

多芯光纤激光器增益场选模效应研究

周 朴 许晓军 陈子伦 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对多芯光纤激光器的增益场选模效应进行了初步研究。利用矢量耦合模理论计算多芯光纤激光器支持的各种超模的模式特性, 并对其增益系数进行计算, 比较不同功率等级下各超模增益特性的异同。计算结果表明, 在较低功率下, 多芯光纤激光器各类超模增益系数大小基本一致, 输出光束是由各超模组成的混合模式; 而当激光功率较高时, 同相模的增益系数大小明显大于其它模式, 在模式竞争中占据优势, 激光器输出光束远场具备同相模的特征。最后对多芯光纤激光器增益场选模效应的适用范围进行了简单讨论。

关键词 光纤激光器; 多芯光纤激光器; 相干合成; 矢量耦合模理论; 增益场选模

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0114

Study on Mode Filtering by Gain Structure in Multicore Fiber Lasers

Zhou Pu Xu Xiaojun Chen Zilun Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Mode filtering by gain structure in multicore fiber laser is studied. The supermode distribution of a 7-core fiber laser is calculated by the vector coupled-mode theory, and gain coefficients for different supermodes in different power-levels are calculated. It is shown that in a low power level, gain coefficients for different supermodes almost equal to each other, the far-field laser profile emitted from the multicore fiber laser will give mix-mode character. When the laser output power is in a higher level, the gain coefficient for the in-phase mode is the largest among all the supermodes, which will dominate the mode competition. The far-field laser profile will show in-phase mode character. The validity for the mode filtering by gain structure is discussed.

Key words fiber laser; multicore fiber laser; coherent combination; vector coupled-mode theory; gain structure filtering

1 引 言

作为光纤激光相干合成领域的一个重要研究分支, 多芯光纤激光器近年来成为研究人员关注的焦点。它在较大的内包层中有多个掺杂纤芯, 通过激光瞬逝波的耦合使得各纤芯受激发射的激光相互作用, 得到多束相干的激光输出。美国 PC Photonics 公司和 Arizona 大学等国外研究机构已经开展了大量的理论和实验研究, 目前已有 7 芯、19 芯、37 芯的多芯光纤激光器的报道^[1~5], 国内关于多芯光纤激光器的研究还处于探索阶段^[6,7]。由于多芯光纤内部的波导结构特性, 多芯光纤激光器中可以同时存在多个模式, 我们称之为超模, N 芯的多芯光纤激光器共支持 N 类超模, 其中只有同相模 (in-phase

mode) 具有衍射极限的特性^[3], 光束质量最好。文献^[4]报道的实验结果表明, 多芯光纤激光器输出光束一般是由各超模组成的混合模式; 当抽运能量超过一定的阈值时, 多芯光纤激光器输出光束的远场呈现同相模的特性。本文以 7 芯光纤激光器为例, 利用矢量耦合模理论计算多芯光纤激光器支持的各种超模的模式特性, 并对其增益谱进行计算, 比较不同抽运能量下各超模增益特性的异同, 据此分析多芯光纤激光器的增益场选模效应。

2 理论模型

目前计算多芯光纤激光器的超模采用较多的是耦合模理论 (CMT)^[5,7]。理论研究表明, 耦合模理

论一般只适用于弱耦合的情形^[8~10],用于分析多芯光纤激光器这样纤芯之间发生较强耦合作用的波导结构,需要对其可行性和精确性进行深入的计算^[8,11]。文献[8]提出了矢量耦合模理论(VCMT),该理论本质上与麦克斯韦方程组一致,可以获得更高精度的求解结果。

利用 VCMT 求解多芯光纤激光器的超模,需要求得两个关键的参数矩阵,即重叠因子矩阵 \mathbf{C} 和耦合系数矩阵 \mathbf{K} 。 \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 的阵元 C_{lk} 和 κ_{lk} 分别表示纤芯 l 和纤芯 k 之间的重叠因子和耦合系数,它们可以用下式进行计算^[8,9]

$$C_{lk} = \frac{1}{2} \iint dx dy z \cdot \mathbf{e}_{l\perp}^* \times H_{k\perp}, \quad (1)$$

$$\kappa_{lk} = \frac{\omega^2 \mu}{4\beta_k \beta_l} \iint dx dy \Delta \epsilon_k(x, y) z \cdot \mathbf{e}_{l\perp}^* \times H_{k\perp}, \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_{l\perp} = \frac{1}{\delta_l(x, y)} [i\omega \epsilon_l \nabla_{\perp} E_{lz} - i\beta_l z \times \nabla_{\perp} H_{lz}], \quad (3)$$

$$\delta_l(x, y) = \omega^2 \mu \epsilon_l(x, y) - \beta_l^2, \quad (4)$$

式中 \mathbf{z} 是沿光束传播方向(纵向)的单位矢量, $H_{k\perp}$ 是纤芯 k 中磁场的横向分量, E_{lz} 和 H_{lz} 分别表示纤芯 l 中电场和磁场的纵向分量, ω 为光波的圆频率, μ 为磁导率, $\Delta \epsilon_k(x, y) = \epsilon(x, y) - \epsilon_k(x, y)$, 其中 $\epsilon(x, y)$ 和 $\epsilon_k(x, y)$ 分别表示多芯光纤和纤芯 k 内部介电常数的横向分布。 β_k, β_l 为纤芯 k 和纤芯 l 支持的本征模的传输常数,可以利用现有光波导理论进行精确计算。

求出重叠因子矩阵 \mathbf{C} 和耦合系数矩阵 \mathbf{K} , 各类超模的特征向量 \mathbf{A} 和传输常数 γ 分别为满足以下系统方程的特征解

$$\mathbf{KA} = \gamma \mathbf{CA}. \quad (5)$$

每一类超模都是各纤芯支持的本征模场的线性叠加,(5)式中特征向量 \mathbf{A} 的分量表示该类超模中各纤芯本征模场复振幅的相对权重。若单个纤芯支持的本征模分布为 $\xi_k(x, y)$, 则第 n 个超模模式分布可以表示为

$$\psi_n = \sum_k A_{n,k} \cdot \xi_k. \quad (6)$$

各类超模的增益系数为^[10,11]

$$g^n = \iint g |\psi_n|^2 dx dy / \left(\iint |\psi_n|^2 dx dy \right), \quad (7)$$

式中 $g = g_0 / (1 + |\psi_n|^2)$, g_0 为小信号增益系数, ψ_n 是归一化的模场分布表达式, 满足 $I = I_s |\psi_n|^2$, I 是超模光束的功率密度分布, I_s 是饱和功率密度。 g_0 和 I_s 的取值均可利用实验测得。

3 数值计算

本文以如图 1 所示的 7 芯光纤激光器为例, 计算多芯光纤激光器支持的各类超模的模式分布机增益特性。

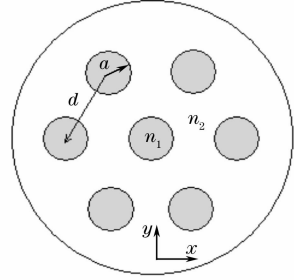


图 1 多芯光纤激光器结构图

Fig.1 Structure of multicore fiber laser

假设各纤芯参数完全一致, 纤芯半径为 $a = 2.5 \mu\text{m}$, 纤芯中心之间的距离均为 $d = 15 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.474$, 包层折射率 $n_2 = 1.456$, 激光波长为 $1.5 \mu\text{m}$, 归一化频率 $V = 2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / \lambda = 2.4$, 保证单个纤芯内部单模运行。每一个纤芯单独运行时, 利用光波导理论计算可得此时等效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.4655$, 传输常数 $\beta = 6.1388 \times 10^6$ 。将上述参数代入(1)式~(4)式, 得到重叠因子矩阵 \mathbf{C} 和耦合系数矩阵 \mathbf{K} 的阵元, 求解(5)式系统方程的特征向量 \mathbf{A} 和特征值 γ , 即可得到图 1 所示的多芯光纤激光器各类超模的模式分布、传输常数等特性。图 1 所示的 7 芯光纤激光器共支持 7 类超模, 按传输常数大小排序, 这 7 类超模的传输常数分别为 $6.1357 \times 10^6, 6.1362 \times 10^6, 6.1372 \times 10^6, 6.1372 \times 10^6, 6.1404 \times 10^6, 6.1404 \times 10^6$ 和 6.1445×10^6 ; 对应的等效折射率分别为 $1.4648, 1.4649, 1.4652, 1.4652, 1.4659, 1.4659$ 和 1.4669 。限于篇幅, 图 2 给出了超模 1、2、6、7 的光强分布(第一行和第二行分别为该模式的近场和远场光强分布)。其中超模 7 对应各纤芯输出光束的相位完全一致, 是期望得到的同相模, 此时远场光强分布有一个中央主瓣, 大部分能量都集中在这个主瓣中。而超模 1 对应的外环各相邻纤芯输出光束的相位差为 π (即异相模)。

下面根据(6)式、(7)式计算各类超模的增益特性, 取小信号增益系数 $g_0 = 0.2 \text{ cm}^{-1}$, 饱和功率密度 $I_s = 64.4 \text{ kW/cm}^2$ ^[12, 13]。当输出激光功率为 $1 \text{ mW}, 10 \text{ mW}, 100 \text{ mW}$ 和 200 mW 时, 各类超模的增益大小如图 3(a)~图 3(d)所示。

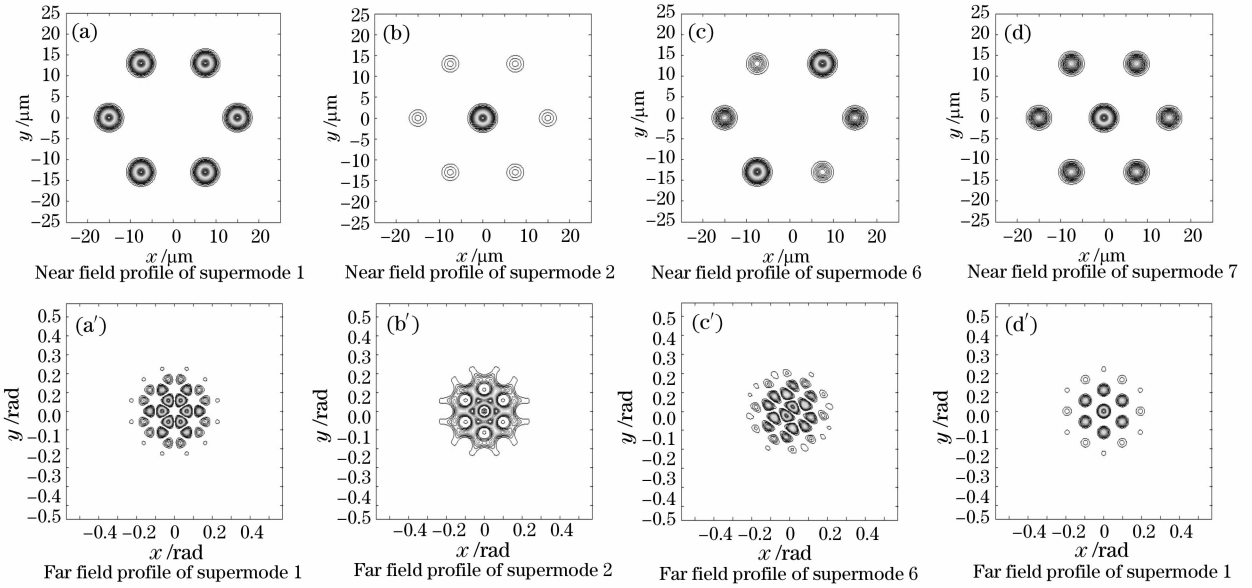


图 2 多芯光纤输出的超模强度分布

Fig. 2 Intensity distribution of supermodes supported by a multicore fiber

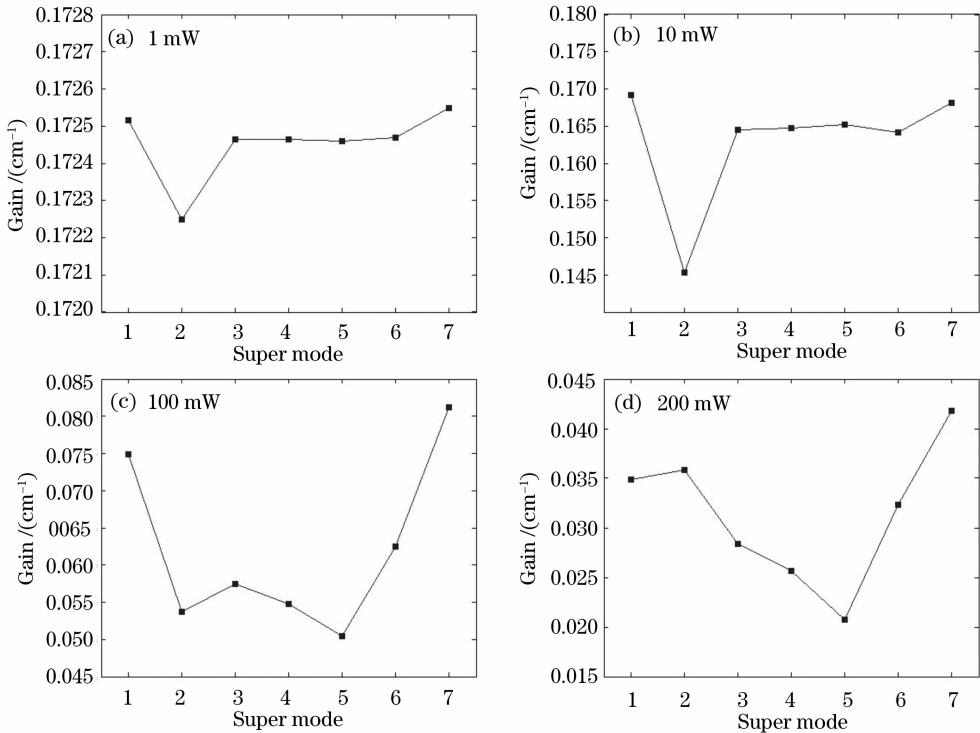


图 3 不同功率等级下各类超模的增益

Fig. 3 Gain for different supermodes at different power-level

由图 3 可得,在较低功率等级(10 mW 及以下)时,多芯光纤激光器支持各类超模增益系数大小基本一致;而当激光功率上升到 100 mW、200 mW 时,同相模的增益系数明显大于其它各类超模的增益系数,在模式竞争中占据优势,此时多芯光纤激光器输出模式将以同相模为主。可见在较高功率运行

时增益场起到了选模作用,初步解释了文献[4]报道的实验现象。与文献[1, 6, 7]等利用被动光纤或塔尔博特腔进行模式选择的方法相比,增益场选模没有附加其他光学元件,是一种全光纤选模机制。当然,文中采用的增益谱计算模型还局限于小信号增益的情形,为了保证单模运行,单个纤芯的半径一般要

满足 $a < 7\lambda^{[10]}$, 饱和功率密度 $I_s = 64.4 \text{ kW/cm}^2$ 对应的多芯光纤激光器单纤输出功率约为 200 mW。对于更高功率运行的光纤激光器, 峰值功率密度远超过饱和功率密度 I_s , 此时同相模是否仍能在模式竞争中占据优势还需要引入更精确的计算模型进行研究。

4 结 论

本文利用矢量耦合模理论得到了 7 芯光纤激光器各类超模的模场分布特性, 并计算了各类超模在不同功率等级下的增益特性。计算结果表明, 在较低功率等级时, 多芯光纤激光器支持各类超模增益系数大小基本一致, 此时输出光束远场具有混合模式的特性; 随着激光功率的上升, 同相模的增益系数将明显大于其它各类超模的增益系数, 在模式竞争中占据优势, 此时输出光束远场具有同相模的特征。另外, 文中利用矢量耦合模理论还得到了不同超模的传输常数, 其中同相模的传输常数要大于其它模式, 而光纤的弯曲损耗是和传输常数有关的, 利用弯曲损耗的差异可以构建全光纤选模机制, 文献[9]已经对 3 芯光纤的弯曲选模进行了探讨。本文对于传输常数的计算结果也可以用于探讨 7 芯以及更多纤芯光纤激光器的弯曲选模机制研究。

参 考 文 献

1 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

2 L. Li, A. Schülzgen, S. Chen *et al.*. Phase locking and inphase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2577~2579

3 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25): 6230~6239

4 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

5 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

6 Wang Chuncan, Zhang Fan, Tong Zhi *et al.*. Theory study on the improved high-power 19-core fiber laser [J]. *Chin. 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

7 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1812~1816
周朴, 侯静, 陈子伦等. 多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1812~1816

8 A. N. Kireev, Th. Graf. Symmetric vector coupled-mode theory of dielectric waveguides [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**: 25~35

9 A. N. Kireev, Th. Graf, H. P. Weber. Phase-locking in fiber laser arrays [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(1): 50~56

10 N. N. Elkin, A. P. Napartovich, V. N. Troshchieva *et al.*. Diffraction modeling of the multicore fiber amplifier [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(10): 3072~3077

11 N. N. Elkin, A. P. Napartovich, V. N. Troshchieva *et al.*. Mode competition in multi-core fiber amplifier [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**: 390~396

12 E. J. Bochove. Nonlinear refraction index of a rare earth-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(20): 2414~2416

13 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