

国产 25/400 μm 掺镱双包层光纤实现 2.2 kW 窄线宽单模激光输出

李学文^{1,2}, 于春雷^{2,3*}, 胡丽丽^{2,3}, 沈辉¹, 全昭¹, 李秋瑞¹, 楼风光³, 王孟³, 张磊³,
漆云凤^{1,2**}, 何兵^{1,2}, 周军^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 基于自主研发的均匀掺杂低热光系数 25/400 μm 掺镱双包层光纤, 开展了全光纤高功率窄线宽光纤激光放大实验。激光系统实现了中心波长为 1060.3 nm、线宽为 25 GHz、最大功率为 2.2 kW 的单模激光输出, 其斜率效率达 78%, 光束质量因子 $M^2 \approx 1.2$, 其功率是目前报道的基于国产 25/400 μm 掺镱双包层光纤窄线宽放大器单模激光输出的最高功率。

关键词 光纤激光; 增益光纤; 热光系数; 单模; 窄线宽激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0636001

2.2 kW Narrow-Linewidth Single-Mode Laser Output Using Homemade 25/400 μm Yb-Doped Double Cladding Fiber

Li Xuwen^{1,2}, Yu Chunlei^{2,3*}, Hu Lili^{2,3}, Shen Hui¹, Quan Zhao¹, Li Qiurui¹,
Lou Fengguang³, Wang Meng³, Zhang Lei³, Qi Yunfeng^{1,2**}, He Bing^{1,2}, Zhou Jun^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Based on the self-developed large mode area Yb-doped double-cladding 25/400 μm active fiber with uniform doping and low thermo-optic coefficient, an all-fiber high-power narrow-linewidth fiber laser amplification experiment was carried out. The laser system achieves a single-mode fiber laser output with a maximum power of 2.2 kW, a linewidth of 25 GHz, and a center wavelength of 1060.3 nm, with a slope efficiency of 78% and a beam quality factor of $M^2 \approx 1.2$. This is the highest output power currently reported for narrow-linewidth single-mode amplifiers based on domestic Yb-doped double-cladding 25/400 μm active fiber, to the best of our knowledge.

Key words fiber laser; gain fiber; thermo-optic coefficient; single mode; narrow-linewidth lasers

OCIS codes 140.3510; 140.3570; 140.3615; 060.2320

高功率窄线宽光纤激光器具有光束质量好、效率高、结构紧凑、相干性好等突出优点, 普遍应用于光束合成、地球探测、科学研究和军事国防等领

域^[1-5]。模式不稳定效应和非线性效应是限制高功率窄线宽光纤激光功率提升的两大瓶颈科学问题^[6-7], 特别是大模场光纤的模式不稳定效应, 不仅

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61735007, 61405202, 61705243, 61775224)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)

* E-mail: sdyellcy@163.com; ** E-mail: dreamer_7@siom.ac.cn

严重限制功率提升还会导致输出激光的光束质量急剧退化,是高功率光纤激光发展亟待解决的技术难题。对此,国内外学者提出了脉冲抽运^[8]、动态模式激发^[9]、多芯光纤^[10]等多种技术方案来缓解模式不稳定效应。最近,中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤激光团队针对高功率窄线宽光纤激光的热光效应开展了深入研究,提出通过降低有源

光纤本征热光系数提升模式不稳定阈值功率的技术方案。基于磷铝硅三元体系下稀土离子高浓度均匀掺杂工艺精确控制纤芯玻璃成分,研制出高品质低热光系数大模场双包层增益光纤,基于图 1 所示窄线宽种子注入高功率全光纤放大器(MOFA)实现了中心波长 1060.3 nm、线宽 25 GHz、功率 2.2 kW 的单模光纤激光输出。

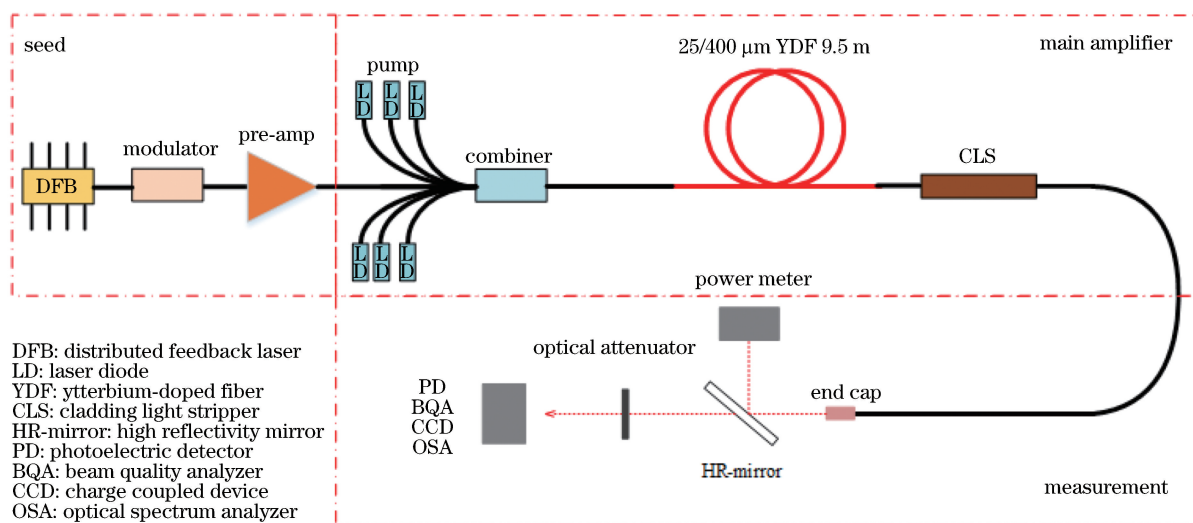


图 1 全光纤高功率窄线宽光纤激光放大器结构图

Fig. 1 Structure diagram of all-fiber high-power narrow-linewidth fiber laser amplifier

传统掺镱石英光纤化学性能稳定、掺杂浓度高且热膨胀系数低,是高功率光纤激光应用中主流的激光增益材料。但是,掺镱石英光纤具有高热光系数,受热光效应调制,在高功率强抽运下更容易诱发模式不稳定现象,限制高功率光纤激光器的功率提升。本课题组基于模式不稳定理论模型仿真结果^[11],提出通过降低光纤热光系数,减小热光效应对光纤折射率变化的调制作用,抑制高阶模激发,优化光束质量进而提高模式不稳定阈值功率的技术方案。图 2 所示曲线表明模式不稳定阈值功率与光纤热光系数呈反比关系,降低光纤热光系数能有效提升模式不稳定阈值功率。

课题组参照激光玻璃成分对热光系数的影响规律,在掺镱纤芯玻璃中引入热光系数为负值的 P 元素,用于平衡稀土元素、Al 元素等带来正热光系数的影响。利用分步多层沉积工艺实现了纤芯 Yb/Al/P 共掺石英玻璃成分的精确控制,优化纤芯成分磷铝物质的量比略大于 1,促使稀土离子配位于 P^[12-13],结合共掺氟技术降低纤芯玻璃的折射率,同时实现纤芯玻璃热光系数的控制。纤芯掺杂元素的作用机制如图 3 所示。基于该工艺制备得到了模式不稳定阈值高、抗光暗化性能优良、可高功率下稳定

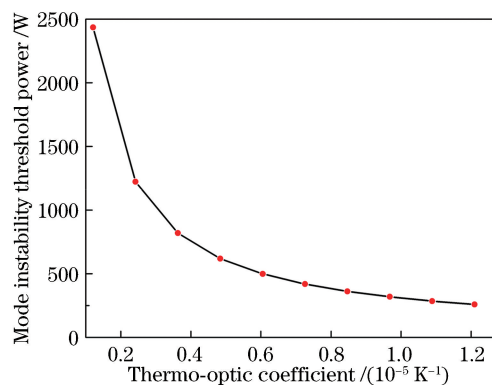


图 2 热光系数降低对光纤模式不稳定阈值功率的影响
Fig. 2 Effect of reducing thermo-optic coefficient on mode instability threshold power

工作的芯包比为 25/400 μm 的大模场双包层增益光纤。

基于上述自主研发的数值孔径 NA 为 0.06 的 25/400 μm 低热光系数增益光纤,课题组制备了与之匹配的高功率抽运合束器(承受抽运功率大于 5 kW)、包层光滤除器(滤除比优于 20 dB)、光纤端帽(承受激光功率大于 3 kW)等光纤元器件,采用分布反馈式单频激光器经级联相位调制展宽至约 25 GHz 作为窄线宽种子源,结合弯曲限模等措施实

现了全国产化高功率窄线宽单模光纤激光输出。如图 4(a)所示,主放大级采用国产 976 nm 波长锁定抽运源,在输入功率为 2820 W 时,获得最大激光功率输出 2240 W,激光功率与抽运光功率呈近似线性增长,斜率效率约为 78%。最高功率状态下激光光束质量测试结果如图 4(b)所示,光束质量因子

$M^2 \approx 1.2$,输出激光远场光斑呈基模形态。最高功率状态下的前、后向输出光谱如图 4(c)所示,前向光谱信噪比(SNR)达 39 dB。实验中没有观察到受激布里渊散射、受激拉曼散射以及模式不稳定等非线性现象。受限于可用抽运光功率,激光输出功率有望进一步提升。

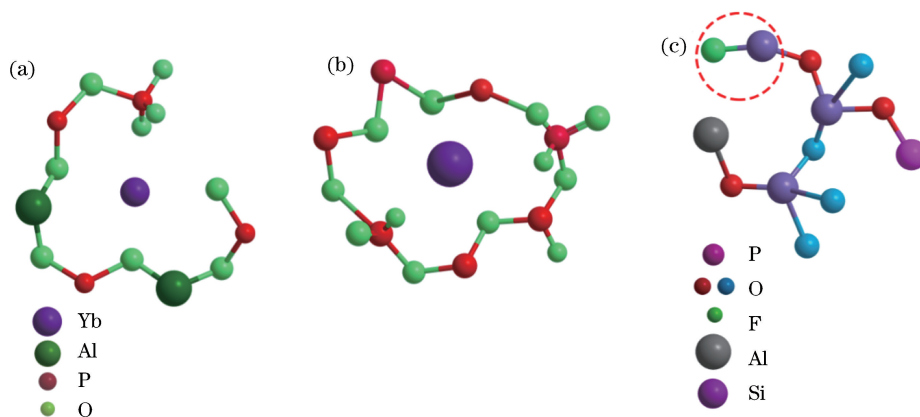


图 3 纤芯掺杂元素的作用机制。(a)磷铝物质的量比小于 1 时镱离子在石英玻璃中的分布;(b)磷铝物质的量比大于 1 时镱离子在石英玻璃中的分布;(c)掺氟作用机制示意图

Fig. 3 Mechanism of doping elements in fiber core. (a) Distribution of the Yb ion in quartz glass when molar ratio of phosphorus to aluminum is less than 1; (b) distribution of the Yb ion in quartz glass when molar ratio of phosphorus to aluminum is larger than 1; (c) schematic of fluorine doping mechanism

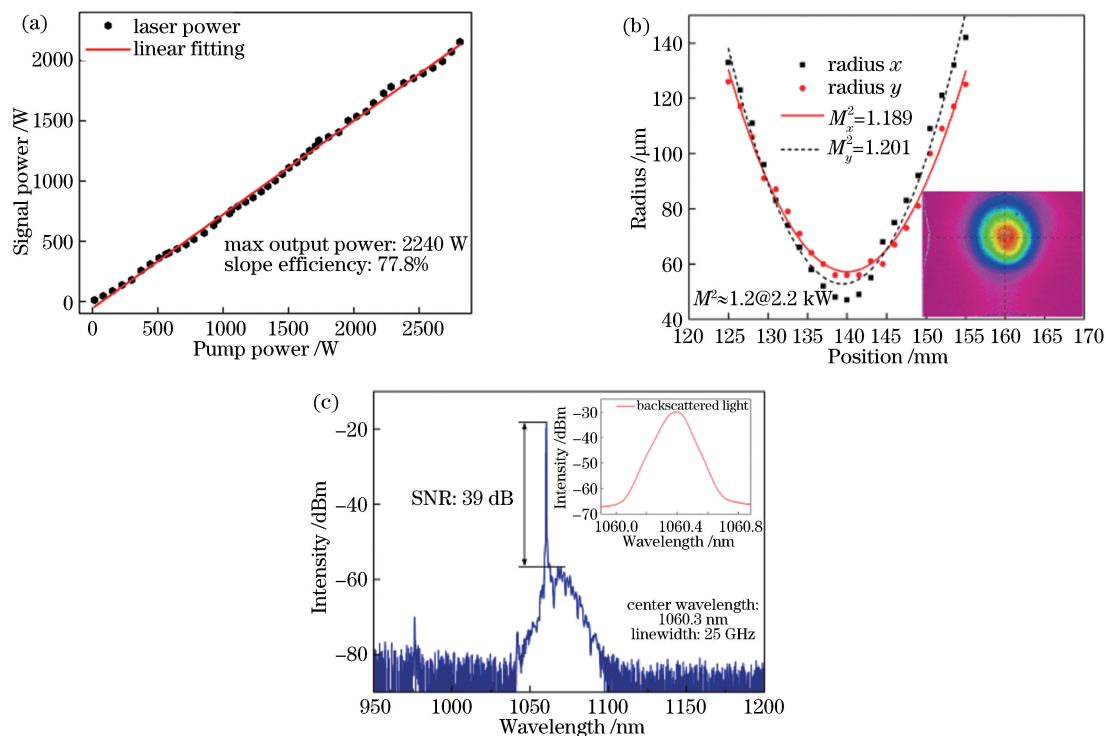


图 4 激光器输出激光特性。(a)输出功率与抽运功率的关系;(b) 2.2 kW 光束质量与远场光斑;(c) 2.2 kW 输出激光光谱

Fig. 4 Output characteristics of the laser. (a) Experimentally measured laser power and slope efficiency; (b) beam quality and far-field spot at 2.2 kW; (c) forward and backward emission spectrum of 2.2 kW output beam

该研究成果采用自主研发的 25/400 μm 低热光系数增益光纤及匹配光纤元器件,验证了全国产化高功率窄线宽光纤放大器,实现了线宽 25 GHz、功率 2.2 kW 的单模激光输出,是我国高功率光纤激光材料研究领域的重要进步,对于全国产化高功率光纤激光技术的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Zheng Y, Li P, Zhu Z D, *et al.* Progress in high-power narrow-linewidth fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080002.
郑也, 李磐, 朱占达, 等. 高功率窄线宽光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080002.
- [2] Mavalvala N, McClelland D E, Mueller G, *et al.* Lasers and optics: looking towards third generation gravitational wave detectors[J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43(2): 569-592.
- [3] Chu S, Bjorkholm J E, Ashkin A, *et al.* Experimental observation of optically trapped atoms [J]. *Physical Review Letters*, 1986, 57(3): 314-317.
- [4] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, *et al.* Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited)[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [5] Liu A P, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high-power fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 81-89.
- [6] Yang Y F, Shen H, Chen X L, *et al.* 2.5 kW near diffraction limit output obtained by all-fiber high-efficiency narrow-linewidth fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0419004.
杨依枫, 沈辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0419004.
- [7] Liu G B, Yang Y F, Wang J H, *et al.* Stimulated Brillouin scattering enhancement factor improvement in a 11.6-GHz-linewidth 1.5-kW Yb-doped fiber amplifier[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(7): 074207.
- [8] Haarlammert N, de Vries O, Liem A, *et al.* Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13274-13283.
- [9] Otto H J, Jauregui C, Stutzki F, *et al.* Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17285-17298.
- [10] Otto H J, Klenke A, Jauregui C, *et al.* Scaling the mode instability threshold with multicore fibers[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2680-2683.
- [11] Tao R M, Wang X L, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0903319.
- [12] Xu W B, Ren J J, Shao C Y, *et al.* Effect of P^{5+} on spectroscopy and structure of $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}/\text{P}^{5+}$ co-doped silica glass [J]. *Journal of Luminescence*, 2015, 167: 8-15.
- [13] Deschamps T, Vezin H, Gonnet C, *et al.* Evidence of AlOHC responsible for the radiation-induced darkening in Yb doped fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8382-8392.