

## 6.7 kW 全国产化窄线宽三包层光纤激光器

韩志刚\*, 郑云瀚, 王昊业, 李方欣, 陈佳乐, 朱日宏

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了实现高功率光纤激光器的窄线宽输出,研究了基于大模场三包层掺镱光纤(LMA-YTF)高功率窄线宽光纤激光器的热效应和四波混频(FWM)效应。基于FWM效应模型,仿真分析了大模场三包层光纤(LMA-TCF)放大器光谱展宽的影响因素。建立了LMA-YTF的热分布模型,分析了大模场三包层光纤(LMA-YTF)中第二包层功率占比对光纤温度以及泵浦功率上限的影响,讨论了聚合物涂层导热系数和外部温度对光纤温度的影响,实验对比了不同反向合束器的泵浦功率上限,结果表明第二包层功率占比低的(6+1)×1合束器比(9+1)×1合束器拥有更高的泵浦功率上限。基于全国产化器件搭建了一台三包层光纤激光器,实现了输出功率6.7 kW、3 dB线宽为0.32 nm的激光输出。

**关键词:** 窄线宽; 三包层光纤; 光纤热效应。

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210849

## Home-made 6.7 kW narrow linewidth triple-cladding fiber laser

Han Zhigang\*, Zheng Yunhan, Wang Haoye, Li Fangxin, Chen Jiale, Zhu Rihong

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to achieve high-power output of fiber lasers with narrow linewidth, the thermal effect and the four-wave mixing (FWM) effect of the Yb<sup>3+</sup> doped large mode area triple-cladding fiber (LMA-YTF) based fiber laser was investigated. Based on the FWM effect model, the influences on the spectral broadening of the large mode area triple-cladding fiber (LMA-TCF) amplifiers were simulated and analyzed. Thermal distribution model of the LMA-YTF was modeled. The effects of the power ratio in the second cladding on the fiber temperature characteristics and the upper limit of the pump power were analyzed. The influence of the thermal conductivity of polymer coatings and external temperature on fiber temperature was discussed. The upper limits of the pump power of different backward combiners were compared experimentally. The experimental results indicate that the (6+1)×1 triple-cladding backward combiner with a lower power ratio in the second cladding has a higher pump power upper limit than the (9+1)×1 combiner, which agree with the simulation results. A triple-cladding fiber laser is constructed with fully home-made devices, achieving an output power of 6.7 kW and a 3 dB linewidth of 0.32 nm.

**Key words:** narrow linewidth; triple-cladding fiber; fiber thermal effect

收稿日期:2021-11-14; 修订日期:2022-02-14

通讯作者:韩志刚,男,副教授,博士,主要从事光纤激光技术方面的研究。

## 0 引言

高功率窄线宽光纤激光器在激光武器、引力波探测等系统中具有重要应用<sup>[1-3]</sup>,主振荡功率放大(MOPA)技术是实现高功率窄线宽激光输出的主要方案之一。为了抑制窄线宽激光器的受激布里渊散射效应,研究者们提出了使用相位调制展宽的激光或基于窄线宽光纤光栅的激光器作为高功率窄线宽激光器的种子源<sup>[4-7]</sup>。基于该类方案的激光器已实现了 4 kW 量级的窄线宽激光输出<sup>[6]</sup>。上述高功率窄线宽激光器大多使用芯径为 20~30 μm 的大模场双包层光纤放大器。窄线宽激光器输出功率的进一步提升受到四波混频效应(FWM)、TMI 效应、受激拉曼散射效应(SRS)以及双包层光纤包层泵浦功率上限等因素的影响。采用三包层光纤制作放大器是解决上述问题的潜在方案<sup>[8]</sup>。

J. R. Cozens 和 A. C. Boucouvalas 首次报道了三包层光纤(TCF)<sup>[9]</sup>。与传统的双包层光纤(DCF)相比,TCF 的纤芯旁边存在两个石英包层而不是一个。泵浦光被第二个石英包层反射,使 TCF 具有更高的损伤阈值和泵浦功率上限<sup>[10-12]</sup>。同时,TCF 包层直径与纤芯直径的高比值能使激光器拥有高 TMI 阈值<sup>[13]</sup>。目前公开报道的三包层光纤的最大输出功率为 9.01 kW<sup>[14]</sup>。

对于三包层光纤制作的放大器,由于大模场纤芯(直径 ≥ 20 μm)和高泵浦吸收率,TCF 能降低信号光功率密度,缩短增益光纤长度,有效抑制非线性效应(FWM、SRS 等)<sup>[15-17]</sup>。中国工程物理研究院基于 LMA-YTF 制作的窄线宽放大器实现了功率为 1.36 kW, 3 dB 线宽为 0.44 nm 的激光输出<sup>[18]</sup>。但是其研究并未分析 FWM 对三包层光纤放大器光谱展宽的影响以及 LMA-YTF 泵浦功率上限的影响因素。

文中基于 FWM 效应模型研究了 LMA-YTF 对放大器中光谱展宽的抑制机理,建立 LMA-YTF 的热分布模型,分析了其光纤温度以及泵浦功率上限的影响因素,并搭建了一台国产化器件的光纤激光器,实现了 6.7 kW 功率窄线宽激光输出。

## 1 理论

### 1.1 大模场三包层掺镱光纤热效应理论模型

图 1(a) 和图 1(b) 给出了 LMA-YTF 的结构以及光束传输示意。Yb<sup>3+</sup>掺杂的大模场纤芯 TCFs 在双包层的八角形石英泵浦包层(1<sup>st</sup> clad)和聚合物涂层(3<sup>rd</sup> clad)之间添加了圆形的低折射率石英包层(2<sup>nd</sup> clad)。这种特殊的设计允许泵浦光同时在第一和第二石英包层传输。因此与传统双包层光纤不同<sup>[19]</sup>,TCF 放大器的速率方程应表示为:

$$\frac{N_2(z)}{N_0(z)} = \frac{\frac{[P_{pi}^+(z) + P_{pi}^-(z)]\sigma_{ap}\lambda_p\Gamma_{pi}}{A_{eff}hc} + \frac{P_{si}^+(z)\sigma_{as}\lambda_s\Gamma_s}{A_{eff}hc}}{\frac{[P_{pi}^+(z) + P_{pi}^-(z)](\sigma_{ep} + \sigma_{ap})\lambda_p\Gamma_{pi}}{A_{eff}hc} + \frac{1}{\tau} + \frac{P_{si}^+(z)(\sigma_{es} + \sigma_{as})\lambda_s\Gamma_s}{A_{eff}hc}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_{pi}^{\pm}(z)}{dz} = \pm \left[ \Gamma_p(\sigma_{ep}N_2 - \sigma_{ap}N_1)P_{pi}^{\pm}(z) - \alpha_p P_{pi}^{\pm}(z) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dP_{si}^+(z)}{dz} = \Gamma_s(\sigma_{es}N_2 - \sigma_{as}N_1)P_{si}^+(z) - \alpha_s P_{si}^+(z) \quad (3)$$

$$P_s^+(z) = P_{s1}^+(z) + P_{s2}^+(z) - P_s^+(0), P_p^{\pm}(z) = P_{p1}^{\pm}(z) + P_{p2}^{\pm}(z) - \Delta P_p^{\pm}(z) \quad (4)$$

式中:  $N_{1i}$  和  $N_{2i}$  分别为  $(z)$  处 Yb<sup>3+</sup>离子上、下能级粒子数密度 ( $N_0 = N_1 + N_2$  为掺杂浓度分布),由于各包层泵浦吸收率不一致,此处的粒子数密度与掺杂浓度分布均为等效值;  $h$  为普朗克常数;  $\Gamma_{pi}$  为的第  $i$  包层光场模式与掺杂离子区域的填充因子;  $A_{eff}$  为光纤有效模式面积;  $\tau$  为 Yb<sup>3+</sup>离子上能级平均寿命;  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$  分

别为泵浦光及信号光频率;  $P_{pi}^+(z)$  和  $P_{pi}^-(z)$  分别为前向及后向传输的第  $i$  石英包层泵浦光功率;  $P_{pi}^+(z)$  和  $P_{pi}^-(z)$  为前向及后向传输的第  $i$  石英包层激发的信号光功率;  $\sigma_{ap}$  ( $\sigma_{ep}$ ) 和  $\sigma_{as}$  ( $\sigma_{es}$ ) 分别为泵浦吸收(发射)和信号

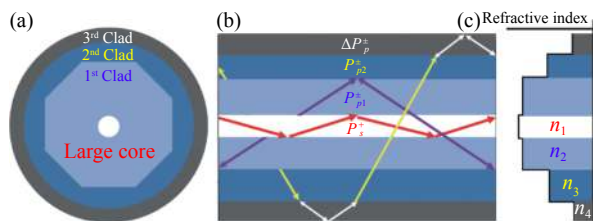


图 1 LMA-YTF 的 (a) 结构, (b) 传输光束和 (c) 折射率分布示意图  
Fig.1 (a) Structure, (b) optical path and (c) refractive index distribution of the Yb<sup>3+</sup> doped LMA TCF

吸收(发射)截面;  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别为泵浦光和信号光的损耗因子;  $P_{p1}^+$  和  $P_{p2}^+$  分别为第一和第二包层的泵浦功率;  $\Delta P_p^+$  为第二石英包层泄露至聚合物涂层的泵浦功率。上述简化后的稳态速率方程组加上边界条件构成了典型的两点边值问题, 利用高阶差分法<sup>[20]</sup> 即可得到边值问题的数值解, 从而可以通过理论模型得到 TCF 的两石英包层与纤芯功率的分布情况。图 1(c) 为掺 Yb<sup>3+</sup> 的 LMA TCF 的折射率分布图。纤芯、1<sup>st</sup> 石英包层、第二石英包层和 3<sup>rd</sup> 聚合物涂层的折射率分别为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ , 并且  $n_1 > n_2 > n_3 > n_4$ 。设空气的折射率为  $n_0$ , 此时 3<sup>rd</sup> 聚合物涂层-空气和第二石英包层-3<sup>rd</sup> 聚合物涂层的全反射临界角分别为  $\theta_0 = \arcsin(n_0/n_4)$  和  $\theta_1 = \arcsin(n_4/n_3)$ 。当泵浦光入射角  $\theta \in [\theta_0, \theta_1]$  时, 光在聚合物涂层中传播, 然后光逐渐被涂层吸收并产生热量。通过简单的计算可知 LMA-YTF 的  $\theta_1$  明显大于大模场双包层掺镱光纤(LMA-YDF), 所以与传统 YDF 热效应不同, 除了纤芯由于种子光放大过程中的量子亏损及其传输损耗引起的热效应外, 放大器中掺 Yb<sup>3+</sup> LMA TCF 光纤的热效应还包括聚合物涂层吸收第二石英包层泄露的泵浦光产热。在稳态条件下, 假设热源沿光纤轴向均匀分布在纤芯与聚合物包层中, 则 LMA-YTF 光纤 ( $z$ ) 处的热源功率密度可表示为:

$$q(z) = q_{clad1}(z) + q_{clad2}(z) + q_{core}(z) + q_{clad3}(z) \quad (5)$$

$$q_{cladi}(z) = \eta P_{pi}^+(z) \alpha_i \exp(-\alpha_i z) / (\pi r_i^2), \quad q_{core}(z) = \alpha_s P_s^+(z) \quad (6)$$

$$q_{clad3}(z) = \Delta P_p^+(z) \Delta \alpha_3 \exp(-\Delta \alpha_3 z) / [\pi(r_4^2 - r_3^2)] \quad (7)$$

式中:  $q_{cladi}$  与  $q_{core}$  分别表示 ( $z$ ) 处种子光放大过程中的第  $i$  包层泵浦光量子亏损及其传输损耗的产热;  $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_s$  为量子亏损导致热转化系数;  $\alpha_i$  为第  $i$  包层泵浦吸收系数;  $r_1$  为纤芯半径;  $q_{clad3}$  为聚合物包层吸收第二石英包层泄露泵浦光的产热;  $\Delta \alpha_3$  为聚合物包层沿光纤轴向的等效吸收系数<sup>[21]</sup>;  $r_3$  和  $r_4$  为第二石英包层和聚合物包层的半径。将方程 (1) ~ (4) 计算得到的功率分布代入公式 (5) ~ (7) 中, 即可求得光纤中的温度分布。

## 1.2 大模场三包层掺镱光纤窄线宽放大器中的 FWM 效应

在放大器 FWM 理论模型中, 种子光谱的特性可以通过离散波的振幅和相位分布表示。模型中 FWM

进程都基于高斯型多重理想单色波的假设, 四个频率满足  $\omega_j + \omega_i = \omega_m + \omega_n$ 。光纤中相位匹配项  $\Delta k^{lmn} = (\beta_m + \beta_n) - (\beta_j + \beta_i)$  主要由材料色散  $\Delta k_M$  决定<sup>[8]</sup>, 其中  $L_{coh} = \frac{2\pi}{|\Delta k_M|} = \frac{1}{|\beta_2| 2\pi v_s^2}$  为传输常数,  $L_{coh} = \frac{2\pi}{|\Delta k_M|} = \frac{1}{|\beta_2| 2\pi v_s^2}$  是有效模折射。用相干长度估算材料色散的影响, 其定义为:

$$L_{coh} = \frac{2\pi}{|\Delta k_M|} = \frac{1}{|\beta_2| 2\pi v_s^2} \quad (8)$$

在波长为 1  $\mu\text{m}$  附近的区域,  $\beta_2$  约等于 40 ps<sup>2</sup>/km,  $v_s \approx 100$  GHz 时, 相干长度约为 400 m。由于掺 Yb<sup>3+</sup> 三包层窄线宽放大器的光纤长度均小于 10 m, 因此可以认为在 FWM 模型中近似满足相位匹配条件。此外, 考虑光纤放大器的增益, 在近相位匹配条件下求和时, 将自相位调制、交叉相位调制、简并 FWM 和非简并 FWM 相同地对待, 多重 FWM 方程可以简化为<sup>[22]</sup>:

$$\frac{dA_j}{dz} = \frac{g}{2} A_j + i\gamma \sum_{l,m,n} A_l^* A_m A_n \quad (9)$$

式中:  $A_j, A_l, A_m, A_n$  分别代表四个光波的复振幅;  $\gamma$  为非线性系数;  $g$  代表掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤中的增益或者传能光纤中的背景损耗, 表达式为:

$$g(z) = \Gamma_s [N_2(z)(\sigma_s^e + \sigma_s^a) - N_0 \sigma_s^a] \quad (10)$$

在一个掺 Yb<sup>3+</sup> 三包层窄线宽放大器中, 利用三包层速率方程组 (1)~(4) 解出  $g(z)$  的数值解, 再将其代入公式 (9), 便可以得到 FWM 效应下光谱的变化。

## 2 仿真

### 2.1 窄线宽放大器 FWM 效应的光谱展宽仿真

基于放大器的 FWM 效应模型, 结合速率方程组 (1)~(4), 可以得到 FWM 效应下光谱的变化。以 34/460/530  $\mu\text{m}$  光纤构建的 LMA-YTF 反向泵浦放大器为例, 取信号光初始值 0.25 kW, 种子光 3 dB 线宽为 0.1 nm, 求解所用到的其他参数值如表 1 所示。为了减小计算量, 在该节的仿真中, 纵模间隔取为 0.002 nm, 波长变化范围取 1075~1085 nm, 光谱初始相位为 0~2 $\pi$  间随机分布。

图 2(a) 是放大器光纤长度分别取 4 m、8 m、12 m 和 16 m 的输出光谱仿真图。由图可知, 放大器输出光谱带宽随光纤长度增长而增大, FWM 造成的放大器光谱展宽现象明显。图 2(b) 为光纤芯径为

表 1 34/460/530 μm LMA-YTF 放大器仿真参数表

Tab.1 Parameters used in the simulation of a 34/460/530 μm LMA-YTF amplifier

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda_p/\text{nm}$	976	$\alpha_s/\text{m}$	0.0057
$\lambda_s/\text{nm}$	1080	$\tau/\text{ms}$	0.9
$\sigma_{ap}/\text{m}^2$	$1.7669 \times 10^{-24}$	$\text{NA}_{co}$	0.11
$\sigma_{ep}/\text{m}^2$	$1.7131 \times 10^{-24}$	$L/\text{m}$	6
$\sigma_{as}/\text{m}^2$	$0.0023 \times 10^{-24}$	$P_p^+$	0
$\sigma_{es}/\text{m}^2$	$0.282 \times 10^{-24}$	$P_p^-/\text{kW}$	4
$N_0/\text{m}^{-3}$	$1.09 \times 10^{26}$	$P_{seed}/\text{W}$	250
$\alpha_p/\text{m}$	0.0035	$\gamma/\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	$5.7 \times 10^{-4}$

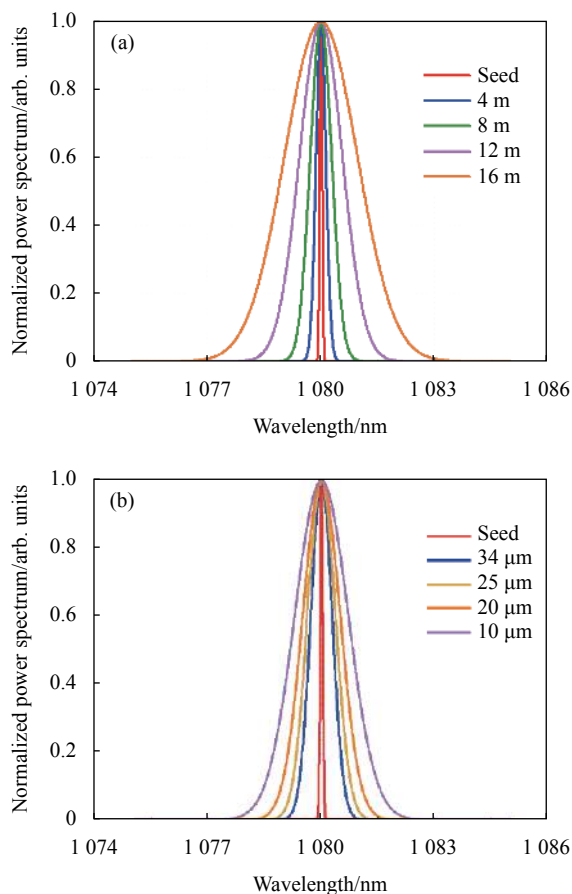


图 2 输出光谱随 (a) 放大器增益光纤长度和 (b) 纤芯直径变化曲线  
Fig.2 Output spectrum varies with (a) amplifier gain fiber length and (b) core diameter

10 μm、20 μm、25 μm 以及 34 μm 时的输出光谱对比图。由图可知, 增大光纤芯径有效减缓了光纤放大器的光谱展宽速度。结合公式 (9) 可知, FWM 效应是与光纤长度相关的函数, 随着光纤长度的增加而增强,

所以控制长度是抑制 FWM 效应引起的光谱展宽的重要手段。而公式 (9) 中的  $\gamma$  也是影响 FWM 效应的重要因素, 其表达式为:  $\gamma = n_2 \omega / (c A_{eff})$ 。  $n_2$  为非线性克尔参量,  $A_{eff}$  为有效模场面积。  $A_{eff}$  随纤芯直径正相关变化, 所以纤芯直径越大,  $\gamma$  越小, 越有利于 FWM 效应的抑制。

对于掺镱光纤, 由于  $\text{Yb}^{3+}$  的加入会增加二氧化硅的折射率, 使得中心纤芯和第一包层之间的折射率差变大, 难以支持光纤的单模传输, 因此通常加入量有限。而三包层设计通过在双包层光纤的中心纤芯和泵浦包层之间添加额外的包层, 使三包层光纤获得更大的模场面积。与标准双包层光纤相比, LMA-TCF 的大模场面积可以使其获得更高浓度的  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂。而通过对这个额外包层的折射率控制使得在大模场光纤中实现低 NA 激光输出成为可能, 所以 LMA-YTF 能同时通过缩短增益光纤长度和增大模场面积两个方法来抑制光谱展宽, 非常适用于高功率窄线宽光纤激光系统。

### 2.2 大模场三包层掺镱光纤的热效应仿真

基于三包层速率方程的理论模型, 以 34/460/530 μm 光纤构建的 LMA-YTF 反向泵浦放大器为例, 分析了光纤功率分布和聚合物包层导热系数对 LMA-YTF 高温易损点 (反向合束器-YTF 熔接点) 温度分布的影响。表 1 和表 2 列出了模拟光纤热效应使用的参数。其中,  $k_1$  和  $k_2$  分别为石英包层与聚合物包层的导热系数;  $h$  为光纤在 20 °C 水冷下的换热系数。由于聚合物包层吸收光功率的实际值难以测量, 假设其功率值  $\Delta P_p^+ = 1\% P_p^+$ 。

图 3(a) 为不同第二包层功率配比下, LMA-YTF 高温易损点聚合物涂层温度随总泵浦功率的变化曲线。聚合物涂层的温度变化趋势与纤芯类似, 聚合物涂层温度随总泵浦功率线性增大而增大, 随功率占比呈正相关。由于聚合物涂覆层温度损伤阈值较之掺镱石英纤芯低很多, 所以涂层的温度决定了放大器的泵浦功率上限。通常低折射率的聚合物涂层的温度损伤阈值为 80 °C。则在外部温度为 20 °C 时, 第二包层功率占比 0%、10%、20%、30% 和 40% 对应的泵浦功率上限分别为 6.13、4.6、3.5、2.79、2.33 kW。第二包层泵浦光功率占比越低, 放大器泵浦功率上限提升越明显。所以改善 LMA-YTF 放大器耦合方式

表 2 34/460/530 μm LMA-YTF 热效应仿真参数表

Tab.2 Parameters used in the thermal effect simulation of a 34/460/530 μm LMA-YTF amplifier

Parameter	Value
$P_{seed}/W$	250
$P_p^+$	0
$P_p^-/kW$	0.5-5
$\alpha_1$	0.62
$\alpha_2$	0.53
$k_1/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	1.38
$k_2$	0.2-1
$H/W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	1200-2400
$\Delta\alpha_3$	11

降低第二包层泵浦功率占比是突破三包层光纤激光系统功率限制的有效方案。图 3(b) 为在总泵浦功率为 5 kW 时, 不同第二包层功率配比下纤芯与聚合物涂层的温差曲线。在弱波导近似下, 热致模场变化主要取决于纤芯中心和聚合物涂层边缘的温差, 温差越大, 激光越易激励出高阶模 (HOM), 进而导致 TMI, 降低激光系统信号光功率阈值<sup>[23]</sup>。随着第二功率占比提升, LMA-YTF 高温易损点的温差提升, 所以降低第二功率占比也可以通过降低 TMI 的方式提升三包层激光系统的信号光功率阈值。

图 4(a) 是第二泵浦功率占比为 40% 时, 导热系数分别为 0.2、1 W/(m·K) 的聚合物涂层纤芯和涂层温度随总功率的变化曲线, 以及光纤温度分布截面图。蓝色与黑色曲线表示聚合物导热系数为 0.2 W/(m·K)

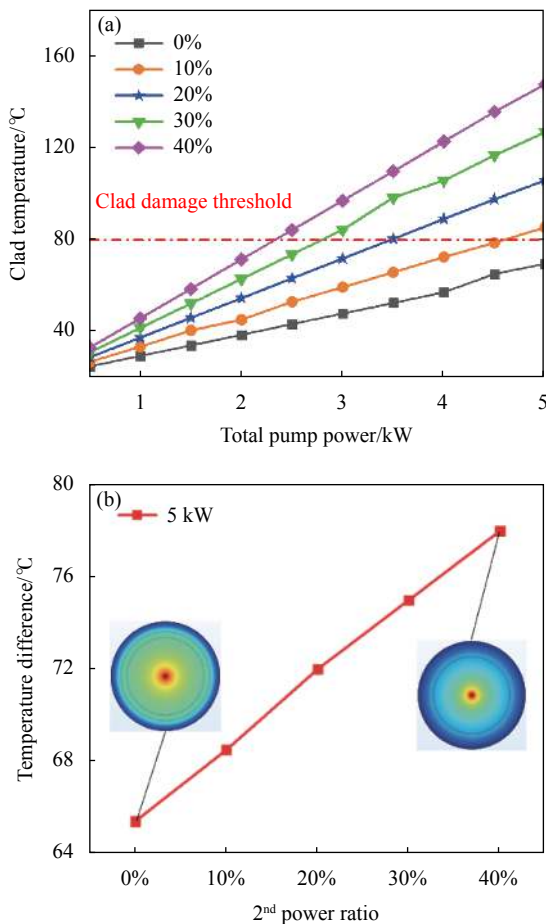


图 3 (a) 聚合物涂层温度随反向泵浦功率的变化曲线和 (b) 总泵浦功率为 5 kW 时, 纤芯与聚合物涂层温差曲线

Fig.3 Variations in the (a) polymer clad temperature with backward pump power, temperature difference between core and polymer clad at a total pump power of 5 kW

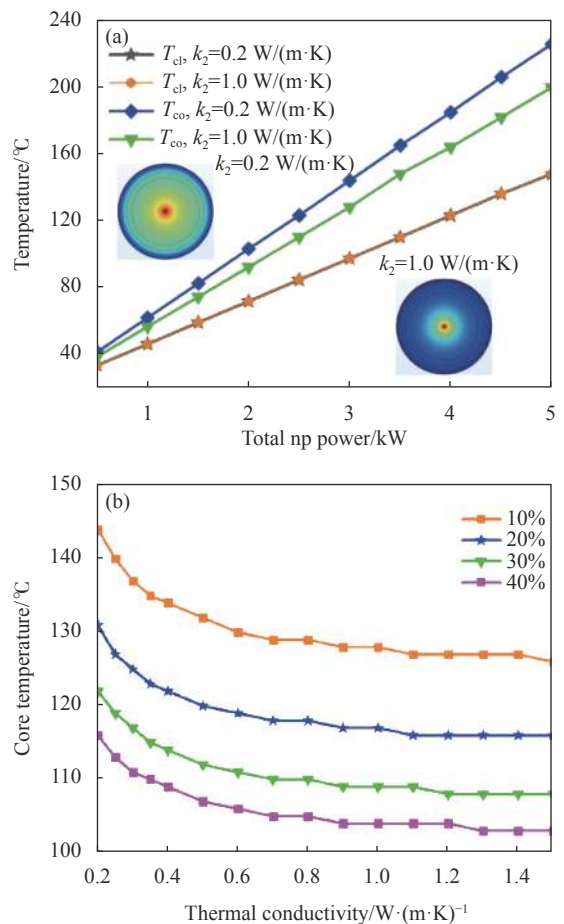


图 4 (a) 不同导热系数纤芯和聚合物涂层温度随总泵浦功率变化的曲线; (b) 纤芯温度随导热系数变化曲线

Fig.4 (a) Variations in the core and polymer clad temperature with backward pump power for different thermal conductivities; (b) Variations of core temperature with thermal conductivity

时的纤芯和聚合物涂层温度变化, 橙色与绿色曲线表示聚合物导热系数为  $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  时的温度变化。总泵浦功率一定时, 光纤的纤芯温度随导热系数增大而降低。但是当导热系数改变时, 两条聚合物涂层温度随总泵浦变化曲线基本重合。根据两种不同导热系数的光纤温度分布截面可知, 提升导热系数可以让光纤热量分布更集中, 这能有效抑制 HOM 的产生。分析可知, 提升聚合物涂层导热系数能有效降低纤芯温度, 以及抑制光纤中 TMI 的发生。图 4(b) 讨论了达到第二泵浦功率占比为 10%、20%、30% 和 40% 的泵浦功率上限时, 改变聚合物涂层导热系数对纤芯温度的影响。各曲线均显示了相同的变化趋势, 当聚合物导热系数在  $0.2 \sim 0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  时, 纤芯温度变化较为显著。而当聚合物导热系数大于  $0.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  后, 纤芯温度不再出现明显变化。基于三包层光纤的热效应分析, 其聚合物涂层应尽量使得导热系数大于  $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

图 5 说明了外部温度对泵浦功率上限的影响, 此时设聚合物导热系数为  $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。此仿真分别研究了外部温度由  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  变化至  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 泵浦功率上限的变化。当第二泵浦功率占比一定时, 泵浦功率上限随着外部温度的降低而提升, 但是功率上限的变化量随着功率占比的提升而减弱。当第二泵浦功率占比为 0% 时, 外部温度由  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  降低至  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 光纤的泵浦功率上限由  $6.33 \text{ kW}$  提升至  $8.23 \text{ kW}$ , 提升了  $1.9 \text{ kW}$ 。而第二泵浦功率占比为 40%, 功率上限仅提升了  $0.78 \text{ kW}$ 。由此可以得出, 外部降温的方式能有效控制光纤的热效应, 提升功率上限, 其效果随第二泵浦功率占比提升而削弱。

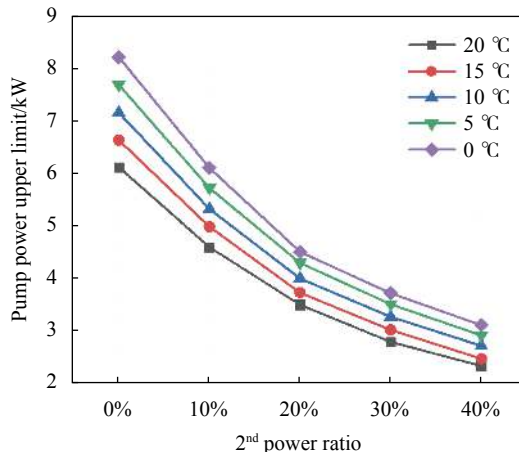


图 5 不同第二泵浦功率占比, 泵浦功率上限随外部温度变化曲线

Fig.5 Variation of power upper limit with external temperature for different 2<sup>nd</sup> pump power ratios

### 3 实验装置

全国产化窄线宽三包层光纤激光器实验装置如图 6 所示, 激光器包括基于布拉格光栅 (FBG) 的窄线宽种子源和放大器两个部分。基于 FBG 的窄线宽种子源采用纤芯/内包层直径为  $20/400 \mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤。输出功率为  $0.25 \text{ kW}$ ,  $3 \text{ dB}$  线宽为  $0.06 \text{ nm}$ 。种子光通过剥离器后进入放大器。放大器增益光纤采用纤芯/内包层直径为  $34/460/530 \mu\text{m}$  的掺镱光纤, 长度为  $8 \text{ m}$ 。增益光纤的纤芯/内包层数值孔径为  $0.11/0.22/0.46$ , 泵浦吸收系数为  $4.3 \text{ dB}/\text{m}@975 \text{ nm}$ 。放大器采用双端级联泵浦结构。73 个  $976 \text{ nm}$  非锁波长半导体激光器 (凯普林光电,  $976 \text{ nm}-140$ ) 作为泵浦源, 每个 LD 能提供大约  $130 \text{ W}$  的泵浦功率。放大器泵浦源三个为一组, 并在电路控制下以其最大功率单独工作。泵浦光通过  $7 \times 1$  级联泵浦合束器 (朗光科

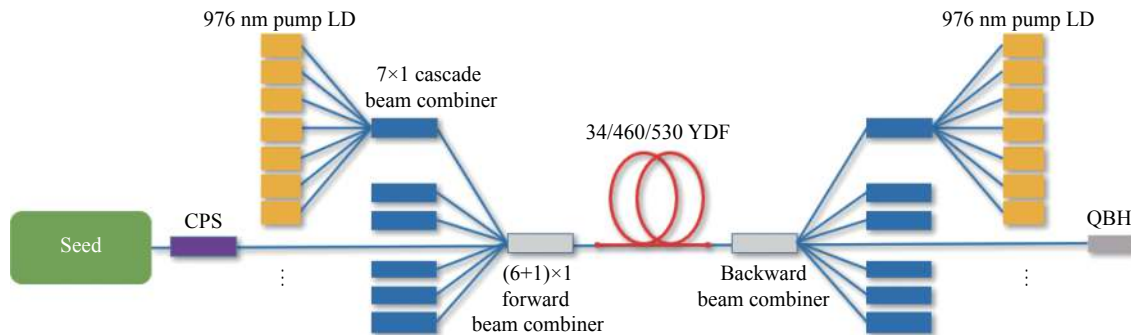


图 6 全国产化窄线宽三包层光纤激光器结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of the home-made triple-cladding narrow linewidth fiber laser

技, 7×1-S2) 分别耦合进 (6+1)×1 正向合束器和 (6+1)×1(或 (9+1)×1) 反向合束器(聚合光子, 6 000 W), 再注入到放大器增益光纤中。正反向功率配比为 1:1。反向合束器输出光纤为 50/60/360 μm, 端帽与其连接用于减少激光反射, 同时输出高功率激光。实验测试了两个样本的光纤, 分别记为样品 1 光纤(睿芯科技, YTF-34/460/530) 和样品 2 光纤(Nuferm, MM-YTF-34/460/530)。输出激光功率由功率计(Spiricon, 10 kW) 直接测量。输出光谱经直径为 9/125 μm 和 400/440 μm 光纤跳线散射测得, 测量设备为 YOKOGAWA 公司的 AQ6370 C。

实验中采用了自行设计的水冷盘分别放大器进行水温控制, 冷却盘表面刻有相应的光纤槽并涂有高导热率的硅胶, 将增益光纤埋入到浸有硅胶的光纤槽内以提高散热系数, 与此同时, 由于硅胶的密度和粘性均较大, 在一定程度上也起到了固定增益光纤的作用。水冷盘内部循环通有恒温的冷却水, 可将系统的热量及时排出, 保证系统温度不变。实验中采用温度为 15 °C 的冷却水。

## 4 实验结果

### 4.1 大模场三包层掺镱光纤泵浦功率上限测试

实验通过改变合束器耦合方式来改变增益光纤中不同包层的泵浦功率配比。合束器的泵浦功率配比可以通过 NA 法测量获得, 装置图如参考文献 [24] 中所示。泵浦光经合束器耦合至三包层传能光纤中, 由反向合束器的输入端输出, 输出光全部照射到功率计靶面, 记录此时功率计读数为  $P_{out}$ 。三包层光纤第二包层的  $NA \geq 0.46$ 。通过控制光路中输出端与光阑的距离以及光阑孔径的大小, 使得仅光纤输出光中  $NA < 0.46$  通过光阑, 功率计记录此时功率为  $P_{NA0.46}$ 。三包层光纤中  $NA \geq 0.46$  部分光的比例可由下式得出:

$$\eta_{NA} = (1 - (P_{NA0.46}/P_p)) \times 100\% \quad (11)$$

通过测量后可知用于实验的 (9+1)×1、(6+1)×1 光纤合束器三包层光纤中  $NA \geq 0.46$  部分光的比例分别为 30%、10%。

图 7 是实验装置分别使用 (6+1)×1 和 (9+1)×1 反向合束器时, 输出功率随单反向泵浦功率的变化曲

线。红色曲线为采用 (9+1)×1 反向合束器, 三包层光纤中  $NA \geq 0.46$  部分光比例为 30% 时激光器功率曲线。当泵浦功率为 2.01 kW 时, YTF-反向合束器熔接点达到温度阈值爆燃损毁, 激光器仅在泵浦功率为 1.61 kW 时实现 1.56 kW 激光输出。蓝色曲线为采用 (6+1)×1 反向合束器, 三包层光纤中  $NA \geq 0.46$  部分光比例为 10% 时的激光器功率曲线。激光器泵浦功率上限提升至少 2.36 kW, 为保证实验安全并未继续提升泵浦功率。实验结果与仿真分析相吻合, 改变泵浦耦合方式, 降低第二包层泵浦功率配比能有效提升泵浦功率上限。

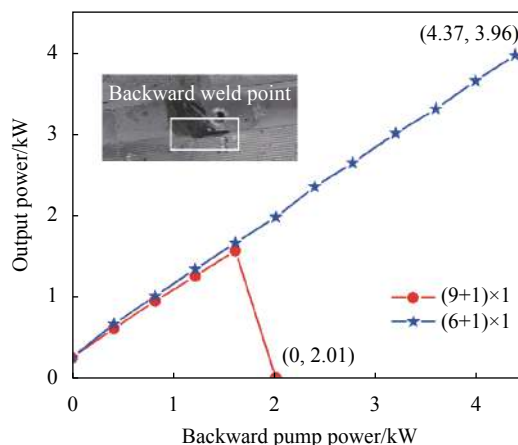


图 7 不同耦合方式下热效应功率上限对比曲线图

Fig.7 Comparison of the upper limit for the thermal effect power under different coupling methods

### 4.2 国产化窄线宽三包层光纤激光器

图 8 是高功率窄线宽三包层光纤激光器信号光功率随泵浦光功率变化曲线, 并对比了样品 1 与样品 2 三包层增益光纤的输出特性, 黑红曲线为国产光纤的功率变化曲线。随着反向泵浦功率提升, 激光器输出功率线性增加, 当总泵浦功率为 8.9 kW 时, 激光器输出功率达到最高为 6.7 kW。当只有正向泵浦工作时, 激光器光光转化效率为 83.5%, 随着反向泵浦光的注入, 激光器双端泵浦光-光转化效率下降至 63%。绿蓝曲线为样本 2 光纤的功率变化曲线, 其单正向光光转化效率为 85.5%, 双端泵浦工作时下降至 74.9%。单向泵浦时, 样本 1 光纤的光光转化效率较之样本 2 光纤只降低了 2%。样本 1 和样本 2 光纤实验结果的差异可能是源于光纤的设计和制作工艺的

不同, 而光纤熔接工艺以及与无源光纤的匹配程度都是影响激光器效率的因素。

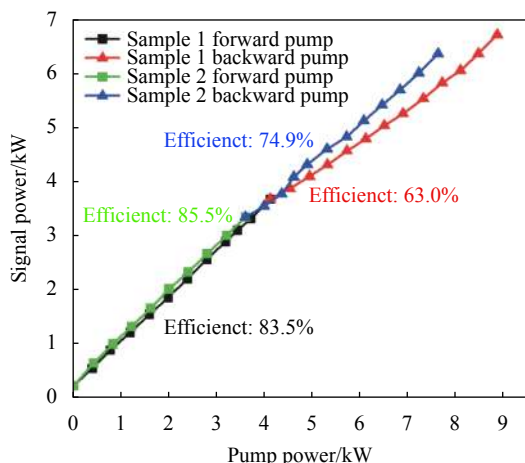


图 8 国产化高功率窄线宽三包层光纤激光器的输出功率特性

Fig.8 Output power characteristics of the home-made high-power triple-clad narrow linewidth fiber laser

图 9 为高功率窄线宽三包层光纤激光器输出功率由 0.25 kW(种子光) 增加到 6.7 kW 的在 1000~1200 nm 波长范围内的输出光谱曲线, 光谱曲线由功率计靶面散射光耦合进多模跳线 (芯包直径分别为 400/440 μm) 测得。最大输出功率 6.7 kW 时, 1135 nm 附近的光谱噪声由 SRS 引起, 输出光谱的信噪比为 37 dB。图 9 中的插图体现了激光器的光谱线宽, 光谱数据由芯包直径分别为 9/125 μm 的光纤跳线测得, 光谱仪的测量分辨率为 0.02 nm。激光器种子光

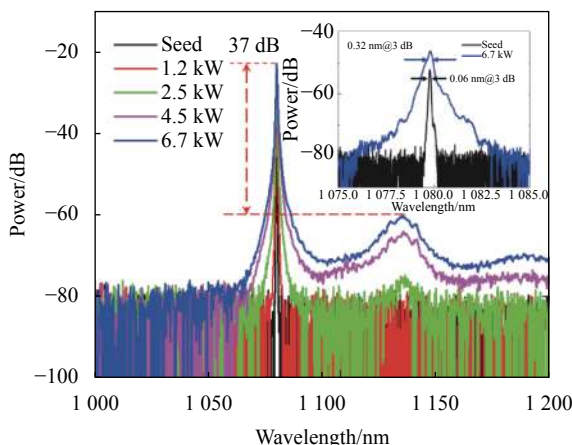


图 9 国产化高功率窄线宽三包层光纤激光器的光谱特性

Fig.9 Spectral characteristics of the home-made high-power triple-cladding narrow linewidth fiber laser

的 3 dB 线宽为 0.06 nm。输出功率 6.7 kW 时的输出光谱的 3 dB 线宽为 0.32 nm。激光器的光谱展宽倍率约为 5.3 倍, 表明使用 LMA-YTF 能有效抑制了激光器的光谱展宽效应。

## 5 结 论

文中研究了 LMA-YTF 对放大器光谱展宽的抑制作用以及耦合方式对其泵浦功率上限的影响因素。LMA-TCF 的双石英包层结构能使光纤在不影响折射率分布的情况下获得高掺杂浓度与大纤芯直径, 进而有效抑制放大器中由 FWM 引起的光谱展宽。放大器中 LMA-YTF 的耦合方式会影响光纤的热分布, 限制激光器的功率提升。泵浦功率上限随第二石英包层功率占比增高而降低, 提高涂层导热系数与降低外部温度会增加功率上限。通过实验可知相比于 (6+1)×1 三包层反向合束器, 第二包层泵浦功率占比更高的 (9+1)×1 合束器的泵浦功率上限更低。基于以上分析, 文中搭建的国产化器件三包层光纤激光器实现了输出功率为 6.7 kW, 3 dB 线宽为 0.32 nm 的窄线宽激光输出。

## 参考文献:

- [1] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6558.
- [2] Zheng Y, Yang Y, Wang J, Hu M, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber super-fluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24: 12063-12071.
- [3] Liu Z, Ma P, Su R, Tao R, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: Progress and prospect [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A7-A14.
- [4] Muller M, Klenke A, Steinkopff A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser [J]. *Optics Letter*, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [5] Huang Y, Xiao Q, Li D, et al. 3 kW narrow linewidth high spectral density continuous wave fiber laser based on fiber Bragg grating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106538.
- [6] Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 7-28. (in Chinese)



- [7] Wang Y, Sun Y, Peng W, et al. 3.25 kW all-fiberized and polarization-maintained Yb-doped amplifier with a 20 GHz linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Appl Optics*, 2021, 60(21): 6331-6336.
- [8] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. New York: Academic Press, 2007.
- [9] Cozens J R, Boucouvalas A C. Coaxial optical coupler [J]. *Electronics Letters*, 1982, 18: 138-140.
- [10] Laperle P, Paré C, Zheng H, et al. Yb-doped LMA triple-clad fiber laser[C]//Proc SPIE, Photonics North, 2006, 6343: 63430X.
- [11] Laperle P, Pare C, Zheng H, et al. Yb-Doped LMA triple-clad fiber for power amplifiers[C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6453: 645308.
- [12] Leich M, Just F, Langner A, et al. Highly efficient Yb-doped silica fibers prepared by powder sinter technology [J]. *Optics Letter*, 2011, 36(9): 1557-1559.
- [13] Smith A V, Smith J J. Increasing mode instability thresholds of fiber amplifiers by gain saturation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15168-15182.
- [14] Zhang L, Lou F G, Wang M, et al. Yb-Doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1315001. (in Chinese)
- [15] Yan P, Huang Y, Sun J, et al. 3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes [J]. *Laser Physics Letter*, 2017, 14: 080001.
- [16] Huang Y, Yan P, Wang Z, et al. 2.19 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3136.
- [17] Liu S, Zhan H, Peng K, et al. kW-level triple-cladding laser fiber[C]//Frontiers in Optics/Laser Science, 2018: JTU2A.24.
- [18] Liu S, Zhan H, Peng K, et al. Yb-doped aluminophosphosilicate triple-clad laser fiber with high efficiency and excellent laser stability [J]. *IEEE Photonics*, 2019, 11(2): 1-10.
- [19] Chu Q, Shu Q, Liu Y, et al. 3 kW high OSNR 1030 nm single-mode monolithic fiber amplifier with a 180 pm linewidth [J]. *Optics Letter*, 2020, 45(23): 6502-6505.
- [20] Wang Y, Po H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(10): 2262.
- [21] Yan M, Wang Z, Meng L, et al. Heat suppression of the fiber coating on a cladding light stripper in high-power fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(3): 485-491.
- [22] Feng Y, Wang X, Ke W, Sun Y, et al. Numerical analysis to four-wave mixing induced spectral broadening in high power fiber lasers[C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92550Q.
- [23] Ke W W, Wang X J, Bao X F, et al. Thermally induced mode distortion and its limit to power scaling of fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14272-14281.
- [24] Wang Z, Yan M J, Yin L, et al. Stripping of cladding light at different angles: Theoretical and experimental studies [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1124-1130. (in Chinese)