杂光, 只让纤芯光进入功率计。之后对输入和输出光进行多组测量并计算耦合效率。

4.2 实验结果与分析

在单透镜耦合下分别测量了三组不同输入功率情况下输出功率与耦合效率的情况, 如表 1~3 所示。

根据三组数据可以看出, 单透镜情况下耦合效率基本稳定在 $35\% \sim 42\%$, 比仿真得到的 80% 小了将近一半, 导致这种情况的主要原因可能以下几点:

表1 输入功率、输出功率与耦合效率(组1)

Tab.1 Input power output power and coupling efficiency(Group 1)

P_{in}/mW	53.5	53.1	54.3
P_{out}/mW	20.4	22.5	23.2
$\eta/\%$	38.1	42.4	42.7

表2 输入功率、输出功率与耦合效率(组2)

Tab.2 Input power output power and coupling efficiency(Group 2)

P_{in}/mW	61.0	63.1	62.4
P_{out}/mW	22.5	22.1	23.5
$\eta/\%$	36.8	35.0	37.7

表3 输入功率、输出功率与耦合效率(组3)

Tab.3 Input power output power and coupling efficiency(Group 3)

P_{in}/mW	117.3	100.1	101.5
P_{out}/mW	46.1	42.3	35.1
$\eta/\%$	39.3	42.2	34.6

①种子源的光束质量是 $M^2 \leq 1.2$ 并不是仿真中所用的理想状态下的基膜高斯光束,这导致了耦合效率的降低。

②种子源输出的光束在光路中经过三次反射和一个透镜,可能造成质量的进一步恶化,这也可能使耦合效率降低。

③耦合透镜调整的精度不高造成了各种对准误差的出现,由于光纤对各种对准误差十分敏感,因此造成了耦合效率的降低。

④由于棒状光子晶体光纤为增益光纤,光纤中掺杂有 Yb^{3+} 离子,而光纤中的 Yb^{3+} 离子对 1030 nm 的波段有一定的吸收作用,这种吸收在测定过程中是无法避免的,因此导致测得耦合效率偏低。

经过上述耦合实验可以得知:要想得到良好的耦合结果种子源的光束质量必须很高圆度必须要好,只有这样才可以和光纤的模式形成良好的匹配。并且,所经过的光学系统要尽量少的,以避免光束质量逐渐恶化。

5 结论

本文通过仿真分析了在单透镜耦合系统下,当光纤和种子源位置固定透镜位置与耦合效率的关系,以及当种子源、光纤和透镜位置均固定时耦合效率与透镜焦距的关系。并且对单透镜耦合情况进行

了实验测定,实验中通过调整可以发现透镜的最佳位置与仿真结果相符,但是测量得到的耦合效率由于各种原因低于仿真结果。通过仿真分析与实验测定的结果,得到了后续放大实验的改进方案,对后续实验的进行起到了关键性的作用。

参考文献:

- [1] WANG Ziwei, WANG Zhaokun, ZOU Feng, et al. High-peak-power rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10):1001001. (in Chinese)
王子薇,王兆坤,邹峰,等. 高峰值功率皮秒脉冲棒状光子晶体光纤放大器[J]. 中国激光, 2016, 43(10):1001001.
- [2] WEI Rong, WANG Yuzhu. Telescope system used to the single mode fiber coupling of the laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(8):687-690. (in Chinese)
魏荣,王育竹. 望远镜准直系统应用于激光的单模光纤耦合[J]. 中国激光, 2003, 30(8):687-690.
- [3] Lazzaroni Massimo, Zocchi Fabio E. Optical coupling from plane wave to step-index single-mode fiber [J]. Optics Communications, 2004, 237:37-43.
- [4] Sakai Jun-Ichi, Kimura Tatsuya. Design of a miniature lens for semiconductor laser to single-mode fiber coupling [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(10):1059-1066.
- [5] LU Yaxiong, YANG Yapei, CHEN Shufen. Laser transmission and transform technology[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1999: 56-57. (in Chinese)
卢亚雄,杨亚培,陈淑芬. 激光束的传输和变换技术[M]. 成都:电子科技大学出版社, 1999:56-57.
- [6] XIAO Zhigang, LI Bincheng. Single-lens coupling efficiency of a fundamental gaussian beam to an optical fiber[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(8):29-34. (in Chinese)
肖志刚,李斌成. 高斯光束到光纤的单透镜耦合[J]. 光电工程, 2008, 35(8):29-34.
- [7] CHEN Xuekun, ZHANG Lu, WU Zhiyong. Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber photonic crystal fiber [J]. Chinese Optics, 2013, 6(2): 208-215. (in Chinese)
陈雪坤,张璐,吴志勇. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 208-215.
- [8] C Ruilier. A study of degraded light coupling into single-mode fibers[J]. Proc of SPIE, 1998, 3350:319-329.