

基于单模光纤选模机制的单模输出 6 芯光纤激光器

张晓磊^{1,2,3} 彭刚定³ 张行愚^{1,2} 王青圃^{1,2} 常 军^{1,2}

¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100
² 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 济南 250100
³ 新南威尔士大学电子工程与电信学院, 澳大利亚 悉尼 2052

摘要 为了实现多芯光纤激光器的单模输出, 提出一种新的选模机制, 即利用单模光纤进行选模。采用单模光纤和全反镜相结合作为选模器件, 可以使 6 芯光纤激光器中同相位超模的耦合效率远远大于其他高阶超模, 从而使高阶超模得到有效的抑制, 实现高亮度的同相位超模单模输出。为了提高同相位超模的耦合效率, 可以进一步优化单模光纤纤芯尺寸, 同时调节单模光纤和 6 芯光纤之间的间隙距离。将同相位超模的耦合效率代入速率方程进行理论模拟, 证明输出功率和耦合效率之间的必然联系, 结果显示同相位超模输出功率随着耦合效率的增大而增大, 得到单模输出的最大光-光转换效率为 63.7%。

关键词 激光器; 多芯光纤激光器; 耦合效率; 同相位超模; 单模光纤

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0802002

Pure Single Mode Output of Six-Core Fiber Laser Based on Single-Mode Fiber Mode Selection

Zhang Xiaolei^{1,2,3} Peng Gangding³ Zhang Xingyu^{1,2} Wang Qingpu^{1,2} Chang Jun^{1,2}

¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China
² Shandong Provincial Key Laboratory for Laser Technologies and Applications, Jinan, Shandong 250100, China
³ School of Electronics and Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW, 2052, Australia

Abstract A multi-core fiber laser with single-mode output is reported, which is mode selected by the proposed mechanism based on single-mode fiber. Using single-mode fiber combined with a total reflection mirror as mode selection element, the in-phase supermode always has much higher coupling coefficient than that of the other higher-order supermodes. As a result, high brightness single in-phase supermode output is obtained while higher-order supermodes are suppressed. The coupling coefficient can be optimized by choosing proper single-mode fiber core radius and adjusting the gap distance between multi-core fiber and single-mode fiber. The relationship between coupling coefficient and single-mode output power is investigated. The simulation results got from rate equation show that the output power increases with coupling coefficient, and the maximum optical-optical conversion efficiency is calculated to be 63.7%.

Key words lasers; multi-core fiber laser; coupling coefficient; in-phase supermode; single-mode fiber

OCIS codes 140.3510; 060.2430; 060.3510; 140.3615

1 引 言

为了实现光纤激光器的高功率高亮度输出, 多芯光纤(MCF)近年来引起人们的广泛关注。与传

统的单模光纤(SMF)相比, 多芯光纤提供了大的模场面积^[1], 从而可以有效抑制非线性效应, 例如受激布里渊散射效应。多芯光纤中存在的多个模式统称

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: International Science Linkages projects (CH060036, CG130013)和山东大学自主创新基金(2009JC003)资助课题。

作者简介: 张晓磊(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤激光和固体激光等方面的研究。

E-mail: bluestone469@hotmail.com

导师简介: 张行愚(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光物理技术、光电子学等方面的研究。

E-mail: xyz@sdu.edu.cn

为超模,其中仅有同相位超模的远场具有准高斯分布,因而具有较小的发散角和较好的光束质量^[2,3]。目前已有报道的一般是采用塔尔伯特腔^[4,5]或自傅里叶变换腔^[6,7]进行模式选择。但是这些方式都无法将同相位超模以外的其他模式完全抑制,即无法实现多芯光纤激光器的单模输出。为了提高同相位超模的选择效率,在塔尔伯特腔中插入一段^[8]或几段^[9]非掺杂光纤的方法已有报道。另外一种方法就是将输入的抽运光近似为高斯光束,通过改变高斯光束的束腰尺寸,来更大程度地提高同相位超模的输出功率,进而提高其在总功率中的所占比例^[9],获得更好的光束质量^[10]。

本文提出并分析了采用单模光纤对多芯光纤中的同相位超模进行选择的机制。在多模光纤激光器的研究中,为了获得较好的光束质量,单模光纤的引入可以作为一种滤波器,保证其实现单模输出^[11]。在多芯光纤激光器中采用单模光纤作为选模器件,并对两者模式之间的耦合效率进行分析,可以证明此机制对同相位超模具有高度的选择性。以双端抽运的掺镱环型6芯光纤激光器为例,利用速率方程

进行了理论模拟。

2 理论模型

双端抽运的6芯光纤激光器的结构示意图如图1所示。两束抽运光分别由两端耦合进入。该光纤一侧放置一输出镜 M_1 ,另一侧与单模光纤对准,忽略两种光纤之间的侧向偏移,单模光纤另一端与全反镜 M_2 相连。单模光纤与全反镜 M_2 共同作用,对6芯光纤进行选模。在多个超模同时存在的情况下,假设它们共享每个纤芯中的反转粒子数密度,关于6芯光纤中传输的信号光和抽运光的速率方程可以表示为^[4]

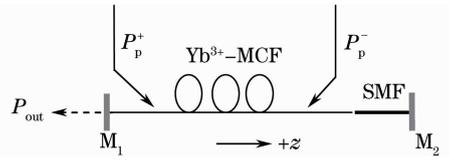


图1 基于单模光纤选模机制的双端抽运6芯光纤激光器

Fig. 1 Bi-directional pumped six-core fiber laser based on single-mode fiber mode selection

$$\left\{ \begin{aligned} & \left\{ \frac{\Gamma_p \sigma_{ap} [P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{A_{co} h \nu_p} + \sum_i \frac{\Gamma_{ij} \sigma_{as} [P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)]}{A_{co} h \nu_s} \right\} N_{1j}(z) - \\ & \left\{ \frac{\Gamma_p \sigma_{ep} [P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{A_{co} h \nu_p} + \sum_i \frac{\Gamma_{ij} \sigma_{es} [P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)]}{A_{co} h \nu_s} + \frac{1}{\tau} \right\} N_{2j}(z) = 0, \\ & \pm \frac{dP_{si}^{\pm}(z)}{dz} = \sum_j \Gamma_{ij} [\sigma_{es} N_{2j}(z) - \sigma_{as} N_{1j}(z)] P_{si}^{\pm}(z) - \alpha_s P_{si}^{\pm}(z), \\ & \frac{dP_p^{\pm}(z)}{dz} = \sum_j \Gamma_{pj} [\sigma_{ep} N_{2j}(z) - \sigma_{ap} N_{1j}(z)] P_p^{\pm}(z) - \alpha_p P_p^{\pm}(z), \\ & N_{1j}(z) + N_{2j}(z) = N_0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中 $P_{si}^{\pm}(z)$ 表示第 i 个超模在 $+z$ 和 $-z$ 方向的信号光功率, $P_p^{\pm}(z)$ 表示在 $+z$ 和 $-z$ 方向的抽运光功率, N_{1j} 和 N_{2j} 分别是镱离子下能级和上能级的粒子数密度, N_0 为镱离子掺杂浓度; ν 代表频率, α 代表损耗,其下标 p 和 s 分别代表抽运光和信号光;同理, σ_{ap} 、 σ_{ep} 和 σ_{as} 、 σ_{es} 分别代表抽运光和信号光的吸收和发射截面; Γ_p 是抽运光吸收因子,由纤芯总面积 A_{co} 和内包层面积决定; Γ_{ij} 表示第 j 个纤芯中第 i 个超模的填充因子,可由耦合模理论分析得到; h 是普朗克常数; τ 为上能级粒子寿命。

该速率方程的边值条件可以写成

$$P_{si}^+(0) = R P_{si}^-(0), \quad (2)$$

$$P_{si}^-(L) = \sum_{j=1}^N \eta_{sj} \eta_{sj} P_{sj}^+(L). \quad (3)$$

(2)式由输出镜 M_1 对信号光的反射率 R 决定;(3)式中 η_{sj} 是第 i 个超模的功率耦合效率,由单模光纤和其端面与6芯光纤端面之间的距离而定。如图2所示,在 (x, y) 平面上的耦合效率可以表示为两个模式的叠加积分,其一是6芯光纤某超模在 (x_i, y_i) 面上的衍射场分布 ψ_{Fi} ,另一个是单模光纤中的基模分布 φ_s 。其中 a_s 是单模光纤纤芯半径, z_g 是单模光纤与6芯光纤端面之间的间隙长度。超模的耦合效率可表示为

$$\eta_{si}(a_s, z_g) = \frac{\left[\iint \phi_{Fi}^*(x_f, y_f, z_g) \phi_s(x_f, y_f, a_s) dx_f dy_f \right]^2}{\iint |\phi_{Fi}^*(x_f, y_f, z_g)|^2 dx_f dy_f \cdot \iint |\phi_s(x_f, y_f, a_s)|^2 dx_f dy_f} \quad (4)$$

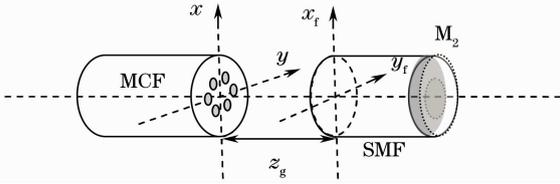


图2 单模光纤选模双机制

Fig. 2 Mode selection scheme by single-mode fiber

3 数值分析

6芯光纤的横截面如图3(a)所示,6个纤芯呈

环形分布,纤芯半径 a 为 $5\ \mu\text{m}$,纤芯中心距离 d 为 $17\ \mu\text{m}$,内包层半径为 $150\ \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.065 。此多芯光纤中传输的6个超模可以通过耦合模理论获得^[10,12,13]。图3(b)为6芯光纤中的同相位超模的强度分布图。所谓同相位,是指相邻纤芯的复振幅相位差为零。在空气中传播一段距离后,同相位超模的远场分布如图3(c)所示。与其他高阶超模相比,只有同相位超模的远场具有准高斯分布^[2,3],因此为了获得较好的光束质量,需要将同相位超模选择出来,同时抑制高阶超模输出。

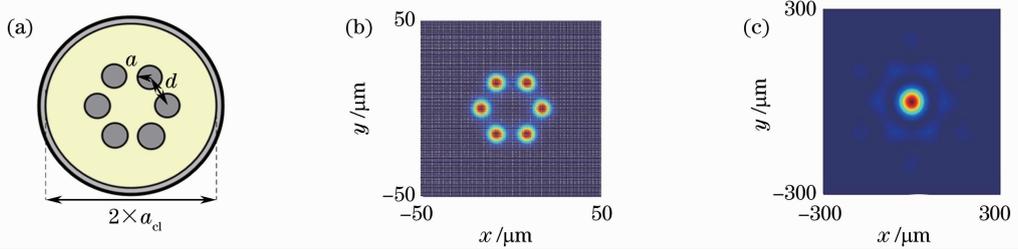


图3 (a) 6芯光纤横截面示意图;(b) 6芯光纤中同相位超模的近场强度分布;(c) 同相位超模的远场强度分布

Fig. 3 (a) Cross section of six-core fiber; (b) Near-field intensity profiles of in-phase supermode; (c) far-field intensity profiles of in-phase supermode

3.1 耦合效率分析及其优化

采用图2所示的单模光纤选模机制,不同超模的耦合效率可由(4)式获得,其中单模光纤参数 $V=2.4$,纤芯半径为变量。同相位超模的耦合效率与腔长和单模光纤纤芯半径之间的关系如图4所示。腔长一定的情况下,同相位超模的耦合效率随着单模光纤纤芯半径的增大呈抛物线趋势变化,其顶点处对应最大的耦合效率。从图4可以看出,在

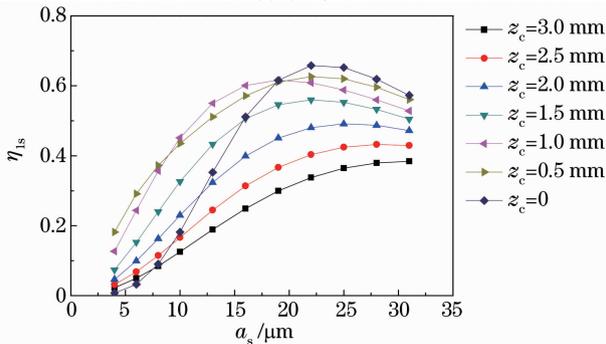


图4 采用单模光纤选模机制时的同相位超模的功率耦合效率

Fig. 4 Power coupling efficiency of in-phase supermode selected by single-mode fiber

间隙为0的临界状态下,如果单模光纤的纤芯半径为 $22\ \mu\text{m}$,则可以得到同相位超模的最大耦合效率为 0.66 。与此同时,其他高阶超模的耦合效率小于 10^{-7} ,远远小于同相位超模的耦合效率,因此可以忽略不计。也就是说,采用单模光纤可以完全抑制高阶超模的输出,实现同相位超模单模输出,而与单模光纤的纤芯尺寸和位置无关。

值得注意的是,如果单模光纤相对多芯光纤有一定的侧向位移,并且此位移增大至某一范围的时候,将引起高阶超模耦合效率的显著提高,而同相位超模的耦合效率显著降低,多个超模同时存在,此种情况不符合单模输出条件。而单模光纤的倾斜则不会引起其他高阶超模溢出,只会引起同相位模式耦合效率的降低,并且降低程度和倾斜角度密切相关。事实上两者位置的校准可以在实时监测下通过精密位移平台控制实现,因而此处只分析了单模光纤和多芯光纤理想对准的情况。

通过对6芯光纤中各个超模的耦合效率分析可知,在单模光纤和6芯光纤理想对准的情况下,(1)式所表示的关于多个超模竞争的速率方程可以简化

为只有同相位超模存在的情况,即 $i=1$ 。采用10 m长的掺镱6芯光纤,抽运光波长为976 nm,两端最大抽运功率分别为100 W。光纤其他参数取值同文献[14]。输出镜 M_1 对波长为 $1.08 \mu\text{m}$ 的信号光具有4%的反射率。通过求解微分方程即可以得到总输出功率,等于同相位超模的输出功率, $P_{\text{out}} = 0.96 P_{\text{sl}}^-(0)$ 。

3.2 耦合效率对输出功率的影响

为了分析输出功率和耦合效率之间的关系,假设耦合效率从0.05变化到1,其他参数保持不变。通过求解速率方程,得到图5所示输出功率与耦合效率的关系。可以看出,输出功率总是随着耦合效率的增大而增大。超模耦合效率的大小决定其输出功率的大小,反过来证明采用单模光纤选模使得高阶超模的耦合效率小至可以忽略,即损耗过大,无法得到有效的输出。因此证明了采用单模光纤作为选模器件可以有效抑制高阶超模,得到高亮度的同相位超模单模输出。

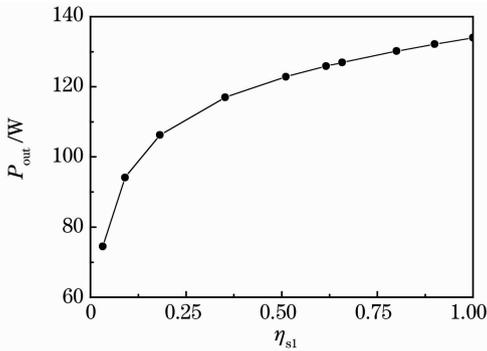


图5 采用单模光纤选模机制时的输出功率和同相位超模耦合效率的关系

Fig. 5 Relationship between output power and coupling efficiency for in-phase supermode selected by single-mode fiber

3.3 光-光转换效率

通过理论分析,获得的同相位超模的最大耦合效率为0.66,对应优化的单模光纤纤芯半径为 $22 \mu\text{m}$,两种光纤之间的间隙为0。两端抽运光功率分别为100 W时,6芯光纤中正反向的抽运光和信号光随光纤长度的分布分别如图6所示。

改变抽运光功率,通过计算可以得到在同相位超模耦合效率为0.66的情况下,6芯激光器最大光-光转换效率为63.7%。

尽管现在的光纤制造工艺可以使单模光纤的纤芯半径达到几十微米^[15],但考虑到此种大模式面积的单模光纤并不常见,采用普通单模光纤进行分析,

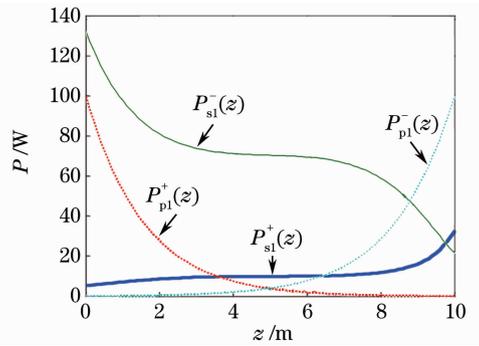


图6 6芯光纤中抽运光和信号光随光纤长度的分布, $\eta_{\text{sl}}=0.66$

Fig. 6 Distributions of pump and signal power along the fiber length, $\eta_{\text{sl}}=0.66$

其纤芯半径为 $4 \mu\text{m}$ 。通过调整单模光纤和6芯光纤之间的间隙距离,对同相位超模的耦合效率进行优化,得到最大耦合效率为0.18,此时两者之间间隙距离需增大至0.5 mm。通过速率方程计算得到最大光-光转换效率为35.8%。

如图7所示,提高同相位超模的耦合效率,可以使6芯光纤激光器的光-光转换效率得到明显的提高。由于耦合效率不仅和所采用的单模光纤有关,而且和两种光纤之间的间隙距离有必然的关系,因此对于任何类型的单模光纤,通过调节两者间隙距离可以对模式耦合效率进行优化,从而有效提高输出功率和光-光转换效率。

由于在速率方程中没有考虑自发辐射,此6芯光纤激光器的理论阈值较低,约为100~200 mW,因此在图7中没有得到直观的体现。

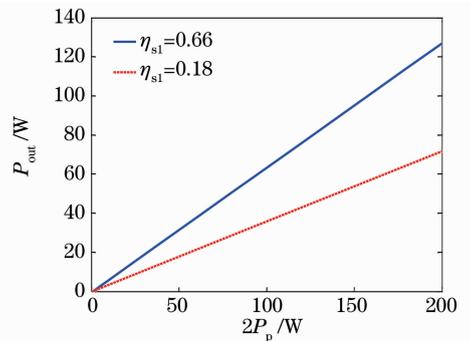


图7 采用优化的单模光纤选模的6芯光纤激光器光-光转换效率

Fig. 7 Optical-optical conversion efficiency of six-core fiber laser based on single-mode fiber mode selection

4 结 论

研究了单模光纤作为多芯光纤激光器选模器件的可行性和有效性,并对同相位超模单模输出的掺

镜6芯光纤激光器进行了理论模拟。采用纤芯半径为 $4\ \mu\text{m}$ 的普通单模光纤,优化后得到的同相位超模最大耦合效率为0.18,单模光纤与6芯光纤之间的间隙距离为0.5 mm,此时信号光输出的光-光转换效率为35.8%。基于速率方程理论,输出功率随耦合效率的增大而增大。因此对耦合效率进行优化,得到最大值为0.66,要求单模光纤纤芯半径为 $22\ \mu\text{m}$,两种光纤之间的间隙距离为0,对应光-光转换效率为63.7%,相对普通单模光纤选模的情况有明显提高。综上所述,采用单模光纤进行同相位超模的选择相对其他常见选模机制更高效,在实际操作中也易于实现,从而使多芯光纤激光器获得高功率高亮度的单模输出成为可能。

参 考 文 献

- 1 L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor *et al.*. Multicore photonic crystal fiber lasers for high power/energy applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 328~335
- 2 L. Li, A. Schülzgen, S. Chen *et al.*. Phase locking and in-phase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2577~2579
- 3 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202
- 4 Y. Huo, P. K. Cheo. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2005, **22**(11): 2345~2349
- 5 M. Wragé, P. Glas, D. Fischer *et al.*. Phase locking in a multicore fiber laser by means of a Talbot resonator[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1436~1438
- 6 E. J. Bochovel, C. J. Corcoran. In-phase supermode selection in a multicore fiber laser array by means of a self-Fourier external cavity[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5009~5018
- 7 C. J. Corcoran, F. Durville, K. A. Pasch *et al.*. Spatial filtering of large mode area fibre lasers using a self-Fourier cavity for high power applications[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(2): 128~133
- 8 L. Li, A. Schülzgen, H. Li *et al.*. Phase-locked multicore all-fiber lasers: modeling and experimental investigation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2007, **24**(8): 1721~1728
- 9 Wang Chuncan, Zhang Fan, Tong Zhi *et al.*. Theory study on the improved high-power 19-core fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 61~66
王春灿, 张帆, 童治等. 改进的高功率19芯光纤激光器的理论分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 61~66
- 10 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6230~6239
- 11 X. Zhu, A. Schülzgen, H. Li *et al.*. Single-transverse-mode output from a fiber laser based on multimode interference[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 908~910
- 12 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- 13 Xiaolei Zhang, Gangding Peng, Xingyu Zhang *et al.*. Mode competition in concentric-type multicore fiber lasers combined with large mode area single mode fiber [C]. *SPIE*, 2010, **7843**: 78431C
- 14 C. Wang, F. Zhang, S. Jian. Microstructured optical fiber for in-phase mode selection in multicore fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5505~5515
- 15 L. Fu, H. A. McKay, L. Dong. Extremely large mode area optical fibers formed by thermal stress[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11782~11793