

高功率非对称泵浦耦合器理论研究

谭祺瑞,葛廷武,王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

摘要: 高功率非对称泵浦耦合器是高功率连续光纤激光器的关键无源光器件, 它可以将多路泵浦光高效率地耦合进主光纤中, 从而为光纤激光器提供所需的泵浦光功率, 但已有双波导耦合理论并不能直接应用于该型耦合器的研究。为解决这一问题, 在双波导定向耦合器的不完全耦合理论基础上, 针对高功率泵浦耦合器非对称的特点, 将其耦合系数和光功率方程组做了进一步推导, 并进行了数值仿真, 研究结果表明: 两光纤中的光功率按照一定周期变化, 当泵浦光纤的锥角在 1° ~ 1.5° 之间时, 可以获得 97% 以上的最佳耦合效率, 且与其对应耦合长度的局部变化对耦合效率的影响较小。该研究结果对高功率非对称泵浦耦合器的设计及制作均具有指导意义。

关键词: 泵浦耦合器; 高功率; 非对称; 理论模型

中图分类号: TN245; TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0105004

Theoretical research of high-power asymmetric pump combiner

Tan Qirui, Ge Tingwu, Wang Zhiyong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: High-power asymmetric pump combiner is the key passive optical device of the high-power continuous all-fiber laser. Multiple pump lights are efficiently coupled into the main fiber through the high-power asymmetric pump combiner, so that enough pump powers are provided for the high-power fiber laser. The current coupling theory of the double waveguide directional combiner can't be directly applied to the study of the high-power asymmetric pump combiner. In order to solve this problem, the incomplete coupling theory of the double waveguide directional combiner was used as the foundation and the asymmetry was used as the feature of the high-power pump combiner. The coupling coefficients equations and the power equations of the high-power asymmetric pump combiner were further derived and the simulation results were also obtained. The conclusions are as follows. The powers of the pump fiber and the main fiber change periodically. When the taper angle of the pump fiber is between 1° and 1.5° , more than 97% coupling efficiency is obtained. The local variation of the coupling length has little effect on the coupling efficiency. The conclusions are instructive for the designs and productions of high-power fiber coupler.

Key words: pump combiner; high power; asymmetry; theoretical model

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-08

基金项目: 工业用高功率全光纤激光器的开发(2010ZX04013-052)

作者简介: 谭祺瑞(1985-), 男, 博士生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。Email: tanqirui@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率光纤激光器、大功率半导体激光器方面的研究。

Email: zywang@bjut.edu.cn

0 引言

在高功率连续光纤激光器的研制过程中, 如何将多路半导体激光器产生的大功率泵浦光高效率地耦合进稀土掺杂的双包层光纤中是研究人员首先要解决的问题^[1-2], 这种泵浦光高效率的耦合主要是通过高功率非对称泵浦耦合器来实现的。所以高功率非对称泵浦耦合器是高功率连续光纤激光器的重要无源光器件, 它可以在不影响主光纤中信号光传输的前提下, 将多路大功率泵浦光高效率地耦合进纤芯中掺有稀土元素的双包层光纤中, 从而为光纤激光器提供所需的泵浦光功率^[3-5]。

研究高功率非对称泵浦耦合器的耦合理论所采用的物理模型是双波导定向耦合器, 对其进行理论分析常采用的是耦合模理论。早在 1972 年, Allan W. Snyder 对光纤之间的耦合模理论进行了详细地阐述, 分析了不同光纤中所传输模式之间能量的相互耦合, 并在此工作基础上于 1973 年推导出了光纤中的耦合系数和传输功率方程^[6-7]。国内马春生在其著作《光波导模式理论》一书中^[8], 针对双波导定向耦合器建立了物理模型, 首先推导出了一般形式的耦合模方程, 然后用该耦合模方程来处理双波导定向耦合问题, 通过求解耦合模方程, 得到了两波导中传输功率的具体表达式, 通过分析该表达式可以得到如下结论, 若两波导的形状、尺寸和折射率分布完全相同, 则两波导之间的耦合为理想耦合, 若两波导的形状、尺寸和折射率分布不完全相同, 则两波导之间的耦合为非理想耦合, 即一个波导中传输的光不能完全耦合进另一个波导中。以上双波导耦合模理论虽然能够对高功率非对称泵浦耦合器泵浦光纤和主光纤之间的耦合现象进行理论解释, 但该理论并没有结合高功率非对称泵浦耦合器实际生产过程中所采用的泵浦光纤和主光纤产品的技术指标来得到耦合系数、传输功率和耦合效率的具体结果。

文中在双波导定向耦合器的不完全耦合理论基础上, 针对高功率非对称泵浦耦合器的泵浦光纤和主光纤物理参数不同以及在耦合区泵浦光纤芯径变化主光纤芯径不变的特点, 建立了对应的理论模型, 将耦合系数和光功率方程组做了进一步推导, 并结合实际生产过程中所采用的泵浦光纤和主光纤产品

的技术指标, 采用数学计算软件 MATLAB 对该理论模型进行了数值仿真, 研究结果能够为高功率非对称光纤耦合器的设计及制作提供理论指导。

1 理论分析

高功率非对称泵浦耦合器的结构如图 1 所示, 该图显示出泵浦光纤在耦合区的芯径逐渐变小, 这种变化破坏了泵浦光在泵浦光纤中的全反射条件, 使泵浦光纤中的光场模式在传输过程中耦合进主光纤中, 通过控制泵浦光纤锥角 θ 的大小和耦合区的长度, 可以将泵浦光高效率地耦合进主光纤中。根据以上高功率非对称泵浦耦合器的结构特点, 并沿轴向取无穷小长度建立其物理模型如图 2 所示, 其中光波导 1 代表泵浦光纤, 光波导 2 代表主光纤, 两个光波导平行且相互靠近。



图 1 高功率非对称泵浦耦合器

Fig.1 High power asymmetric pump coupler

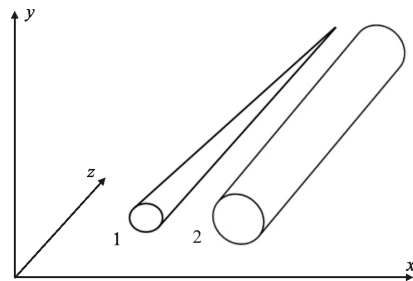


图 2 高功率非对称泵浦耦合器模型

Fig.2 Model of high power asymmetric pump coupler

根据双波导定向耦合器的不完全耦合理论, 高功率非对称光纤耦合器的耦合系数为:

$$K_{12} = \omega \epsilon_0 \frac{\iint (n_2^2 - n_0^2) e_2^* \cdot e_1 dr d\varphi}{\iint (e_2 \times h_2^* + e_2^* \times h_2) \cdot z_0 dr d\varphi} \quad (1)$$

$$K_{21} = \omega \epsilon_0 \frac{\iint (n_1^2 - n_0^2) e_1^* \cdot e_2 dr d\varphi}{\iint (e_1 \times h_1^* + e_1^* \times h_1) \cdot z_0 dr d\varphi} \quad (2)$$

耦合系数 K_{12} 描述波导 1 中的模场对波导 2 传输模场影响的大小, 耦合系数 K_{21} 描述波导 2 中的模场对波导 1 传输模场影响的大小。由于高功率非对称光纤耦合器所采用泵浦光纤包层厚度与其纤芯直径、主光纤直径相比较小, 而且在耦合区泵浦光纤直径逐渐变小, 这使得泵浦光纤包层厚度进一步减小, 所以此处忽略泵浦光纤包层。根据以上分析, 公式(1)和(2)中模式场 e_1, e_2, h_1, h_2 采用纤芯中的模场分布形式:

$$e_1(r_1, \varphi) = c_0 \frac{iR_1}{U_1} \omega \mu_0 J_1 \left(U_1 \frac{r_1}{R_1} \right) \quad (3)$$

$$h_1(r_1, \varphi) = -c_0 \frac{iR_1}{U_1} \beta_1 J_1 \left(U_1 \frac{r_1}{R_1} \right) \quad (4)$$

$$e_2(r_2, \varphi) = c_0 \frac{iR_2}{U_2} \omega \mu_0 J_1 \left(U_2 \frac{r_2}{R_2} \right) \quad (5)$$

$$h_2(r_2, \varphi) = -c_0 \frac{iR_2}{U_2} \beta_2 J_1 \left(U_2 \frac{r_2}{R_2} \right) \quad (6)$$

式中: $r_1 < R_1, r_2 < R_2, U_1^2 = (k^2 n_1^2 - \beta_1^2) R_1^2, U_2^2 = (k^2 n_2^2 - \beta_1^2) R_2^2, \beta$ 为两根光纤在孤立状态时的传播常数, 其含义是描述单位长度内光相位的变化量, 说明该光场具有波动性, 其具体形式为 $\beta_1 = n_1 k \sin \theta_1, \beta_2 = n_2 k \sin \theta_2$ 。由此可推导出耦合系数 K_{12} 和 K_{21} 的最终表达形式为:

$$K_{12} = \frac{(n_2^2 - n_0^2) \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 U_2 R_1 \iint J_1 \left(U_1 \frac{r_1}{R_1} \right) dr d\varphi \iint J_1 \left(U_2 \frac{r_2}{R_2} \right) dr d\varphi}{2\beta_2 U_1 R_2 \iint J_1^2 \left(U_2 \frac{r_2}{R_2} \right) dr d\varphi} \quad (7)$$

$$K_{21} = \frac{(n_1^2 - n_0^2) \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 U_1 R_2 \iint J_1 \left(U_1 \frac{r_1}{R_1} \right) dr d\varphi \iint J_1 \left(U_2 \frac{r_2}{R_2} \right) dr d\varphi}{2\beta_1 U_2 R_1 \iint J_1^2 \left(U_1 \frac{r_1}{R_1} \right) dr d\varphi} \quad (8)$$

从公式(7)和(8)中可以看出, 耦合系数与波导直径、折射率和耦合光波长等物理参量有关, 其中波导 1 的直径沿 z 轴正向逐渐变小, 而波导 2 的直径保持不变。考虑到高功率非对称泵浦耦合器的泵浦光是由波导 1 的端口输入的, 设此位置为初始位置, 其坐标 $z=0$, 则有 $c_1(z)=c_1(0), c_2(z)=0$, 令 $2\delta = \beta_1 - \beta_2$, 则两波导中的功率方程组为:

$$P_1(z) = |c_1(0)|^2 \left[\cos^2(\sqrt{K_{12}K_{21} + \delta^2} z) + \frac{\delta^2}{K_{12}K_{21} + \delta^2} \sin^2(\sqrt{K_{12}K_{21} + \delta^2} z) \right] \quad (9)$$

$$P_2(z) = |c_1(0)|^2 \frac{K_{12}K_{21}}{K_{12}K_{21} + \delta^2} \sin^2(\sqrt{K_{12}K_{21} + \delta^2} z) \quad (10)$$

根据耦合系数 K_{12} 和 K_{21} 的值可以求出两波导中的功率 P_1 和 P_2 , 由公式(9)和(10)可以看出, 波导 1 和波导 2 中的光功率按照一定的周期变化, 耦合系数 K_{12} 和 K_{21} 是关于 z 的变量, 其耦合周期和耦合效率都不是固定值, 其变化形式与光波导 1 芯径的变化率有关。另外, 虽然波导 1 的光不能完全耦合进波导 2 中, 但为了使波导 1 中的泵浦光高效率地耦合进波导 2 中, 要合理地设计耦合区波导 1 的锥角大小。

2 仿真研究

根据上述高功率非对称泵浦耦合器耦合理论, 在仿真过程中采用的光波导 1 即泵浦光纤是 Nufern 公司的 MM-S105/125-22A 多模功率传输光纤, 光波导 2 即主光纤是 YDF-20/400-VIII 大模场面积双包层掺镱光纤, 所采用的泵浦光波长为 976 nm, 设定光波导 1 的锥角为 1° , 根据理论模型 1 中所推导的两光波导中耦合系数方程组和光功率分布方程组, 得到两个耦合系数 K_{12} 和 K_{21} 随 z 的变化如图 3 所示。

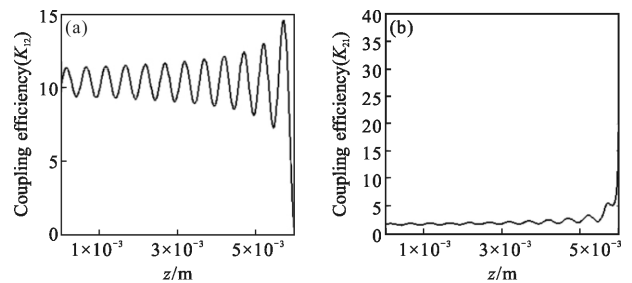


图 3 耦合系数 K_{12} 和 K_{21} 随 z 的变化关系

Fig.3 Relation curve of K_{12}, K_{21} versus z

从图 3 可以看出, 随着光波导 1 芯径的逐渐变小, 耦合系数 K_{12} 和 K_{21} 均振荡变化并逐渐变大, K_{12} 波动较为剧烈, 而 K_{21} 波动较为平稳, 说明 K_{12} 受光波导 1 芯径变化的影响较大, 而 K_{21} 受光波导 1 芯径变化的影响较小。另外从两幅图的纵坐标数据对比可以看出两个耦合系数在变化过程中 K_{12} 始终大于 K_{21} , 说明波导 1 中模场对波导 2 传输模场的影响要大于波导 2 中模场对波导 1 传输模场的影响。

图 4(a)是在耦合区内两个波导中光功率 P_1 和 P_2 随 z 的变化关系, 图 4(b)是在耦合区局部范围内 P_1 和 P_2 随 z 的变化关系, 图 4(c)是耦合效率随 z 的

变化关系,图 4(d)是在耦合区局部范围内耦合效率随 z 的变化关系。从 4 幅图中可以看出,两波导中的光功率随耦合长度周期性快速振荡,耦合功率振幅包络呈周期性缓慢变化。当波导 1 中的光功率达到最小时,波导 2 中的光功率达到最大,但此相对最大值并不是 1,说明在高功率非对称光纤耦合器中波导 1 中的光不能完全耦合进波导 2 中,该耦合是不完全耦合。将耦合区光波导 1 的锥角设定为 3 个角度,分别为 0.5° 、 1° 和 2° ,进而分析光波导 1 锥角的不同对耦合长度和耦合效率的影响,如图 5 所示。

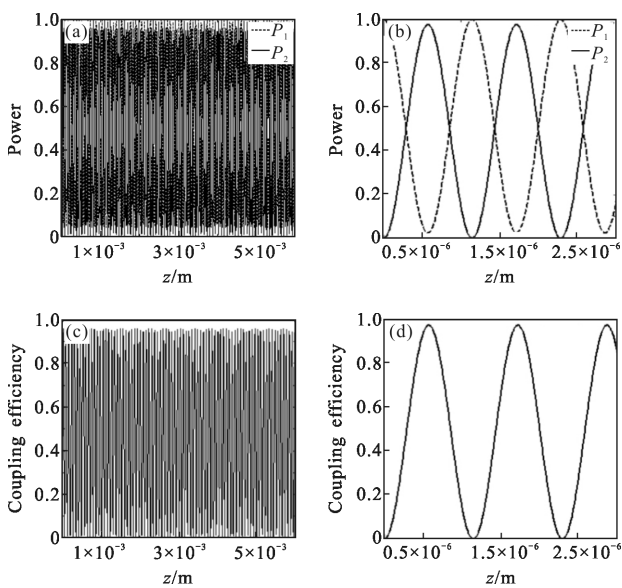


图 4 P_1 、 P_2 和耦合效率随 z 的变化

Fig.4 P_1 , P_2 , coupling efficiency versus z

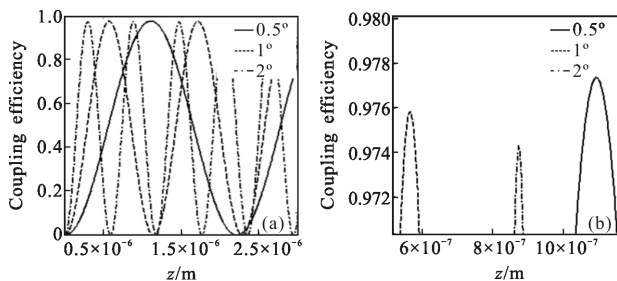


图 5 锥角为 0.5° 、 1° 、 2° 时的耦合长度和耦合效率

Fig.5 Coupling length and coupling efficiency at the taper angle of 0.5° , 1° , 2°

从图 5(a)可以看出,光波导 1 的锥角与耦合周期长度呈现出反比变化趋势,即锥角越小耦合周期长度越大;图 5(b)是图 5(a)锥角为 0.5° 、 1° 、 2° 时的最大耦合效率的局部放大图,从图中可以看出,光波

导 1 的锥角与耦合效率振幅也呈现出反比变化趋势,即锥角越小最大耦合效率越大。为了详细地描述出耦合长度、耦合效率与锥角的变化关系,文中在锥角 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内,绘制出了图 6 耦合长度、耦合效率与锥角的关系。

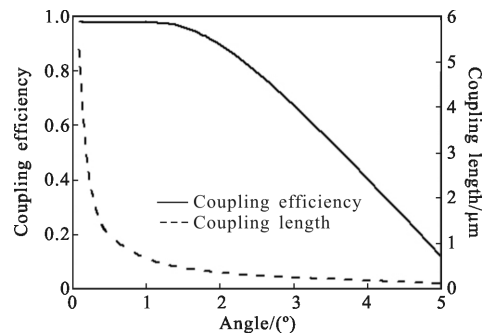


图 6 耦合长度、耦合效率与锥角的关系

Fig.6 Coupling length and coupling efficiency at the taper angle of 0° to 5°

图 6 说明当波导 1 的锥角小于 1.5° 时,最佳耦合效率可达到 97% 以上且受锥角变化的影响较小。当锥角大于 1.5° 时,最佳耦合效率随锥角的增大而快速下降,所以为了使波导 1 中的泵浦光高效率地耦合进波导 2 中,波导 1 的锥角要控制在 1.5° 以内。对于耦合长度,当锥角小于 1° 时,最佳耦合长度受锥角变化的影响较大,随锥角增加快速降低;当锥角大于 1° 时,最佳耦合长度随锥角变化趋于平缓,最佳耦合长度受锥角变化的影响较小。所以为了获得较高耦合效率,同时降低耦合长度对制作工艺的要求,建议控制光波导 1 的锥角在 $1^\circ \sim 1.5^\circ$ 之间。

3 结论

文中根据双波导定向耦合器的不完全耦合理论,针对高功率泵浦耦合器非对称的特点建立了物理模型,并将耦合系数和传输功率方程做了进一步的推导,最后进行了数值仿真,研究结果表明泵浦光纤中传输模场对主光纤中传输模场的影响要大于主光纤中传输模场对泵浦光纤中传输模场的影响;两光纤中的光功率按照一定周期变化,即两光纤中的光功率随耦合长度周期性快速振荡,耦合功率振幅包络呈周期性缓慢变化;当泵浦光纤的锥角处在 $1^\circ \sim 1.5^\circ$ 之间时,可以获得 97% 以上的最佳耦合效率,且与其对应耦合长度的局部变化对耦合效率的影响较

小。文中的研究结果可以为高功率非对称泵浦耦合器生产过程中泵浦光纤和主光纤的选取,以及耦合区的泵浦光纤锥角和耦合长度的设计提供理论指导。

参考文献:

- [1] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, et al. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138. (in Chinese)
楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- [2] Zhang Jun, Feng Ying, Wei Li'an, et al. Design of end pumping coupling system for high power fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 203-207. (in Chinese)
张俊, 冯莹, 魏立安, 等. 高功率光纤激光器端面泵浦耦合系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 203-207.
- [3] Liu Deming, Yan Changling. Key technologies and applications for high power fibre laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 105-109. (in Chinese)
刘德明, 阎嫦玲. 高功率光纤激光器的关键技术及应用 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 105-109.
- [4] Gong Zhiqun, Wang Xiaolin, Cao Jianqiu, et al. Characteristics of homemade high power fiber pump combiner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2658-2662. (in Chinese)
龚智群, 王小林, 曹润秋, 等. 国产高功率光纤泵浦合束器特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2658-2662.
- [5] Thomas Theeg, Hakan Sayinc, Jorg Neumann, et al. Pump and signal combiner for bi-directional pump of all-fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (27): 28125-28141.
- [6] Snyder A W. Coupled-mode theory for optical fibers [J]. *JOSA*, 1972, 62(11): 1267-1277.
- [7] McIntyre P D, Snyder A W. Power transfer between optical fibers [J]. *JOSA*, 1973, 63(12): 1518-1527.
- [8] Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Mode Theory of Optical Waveguides [M]. Changchun: Jilin University Press, 2007: 322-329.