

文章编号: 0258-7025(2008)01-0061-06

改进的高功率 19 芯光纤激光器的理论分析

王春灿^{1,2} 张帆^{1,2} 童治^{1,2} 宁提纲^{1,2} 简水生^{1,2}

(¹ 北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)
² 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 为了增加 19 芯光纤激光器总输出光功率中共相位模式所占比例, 提出两种改进方法, 一是在掺镱光纤端面与反射镜面之间塔尔伯特(Talbot)腔内引入三段具有一定间隔的非掺杂光纤, 其结构尺寸和纤芯数值孔径均与掺镱光纤相同; 二是将单模光纤激光器作为种子光源, 利用透镜组对高斯光束进行束腰变换实现模式匹配, 从而最大限度地激励共相位模式。基于速率方程组对改进后的方案进行了数值分析, 计算了光纤端面间隔距离、信号输出端镜面功率反射系数和抽运功率对共相位模式功率所占总输出功率比例的影响。研究表明, 在改进方案一中对于固定的镜面功率反射系数, 存在最佳间隔距离以使共相位模式功率比例最大, 共相位模式所占比例可以从改进前的 79.06% 提高到 88.25%; 通过改进方案二共相位模式所占比例可以提高到 95.74%, 从而确保了更好的光束质量。

关键词 激光器; 光纤激光器; 相位锁定; 多芯光纤; 镱; 塔尔伯特腔

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Theory Study on the Improved High-Power 19-Core Fiber Laser

Wang Chuncan^{1,2} Zhang Fan^{1,2} Tong Zhi^{1,2} Ning Tigang^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

(¹ Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network,
Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract To improve the ratio of the power of in-phase mode to the total power of output signal (Q) for the 19-core fiber laser, two improved methods are presented. In the first improved scheme, three pieces of undoped fiber, with the same structure and numerical aperture as the ytterbium-doped 19-core fiber, are introduced into the Talbot cavity of the fiber laser. In the second improved scheme, the output beam from the single mode fiber laser is transformed to match the in-phase mode using the double convex lenses. The improved schemes are numerical simulated and analyzed based on a set of rate equations. The ratio Q and the output power of each mode are investigated for different parameters such as the distance between fiber ends (a), the power reflection factor of mirror on the signal output end (R_{M_2}), and the pump power. The quantitative analysis shows that, for the first scheme, the optimum distance a exists for the fixed R_{M_2} , and the Q can be increased from 79.06% to 88.25%; For the second scheme, the ratio Q can be increased to 95.74%, which ensures better beam quality.

Key words lasers; fiber lasers; phase-locked; multicore fiber; ytterbium; Talbot cavity

1 引言

多芯光纤激光器相比较传统的单芯光纤增加了

纤芯有效面积, 从而有效地提高了诸如受激拉曼散射和受激布里渊散射等非线性效应的阈值功率, 这

收稿日期: 2007-05-21; 收到修改稿日期: 2007-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(60477017)、北京市自然科学基金(4052023)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0076)、北京交通大学校科技基金(2006XM003)、北京交通大学科学技术基金(2004RC073)和北京交通大学专项研究员基金(48101)资助项目。

作者简介: 王春灿(1975—), 男, 江苏人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器与光器件方面的研究。

E-mail: xzwangchuncan@126.com

导师简介: 简水生(1929—), 男, 江西人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信及电磁兼容方面的研究。

E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

对进一步提升大功率光纤激光器的输出功率非常有利。在多芯光纤中同时存在多个模式,而我们所关心的是其中的共相位模式,因为这种模式的光束质量最好。另外,由于其他模式的传输常数都要小于共相位模式的传输常数,所以以下统称为低阶模式。目前可以通过塔尔博特(Talbot)腔^[1~3]、高反射准直透镜^[4]进行共相位模式选模。文献[5]结合塔尔博特腔选模技术和准直透镜反射镜选模技术,针对多芯激光器中模式的竞争问题进行了理论分析和数值模拟。结果显示经过优化有关激光器的参数,虽然共相位模式的输出功率占输出总功率的主要部分,但仍存在相当一部分的低阶模式功率。所以,这就带来了一个问题,即如何进一步有效地提高共相位模式输出功率占总功率的比例,从而确保更好的光束质量。

本文对 19 芯光纤激光器的模式竞争进行了理论分析,并在此基础上提出了一种有效提高总输出功率中共相位模式所占比例的方法,即在掺镱光纤右端与反射镜面之间塔尔博特腔内引入三段非掺杂光纤,其光纤结构尺寸和纤芯数值孔径与掺镱光纤相同。理论分析表明,适当调整光纤之间的距离可以有效地降低低阶模式功率占总输出功率中的比例。为了进一步提高共相位模式输出功率比例,本文提出利用单模输出光纤激光器作为种子光源,利用透镜对种子光进行高斯光束变换后耦合到高功率多芯光纤放大器中,研究表明利用此方案获得的输出信号中不仅共相位模式具有较高比例,并且具有较高的输出效率,从而确保具有更好的光束质量。

2 理论模型

图 1 给出了一些主要模式的电场强度分布($A_i(x, y, 0)$),它可以利用有限元数值方法进行求解,并通过菲涅耳公式求出 $A_i(x, y, S)$ 。其中光纤纤芯的数值孔径取 0.065,纤芯半径 $r_1 = 3.5 \mu\text{m}$,纤芯间距 $d = 11 \mu\text{m}$,内包层半径 $r_2 = 150 \mu\text{m}$ 。详细参数可参考表 1。

由光纤纤芯参数可以知道归一化频率为 1.32,其值小于 2.48,所以每个纤芯处于单模工作状态,根据耦合模理论可以得到方程组^[4]

$$(\mathbf{C} - i\gamma\mathbf{I})\mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

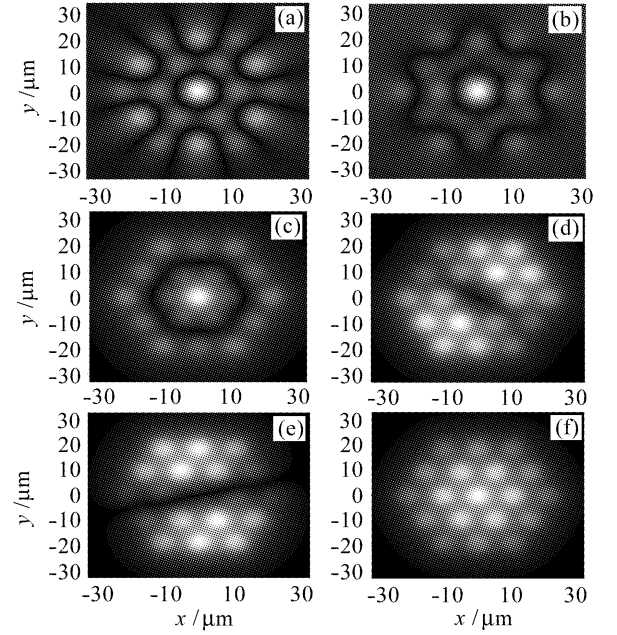


图 1 19 芯光纤中的主要模场分布。按其传输常数为 (a) 1, (b) 7, (c) 14, (d) 17, (e) 18 和 (f) 19 (共相位模式)
Fig. 1 Some supermodes of the 19-core fiber. The modes numbers are (a) 1, (b) 7, (c) 14, (d) 17, (e) 18, and (f) 19 (in-phase mode)

表 1 用于数值仿真的掺镱 19 芯光纤参数
Table 1 Yb doped 19-core fiber parameters used in simulations

λ_p / nm	976	L / m	10
λ_s / nm	1080	Γ_p	5.4×10^{-4}
σ_{ap} / m^2	2.0×10^{-24}	α_s / m^{-1}	5×10^{-3}
σ_{ep} / m^2	1.99×10^{-24}	α_p / m^{-1}	5×10^{-3}
σ_{as} / m^2	3.0×10^{-27}	N / m^{-3}	5×10^{25}
σ_{es} / m^2	4.0×10^{-25}	τ / s	1×10^{-3}

式中 \mathbf{C} 为 19×19 矩阵,其中元素表示每两个纤芯模场之间的耦合大小; \mathbf{I} 为单位矩阵; γ 为特征值; \mathbf{E} 为复振幅列向量,具体为 $[e_1 \ e_2 \ e_3 \ \dots \ e_{18} \ e_{19}]^T$,其中每一项对应纤芯中的复振幅,通过求解特征方程组可以得到 19 个特征值及对应的特征向量 \mathbf{E} ,即在 19 芯光纤中存在 19 个模式。采用有限元方法计算光纤模场得到相同的 19 个模式,研究表明其中图 1(f) 显示的模场具有最大的传输常数,并且每个纤芯中的复振幅具有相同的相位,所以称其为共相位模式。

光纤中的抽运功率和每个模式的信号功率由稳态速率方程组来描述^[5]

$$\frac{N_{2j}(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A_{co}} + \sum_{i=1}^n \frac{\Gamma_{ij}\sigma_{as}[P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)]}{h\nu_s A_{co}}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^n \frac{\Gamma_{ij}(\sigma_{as} + \sigma_{ap})[P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)]}{h\nu_s A_{co}}}, \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \sum_{j=1}^m \Gamma_p [(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_{2j}(z) - \sigma_{ap}N]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP_{si}^\pm(z)}{dz} = \sum_{j=1}^m \Gamma_{ij} [(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_{2j}(z) - \sigma_{as}N]P_{si}^\pm(z) - \alpha_s P_{si}^\pm(z), \quad (4)$$

式中 N_{2j} 和 N 分别为上能级 Yb 离子密度和掺杂 Yb 离子的密度, P_p^\pm 表示沿 $+z$ 和 $-z$ 方向上的抽运功率; P_{si}^\pm 表示沿 $+z$ 和 $-z$ 方向上的第 i 个模式的信号功率; $\Gamma_p = A_{co}/A_{cl}$ 为抽运功率填充因子, 其中 A_{co} 和 A_{cl} 分别为纤芯和内包层的面积; Γ_{ij} 定义为第 j 个纤芯中含有第 i 个模式信号功率的比例; σ_{ap} (σ_{ep}) 和 σ_{as} (σ_{es}) 分别表示抽运光和信号光的吸收(发射)截面积; h 为普朗克常量; ν_p 和 ν_s 分别为抽运光和信号光频率; α_p 和 α_s 分别为抽运光和信号光的衰减系数; m 和 n 分别为纤芯的总数和模式总数, 本文均取值为 19。

M. Wragge 等^[1] 实验证明在光纤信号端面和具有部分功率反射率的镜面之间引入一段空间距离构成塔尔博特腔, 空间距离称为塔尔博特腔长。其原理是基于塔尔博特效应, 即具有一定周期分布的复振幅在一定的衍射距离上会出现与初始复振幅相同的振幅分布, 称为自成像性质^[1,6]。由于不同模式的初始复振幅分布不同所以自成像的衍射距离不同, 利用这个性质可以通过调整塔尔博特腔长度使共相位模式出现自成像, 实现最大的耦合, 而其他模式由于没有获得自成像所以耦合较小。图 2 给出了两种改进方案的实验配置, 图 2(a) 显示了改进后的 19 芯光纤激光器整体构成。与原结构相比, 它的改进之处主要是在 19 芯掺镱光纤右端与高反射率镜面 1 之间塔尔博特腔内引入三段非掺杂的 19 芯光纤 F_1, F_2 和 F_3 , 其结构尺寸和纤芯数值孔径与掺镱

光纤相同, 长度均假设为 60 mm。光纤 F_1, F_2, F_3 和掺镱光纤的端面之间应精确对准, 并定义光纤端面之间的距离为 ZL_1, ZL_2 和 $ZL_3, ZR/2$ 为光纤 F_3 右端与镜面 1 之间的距离。另外, 在掺镱光纤左端面增加镜面 2, 以调整光纤激光器谐振腔左端的功率反射系数。

对于激光器的左端, 其边界条件可以表示为

$$P_{si}^+(0) = R_{M_2} P_{si}^-(0), \quad (5a)$$

式中 R_{M_2} 为镜面 2 的功率反射系数。

激光器右端边界条件需要考虑由距离 ZL_1, ZL_2, ZL_3 和 ZR 所引入的塔尔博特效应, 由于三段光纤长度足够小, 研究表明可以忽略其带来的信号损耗, 则边界条件可以表示为

$$P_{si}^-(L) = \sum_{j=1}^m T_{ij}(ZL_1)T_{ij}(ZL_2)T_{ij}(ZL_3)T_{ij}(ZR) \times T_{ij}(ZL_3)T_{ij}(ZL_2)T_{ij}(ZL_1)P_{sj}^+(L), \quad (5b)$$

式中 L 为掺镱光纤长度, T_{ij} 为第 j 模式至第 i 模式的功率耦合系数, 它是关于光束在空气中通过衍射距离的函数, 具体为振幅耦合系数的平方, 即 $T_{ij} = \eta_{ij}^2$ 。定义为^[6]

$$\eta_{ij}(S) = \left| \iint A_i^*(x, y, 0)A_j(x, y, S) \right|, \quad (6)$$

其中 S 为光束通过的衍射距离, $A_i(x, y, 0)$ 和 $A_i(x, y, S)$ 分别表示第 i 模式振幅分布在衍射前和经过衍射距离 S 后的归一化值。

图 2(b) 给出了方案二的实验配置, 主要由单模光纤激光器(图中透镜组右面)、透镜组和 19 芯光纤放大器组成。其基本思路是单模光纤激光器输出的信号光作为种子光源, 由于输出信号光为基模, 所以可以近似为高斯光束, 然后利用透镜组对种子高斯光束进行束腰变换以匹配共相位模式, 从而最大限度地激励共相位模式获得较高的共相位模式功率输出。

3 数值计算与分析

3.1 方案一

首先研究没有引入三段非掺杂光纤条件下各个模式功率随 ZR 的变化情况。

假设 19 芯激光器的抽运功率为 400 W, 前后抽

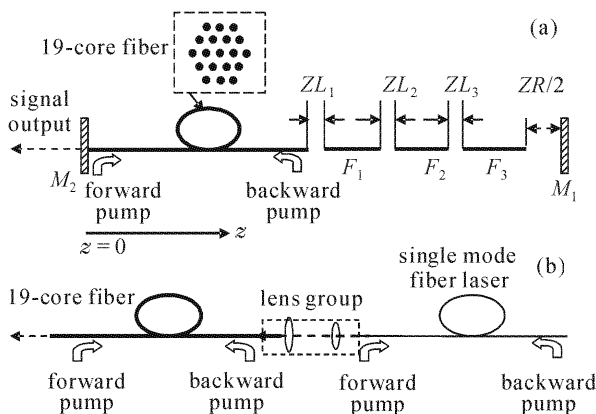


图 2 19 芯光纤激光器(a) 改进方案一;

(b) 改进方案二

Fig. 2 (a) first and (b) second improved scheme setup of 19-core fiber laser

运各 200 W。图 3(a) 给出不同模式输出功率随 ZR 的变化趋势。可以看出随着 ZR 的增加共相位模式逐渐增大, 低阶模式除了模式 14 以外都逐渐减小。当 $ZR = 1.9$ mm 时, P_{19} (共相位模式功率) 达到最大, 为 229.41 W, P_{14} 增大至 51.12 W, P_7 和 P_1 分别为 6.67 W 和 2.97 W, 其他模式输出功率可以忽略。为了分析共相位模式功率所占总输出光功率比例大小, 定义比例为 Q , 则有

$$Q = P_{19}/P_{\text{total}}, \quad (7)$$

式中 P_{total} 为总输出光功率, 显然共相位模式输出功率所占比例越大则 Q 越大。由图 3(a) 计算所得, 当 $ZR = 1.9$ mm 时, $Q = 79.06\%$, 低阶模式输出功率占总功率的 20.94%。可以从图 3(b) 和 (c) 分析模式竞争, 图 3(b) 反映出模式振幅的自耦合系数随 ZR 的增加递减, 重要的是对应不同的 ZR 共相位模式的自耦合系数最大, 而且 ZR 越大, 其与其他模式自

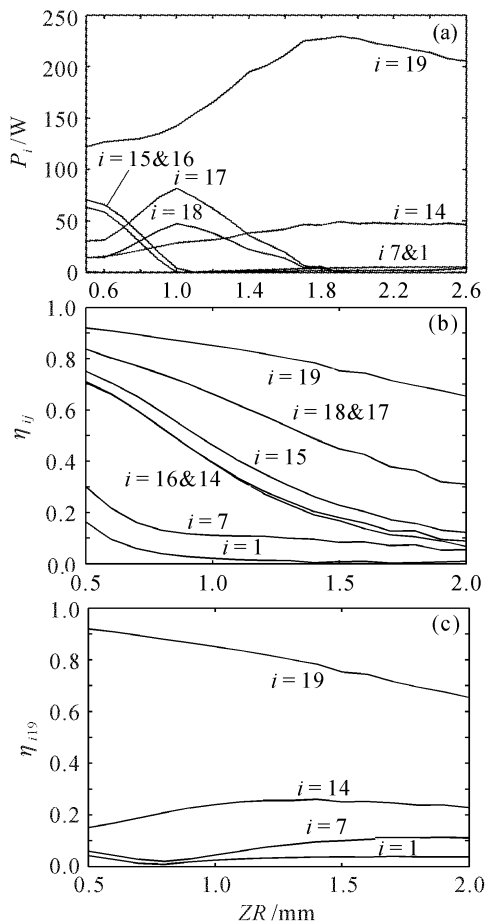


图 3 (a) 不同模式输出功率随 ZR 的变化; (b) 模式振幅的自耦合系数; (c) 由共相位模式到其他模式的振幅耦合系数

Fig. 3 (a) output power of each mode for the 19-core fiber laser; (b) amplitude coupling coefficients for self-coupling factors; (c) coupling factors from the in-phase mode to other modes

耦合系数之间的差就越大, 从而保证了在激光器右端共相位模式具有最大的功率反射系数, 并且随着 ZR 的增加, 共相位模式的输出功率逐渐占据主导地位。但是, 也可以从图 3(c) 看出, 共相位模式对其他模式的耦合系数中 $\eta_{14,19}$ 和 $\eta_{7,19}$ 占据主导地位, 其他耦合系数可以忽略, 并且 $\eta_{14,19}$ 和 $\eta_{7,19}$ 随着 ZR 的增加递增, 这就导致了共相位模式功率的一部分会转移到低阶模式中, 从而降低了共相位模式功率占总输出光功率中的比例。

为了提高共相位模式功率占总输出功率中的比例, 针对原来激光器的结构提出一种改进办法, 即在掺镱光纤右端与反射镜面之间塔尔博特腔内引入三段非掺杂光纤, 具体装置可参见图 2(a) 及相关说明。主要思路是引入三段非掺杂光纤后, 信号光在激光腔内每往返一次都要比原来多通过距离 ZL_1 , ZL_2 和 ZL_3 , 只要适当调整距离就可以加强光纤激光器右端共相位模式的功率反射系数, 同时减弱其他低阶模式的功率发射系数从而达到增强激光器中共相位模式选模的目的。

假设信号光每次衍射通过的距离相等, 即 $ZL_1 = ZL_2 = ZL_3 = ZR = a$, 则图 4(a) 和 (b) 分别给出了 Q 值和 P_{19} 随衍射距离 a 值的变化趋势, 其中圆形、方形和菱形分别对应不同的 R_{M_2} 。

由图 4(a) 可以看出 Q 随着距离 a 的增加达到最大值后即平缓减小, 从图 3(b) 和 (c) 可以分析其

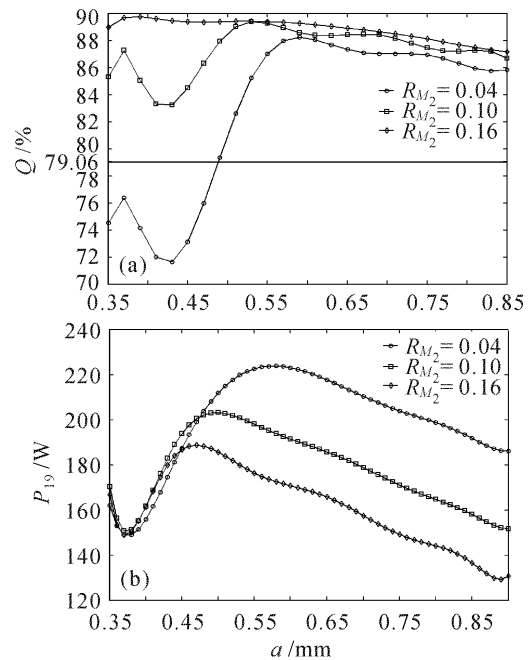


图 4 (a) Q 值和 (b) 共相位模式输出功率 P_{19} 随衍射距离 a 值的变化趋势

Fig. 4 (a) Q and (b) output power of in-phase mode P_{19} versus the diffraction distance a

物理原因,主要是因为当距离 a 较小时共相位模式的振幅自耦合系数与其他低阶模式的振幅自耦合系数相差不大,因此不能有效地抑制低阶模式,随着距离 a 增加共相位模式与其他低阶模式的振幅自耦合系数大小差距逐渐拉大从而增强了对低阶模式的抑制,而当 Q 达到最大后继续增大距离 a 时,由于共相位模式对低阶模式耦合作用的增强,导致共相位模式输出功率所占比例下降。因此在设计光纤激光器时,对于不同的 R_{M_2} ,应该找到距离 a 的最佳值以达到最大的共相位模式输出功率比例。

另外,从图 4(a)可以看出对应不同的功率反射系数 $R_{M_2} = 0.04, 0.10$ 和 0.16 ,当 a 为 0.59 mm, 0.53 mm 和 0.39 mm 时 Q 从改进前的 79.06% (图中用水平线标出) 分别提高到了 88.25% , 89.39% 和 89.79% 。同时从图 4(b)可以看出对应不同的功率反射系数 $R_{M_2} = 0.04, 0.10$ 和 0.16 ,共相位模式输出功率达到最大值分别从改进前的 229.41 W 降为 223.84 W, 203.16 W 和 188.83 W。由此可见,提高 R_{M_2} 一方面可以提高比例 Q ,另一方面却降低了共相位模式的输出功率,这主要是因为提高信号输出端的镜面功率反射系数会导致信号光在激光谐振腔内的往返次数增多^[7],这样一方面会加强共相位模式在激光器右端的耦合从而提高 Q ,但是同时由于信号光路程加长而带来更大的衰减,从而降低了信号光输出功率。所以,在选择信号输出端镜面的功率反射系数时应该权衡考虑 Q 和信号输出功率。

图 5 针对改进后的 19 芯光纤激光器给出了 Q 值和 P_{19} 随抽运功率的变化趋势,其中 a 取 0.59 mm, R_{M_2} 取典型值 0.04 。当抽运功率从 200 W 增加到 1000 W 时, P_{19} 呈线性增长,所对应的 Q 值从 88.48% 降至 88.11% ,变化非常小。可见抽运功率的变化对共相位模式功率占总输出功率的比例影响不大,这对设计高功率的 19 芯光纤激光器很有利。

另外,针对引入不同段数情况下的 Q 值, P_{19} 和

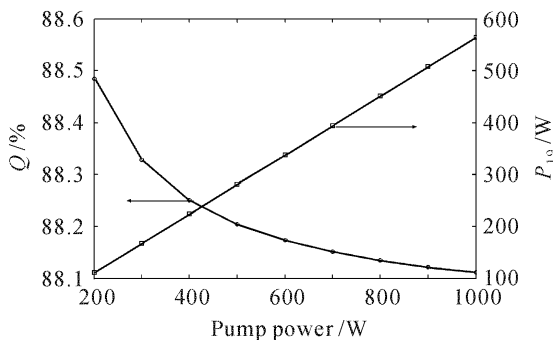


图 5 Q 和 P_{19} 随抽运功率的变化趋势

Fig. 5 Q and P_{19} versus pump power

a 值进行了分析,设 $R_{M_2} = 0.04$,前后抽运功率各为 200 W,其他条件不变。表 2 给出了不同段数条件下,当 Q 值达到最大时所对应的结果。

表 2 引入不同段数光纤情况下的计算结果

Table 2 Numerical results with different segments

19-core fibers			
Sum numbers of segments	P_{19} /W	Q /%	a /mm
1	228.2	84.3	1
2	225.96	85.56	0.8
3	223.84	88.25	0.59
4	172.47	88.5	0.5
5	160.98	89.69	0.39

从表 2 可以看到当光纤段数小于 3 时, P_{19} 缓慢递减而 Q 值相对有较大的增长,而段数大于 3 时 P_{19} 迅速降低。主要原因是增加光纤段数的同时 a 值减小,从图 3 可以看出 a 值减小可以削弱共相位模式向低阶模式的耦合,当引入段数较小时,削弱共相位模式到低阶模式的耦合起主导作用,而衍射损耗作用次之,所以 P_{19} 缓慢递减的同时 Q 值有较大的增加。但是当段数增大到一定程度时,衍射损耗成为主导作用,导致 P_{19} 有较大幅度的降低,所以在实际设计中应该权衡考虑。

3.2 方案二

图 2(b)给出了方案二的实验配置,其基本思路是利用单模光纤激光器^[8~10]输出的信号光作为种子光源,由于输出信号光为基模,所以可以近似为高斯光束,然后利用透镜组对种子高斯光束进行束腰变换以匹配共相位模式,从而最大限度地激励共相位模式获得较高的共相位模式功率输出。

假设种子高斯光源振幅分布表示为

$$E(r) = E_0 \exp(-r^2/\sigma^2), \quad (8)$$

式中 r 为光纤半径, σ 为束腰半径。当 $r = \sigma$ 时振幅下降到中心最大值的 $1/e$ 。研究表明当参数 $\sigma = 2d$ 时能够最大限度地激励共相位模式输出。图 6 给出共相位模式和对参数 $\sigma = 2d$ 的高斯光束振幅分布,可以看出 $r = 2d$ 时两者振幅均下降到中心最大值的 $1/e$ 。

在实际设计中,由于一般光纤激光器的纤芯半径较小,导致输出高斯光束的束腰半径小于 $2d$,就此本文提出利用双凸透镜对高斯光束进行束腰变换以获得参数 $\sigma = 2d$ 的高斯光束。图 7 给出双凸透镜束腰变换示意图。假设光纤激光器输出高斯光束的功率为 5 W,束腰半径 $\sigma_{01} = 0.5d$; 取 $f_1 = 0.5$ mm; $f_2 = 2$ mm; $l_1 = f_1$; $l = f_1 + f_2$; $l_2 = f_2$;

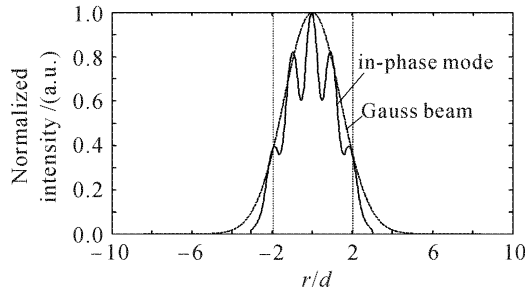


图 6 共相位模式和参数 $\sigma = 2d$ 的高斯光束所对应的强度分布

Fig. 6 Normalized intensity of in-phase mode and Gauss beam with $\sigma = 2d$

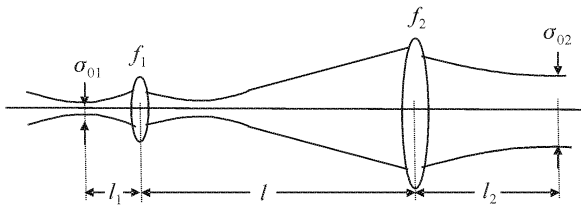


图 7 用双凸透镜实现高斯光束的变换

Fig. 7 Transformation of Gauss beam using double convex lenses

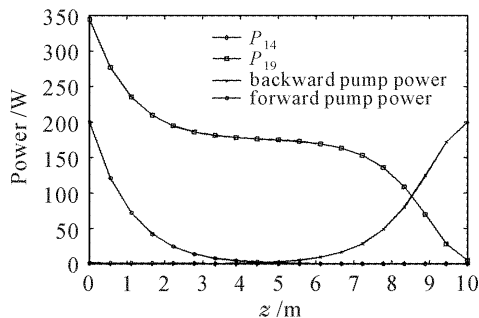


图 8 P_{19} , P_{14} , 后向抽运功率和前向抽运功率沿光纤长度的变化

Fig. 8 P_{19} , P_{14} , backward pump power and forward pump power as a function of fiber length

则在距离透镜 f_2 右方 l_2 的位置上得到束腰半径 $\sigma_{02} = 2d$ 的高斯光斑。

光纤放大器抽运功率仍取 400 W, 其余参数不变。经过数值计算, 图 8 给出了放大器中 P_{19} , P_{14} , 后向抽运功率和前向抽运功率沿光纤长度的变化, 输出信号中 $P_{19} = 335.46$ W, $Q = 95.74\%$, 在输入信号中 $P_{19} = 4.6971$ W, $Q = 97.92\%$ 。可见由于种子光最大限度地激励了共相位模式, 使共相位模式在光纤放大器的放大过程中占据绝对优势, 从而实现较高的输出效率, 确保了更好的光束质量。

4 结 论

针对如何提高 19 芯光纤激光器共相位模式功

率占总输出光功率的比例问题, 提出了两个改进方案: 第一个方案是在掺镱光纤右端与反射镜面之间引入三段间隔一定距离的非掺杂 19 芯光纤。研究表明, 光纤之间信号光衍射通过的距离存在一个最佳值, 通过优化距离参数可以提高共相位模式功率占总输出光功率的比例; 另外, 增加信号输出端镜面的功率反射系数可以进一步提高共相位模式占总输出光功率中的比例, 但是同时会增加信号光的损耗从而降低共相位模式的输出功率, 所以在选择此参数时应兼顾 Q 值和信号功率。通过优化衍射距离 a 并保持 R_{M_2} 不变仍取 0.04, Q 值从改进前的 79.06% 增加到 88.25%。第二个方案基本思路是利用单模光纤激光器输出的信号光作为种子光源, 再通过透镜组对种子高斯光束进行束腰变换以匹配共相位模式, 从而最大限度地激励共相位模式获得最大的共相位模式功率输出, 研究表明可以使 Q 值达到 95.74%, 从而实现了更好的光束质量。另外, 第二个方案比较前者不仅输出效率显著提高, 而且调试难度也有所降低。

参 考 文 献

- 1 M. Wragge, 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
- 2 M. Wragge, P. Glas, M. Leitner *et al.*. Phase-locking and self imaging properties of a Talbot resonator applied to circular structures [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(3):149~159
- 3 L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor *et al.*. Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13):1668~1670
- 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 Yanming Huo, Peter 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 Xie Jinghui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Tutorial of Physics Optics [M]. First edition. Beijing: Publishing House of Beijing Institute of Technology, 2005. 168~170
谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥. 物理光学教程[M]. 第一版. 北京: 北京理工大学出版社, 2005. 168~170
- 7 Nam Seong Kim, Toshihiro Hamada, Mahendra Prabhu *et al.*. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**(4-6):329~337
- 8 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1153~1158
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1153~1158
- 9 Li Lijun, Fan Wangde, Fu Shenggui *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):55~58
李丽君, 范万德, 付圣贵等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. 光学学报, 2005, **25**(1):55~58
- 10 Wei Wenlou, Ou Pan, Yan Ping *et al.*. Experimental study of 30 W CW fiber laser by two-end pumping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):5~8
韦文楼, 欧 攀, 闫 平等. 双端抽运的 30 W 光纤激光器实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):5~8