

342W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器

刘江 刘晨 师红星 王璞

342W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser

Liu Jiang Liu Chen Shi Hong-Xing Wang Pu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 194209 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.194209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

203 W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器

203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser

物理学报.2016, 65(19): 194208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194208>

基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量

Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating

物理学报.2016, 65(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104203>

超长腔碳纳米管锁模多波长掺镱光纤激光器

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

物理学报.2015, 64(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204205>

石墨烯被动锁模全正色散掺镱光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报.2015, 64(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194205>

基于 10 m 光子晶体光纤的放大自相似锁模振荡器研究

Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber

物理学报.2015, 64(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184210>

## 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器\*

刘江 刘晨 师红星 王璞†

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

(2016年4月18日收到; 2016年7月14日收到修改稿)

报道了一个全光纤主振荡功率放大结构的窄线宽连续掺铥光纤激光器, 该激光器由窄线宽连续掺铥光纤激光种子源和两级包层抽运掺铥光纤放大器组成. 自制的窄线宽掺铥光纤激光种子源经过两级高功率包层抽运掺铥光纤放大器之后, 最高平均输出功率为 342 W, 掺铥光纤功率放大器的斜率效率为 56%, 输出激光的中心波长为 2000.3 nm, 3 dB 光谱带宽仅为 90 pm. 在放大过程中, 功率放大器的反向监测端没有观察到受激布里渊散射效应, 输出功率仅受限于当前可用的 793 nm 半导体抽运源的功率. 据我们所知, 该结果为目前国际上 2  $\mu\text{m}$  波段全光纤结构窄线宽激光器所产生的最高输出功率.

关键词: 光纤激光器, 光纤放大器, 窄线宽激光器

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Pk

DOI: 10.7498/aps.65.194209

## 1 引言

过去十年间, 高功率光纤激光器的研究和应用得到了飞速发展<sup>[1,2]</sup>, 已成为目前国内外最受关注、最有发展前景的激光器之一, 被誉为最新一代高性能工业激光器、医疗激光器和军用激光器. 与传统固体激光器相比, 光纤激光器独特的优点在于电光转换效率高、光束质量好、结构简单紧凑、环境适应能力强、稳定性好等. 在工业制造领域, 高功率光纤激光器以其优异的性能, 已广泛应用于汽车制造、航空航天等领域, 受到越来越多用户的青睐. 在军事国防领域, 光纤激光器以其独特的优势成为当前高能战术激光武器系统的重要光源. 2013年8月, 美国陆军空间与导弹防御司令部宣布授予洛克希德·马丁阿库莱特公司一项价值为2520万美元的合同, 为高能量激光移动示范者项目研制60 kW 频谱组束的高功率、高光束质量光纤激光器, 用于美国陆军车载激光武器系统, 用以击落敌方的无人飞

行器、火箭以及炮弹等.

然而, 受单根光纤输出功率的限制, 多光束相干合束、多光束频谱组束技术成为实现更高功率、更高亮度激光输出的主要途径<sup>[3-6]</sup>. 多光束相干合束的基本前提是将多个激光增益单元的输出进行合成, 同时保持单个激光器的光束质量, 是一种有效提升激光器功率和亮度的方法. 这要求单一激光器的相位控制在一个波长以内, 以使得多光束在远场高效相干叠加. 因此, 单一激光器的激光线宽越窄, 相位控制越容易. 而多光束频谱组束技术通常使用不同波长的单一激光器进行光束空间重叠, 不需要进行相位控制, 但要以牺牲光谱亮度为代价, 因而希望使用窄线宽激光器以增加可叠加激光器的个数来保持一定的光谱亮度, 通常光谱线宽小于 0.1 nm 以满足数百个甚至上千个窄线宽激光器光谱叠加的需求.

掺铥光纤具有较宽的增益带宽, 可实现 1.7—2.1  $\mu\text{m}$  波段范围内的激光输出. 该波段的掺铥光纤激光器可广泛应用于非金属材料加工、激

\* 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(批准号: 61527822)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 61235010)、国家自然科学基金青年项目(批准号: 61505004)、中国博士后科学基金特别资助项目(批准号: 2016T90019)、中国博士后科学基金面上资助项目(批准号: 2015M570019)、北京市博士后工作经费资助项目(批准号: 2015ZZ-03)和北京市教委科技计划一般项目(批准号: KM201610005028)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

光医疗、激光雷达、中红外光学频率梳等众多领域, 具有近红外波段激光器所无可替代的重要作用. 最近几年, 2  $\mu\text{m}$  波段高功率窄线宽掺铥光纤激光器实现了突飞猛进的发展. Goodno 等 [7] 实现了一个高功率掺铥光纤主振荡功率放大器, 在输出中心波长为 2040 nm 时, 激光功率达到了 608 W. Wang 等 [8] 也实现了一个单频掺铥光纤主振荡功率放大器, 输出功率 102 W. 基于分布式反馈二极管激光器和三级掺铥光纤放大器, Pearson 等 [9] 报道了一个线偏振单频掺铥光纤主振荡功率放大器, 最高输出功率为 100 W. 最近, Shah 等 [10] 实现了一个线偏振窄线宽掺铥光纤主振荡功率放大器, 输出功率 109 W, 3 dB 光谱线宽为亚纳米量级. 在我们之前的工作中实现了一个线偏振单频掺铥光纤全光纤主振荡功率放大器 [11], 最高输出功率为 210 W, 激光输出线宽小于 2 MHz.

本文采用自制的窄线宽连续掺铥光纤激光作为种子源, 经过两级双包层掺铥光纤放大器之后, 最高输出功率为 342 W, 掺铥光纤功率放大器的斜率效率为 56%, 输出功率未能进一步提高仅受限于最大抽运功率. 输出激光的中心波长为 2000.3 nm, 3 dB 光谱带宽仅为 90 pm, 放大过程中光纤功率

放大器的反向监测端没有观察到受激布里渊散射效应.

## 2 实验装置与结果

如图 1 所示, 高功率全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器由低功率窄线宽掺铥光纤激光种子源和两级高功率包层抽运掺铥光纤放大器组成. 如图 1 (a) 所示, 低功率窄线宽连续掺铥光纤激光种子源采用了全光纤、环形腔结构设计 [12], 环形腔结构有利于抑制激光自脉冲的产生. 实验中选用了光纤耦合输出的中心波长为 793 nm 的多模半导体激光器作为抽运源, 其最高输出功率为 12 W; 抽运光通过  $(2+1) \times 1$  的合束器耦合进掺铥增益光纤, 4 m 长的双包层单模掺铥光纤 (793 nm 处包层抽运吸收率为 3 dB/m) 作为增益介质, 该掺铥光纤的纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.15, 内包层直径为 130  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.46. 三端口环形器的隔离度大于 40 dB, 从而保证了激光的单向运转; 三端口环形器的第二端口熔接有窄线宽的光纤布拉格光栅 (FBG), 其中心波长为 2000.3 nm, 反射率为 99%, 3 dB 光谱带宽  $< 2$  nm.

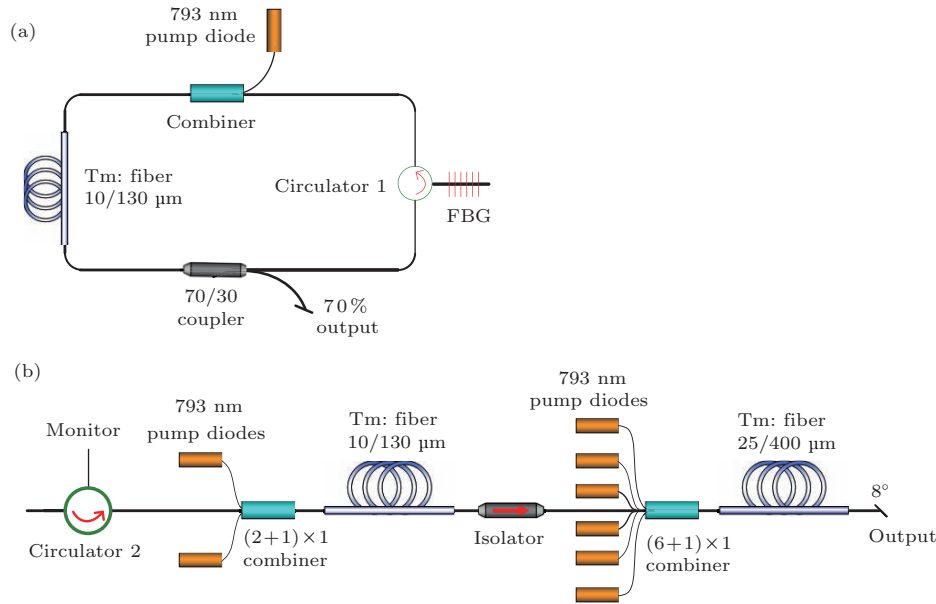


图 1 (a) 全光纤结构连续掺铥光纤激光种子源; (b) 两级全光纤结构掺铥光纤放大器

Fig. 1. (a) Schematic setup of the CW thulium-doped all-fiber laser seeder; (b) schematic setup of the two-stage thulium-doped all-fiber amplifiers.

图 2 所示为窄线宽掺铥光纤激光种子源输出功率随抽运功率变化的关系图. 由于激光谐振腔内的损耗较大, 掺铥光纤激光振荡阈值为 1.8 W.

从图 2 中可以看出, 窄线宽掺铥光纤激光器种子源的输出功率随抽运功率几乎成线性增加, 当 793 nm 注入抽运功率为 4.1 W 时, 最大输出功率为

560 mW, 相应的斜率效率为24%. 我们也可通过进一步降低元器件的损耗来降低激光谐振腔的振荡阈值.

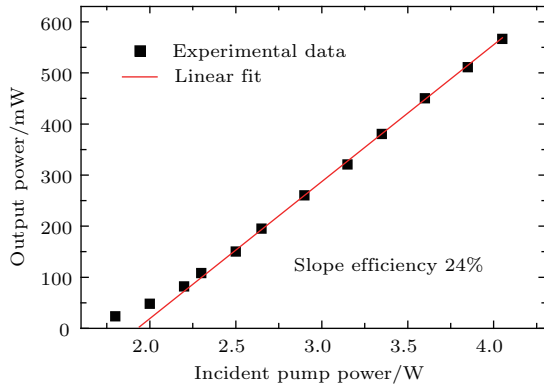


图2 窄线宽掺铥光纤激光种子源输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2. Output power of the narrow-linewidth thulium-doped fiber oscillator with the increase of incident pump power.

图3所示为窄线宽掺铥光纤激光种子源输出功率为560 mW时的光谱, 测量所用的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ 6375)的分辨率为50 pm. 从图3中可以看出, 输出激光的中心波长为2000.3 nm, 与实验所用光纤布拉格光栅的反射峰基本一致, 3 dB光谱带宽为80 pm. 实验中, 隔离度大于40 dB的光学隔离器位于光纤激光种子源与掺铥光纤预放大器之间, 用于隔离任何反向传输的信号光. 为了保证整个高功率窄线宽光纤激光器稳定工作, 所有掺铥光纤放大器都采用了全光纤结构设计.

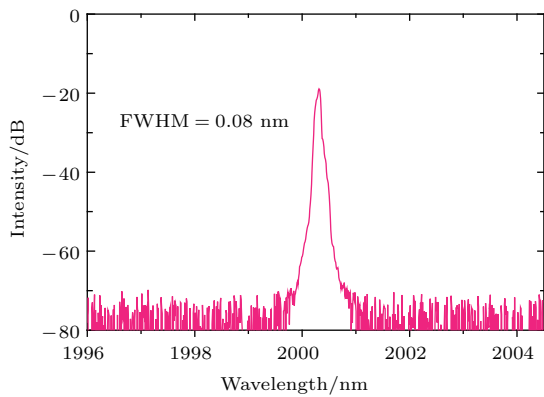


图3 窄线宽掺铥光纤激光种子源的输出光谱

Fig. 3. Optical spectrum of the narrow-linewidth thulium-doped fiber oscillator.

如图1(b)所示, 掺铥光纤激光种子源输出的窄线宽激光被两级包层抽运掺铥光纤放大器放大.

光纤预放大器使用了4 m长的双包层掺铥光纤作为增益介质, 该光纤的参数与激光种子源所使用的掺铥光纤一致. 在掺铥光纤预放大器中, 当半导体激光器抽运功率为18 W时, 光纤预放大器产生了4.5 W输出功率, 相应的激光中心波长和光谱带宽与种子源保持一致. 在最后一级高功率掺铥光纤功率放大器中, 使用了大模场面积双包层掺铥光纤作为激光增益介质, 掺铥光纤的长度为7.5 m, 纤芯直径为25  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为0.09, 内包层直径为400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为0.45, 该增益光纤在793 nm处包层抽运吸收率为1.8 dB/m. 为了改善输出激光的光束质量和掺铥光纤功率放大器的转换效率<sup>[13,14]</sup>, 大模场面积双包层掺铥光纤置于循环水冷却的热沉上, 水温保持在10  $^{\circ}\text{C}$ 左右. 光纤功率放大器所使用的抽运源为光纤耦合输出的高功率多模半导体激光器模块, 抽运模块输出激光的中心波长为793 nm, 输出尾纤为200/220  $\mu\text{m}$ , 最后从高功率(6+1)  $\times$  1抽运合束器输出的最高抽运功率为620 W. 在大模场面积双包层掺铥增益光纤之后熔接了0.5 m长匹配的无源光纤, 光纤输出端面切成8 $^{\circ}$ 角, 避免产生菲涅耳反射.

如图4所示为掺铥光纤功率放大器输出功率随半导体激光器抽运功率变化的关系, 光纤功率放大器输出功率随抽运功率几乎成线性增加. 当抽运功率增加到620 W时, 掺铥光纤功率放大器产生了342 W输出功率, 功率放大器相应的斜效率为56%. 实验中, 我们也测量了全光纤结构掺铥主振荡功率放大器输出功率为250 W时的功率波动, 在30 min内测得激光功率波动性为 $\pm 1\%$ , 较小的波动主要归因于实验中使用了全光纤集成的光学元器件.

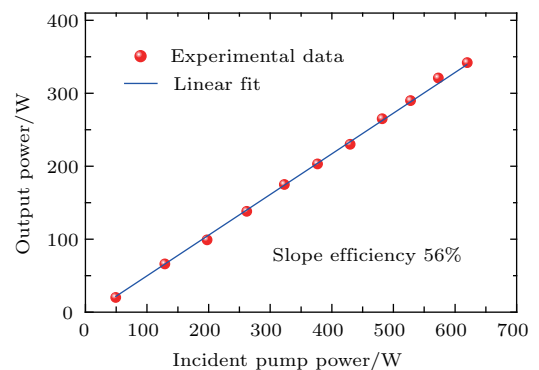


图4 掺铥光纤功率放大器输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4. Output power of the thulium-doped fiber power amplifier with the increase of pump power.



图5所示为掺铥光纤功率放大器输出的光谱,其输出激光的中心波长为2000.3 nm,与窄线宽掺铥光纤激光种子源的中心波长保持一致,3 dB光谱线宽为90 pm.从图中可以看出,掺铥光纤放大器没有产生寄生振荡,放大过程中也没有产生较强的自发辐射.此外,为了证明该掺铥光纤主振荡功率放大器工作在受激布里渊散射阈值之下,我们对掺铥光纤主振荡功率放大器反向输出的功率进行了监测.如图6所示,随着正向信号输出功率的不断提高,反向输出功率没有出现明显的增加,当正向信号输出功率达到342 W时,掺铥光纤功率放大器反向最高输出功率<10 mW.另外,我们采用2  $\mu\text{m}$ 波段扫描狭缝光束质量分析仪(BeamScope-P8)测量了高功率窄线宽掺铥光纤激光器的光束质量因子 $M^2$ .在输出功率为300 W时,测得光束质量因子 $M^2$ 小于1.15,表明高功率窄线宽掺铥光纤激光器具有非常高的光亮度.通常,对于非相干光谱组

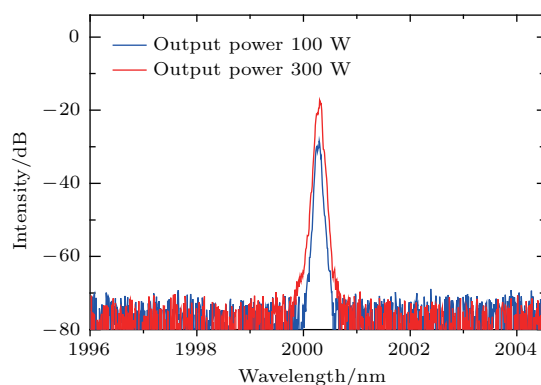


图5 (网刊彩色) 掺铥光纤功率放大器不同输出功率时的光谱

Fig. 5. (color online) Output spectrum of the thulium-doped fiber power amplifier at different power levels.

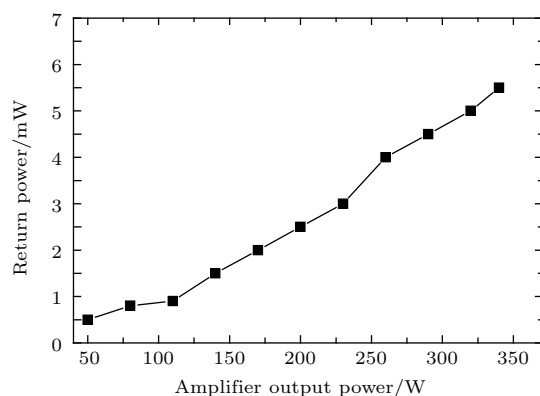


图6 掺铥光纤功率放大器反向输出功率随放大器正向输出功率的变化

Fig. 6. Backward output power of the thulium-doped fiber power amplifier with the increase of forward output power from amplifier.

束的窄线宽激光器来说,波长选择器件对激光的相位稳定性要求较低,甚至不需要单频激光.所以,本文报道的高功率、高光束质量、窄线宽掺铥光纤激光成为一个理想的光源可用于高功率多光束光谱组束<sup>[15,16]</sup>,从而实现更高功率、更高亮度的激光输出.

### 3 结 论

本文报道了输出功率为342 W的全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤主振荡功率放大器,输出激光的中心波长为2000.3 nm,3 dB光谱带宽仅为90 pm.该结果是目前全光纤结构窄线宽掺铥光纤激光器所产生的最高输出功率.在放大过程中,反向监测端没有观察到受激布里渊散射效应,也没有观察到寄生激光.

### 参考文献

- [1] Zhang L M, Zhou S H, Zhao H, Zhang K, Hao J P, Zhang D Y, Zhu C, Li Y, Wang X F, Zhang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134205 (in Chinese) [张利明, 周寿桓, 赵鸿, 张昆, 郝金坪, 张大勇, 朱辰, 李尧, 王雄飞, 张浩彬 2014 物理学报 **63** 134205]
- [2] Dong F L, Ge T W, Zhang X X, Tan Q R, Wang Z Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084205 (in Chinese) [董繁龙, 葛廷武, 张雪霞, 谭祺瑞, 王智勇 2015 物理学报 **64** 084205]
- [3] Loftus T H, Liu A, Hoffman P R, Thomas A M, Norsen M, Royse R, Honea E 2007 *Opt. Lett.* **32** 349
- [4] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, Andersen T V, Tsybin I, Böhme S, Peschel T, Brückner F, Clausnitzer T, Röser F, Eberhardt R, Limpert J, Tünnermann A 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 354
- [5] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, Schreiber T, Eberhardt R, Limpert J, Tünnermann A, Ludewigt K, Gowin M, Have E, Jung M 2011 *Opt. Lett.* **36** 3118
- [6] Drachenberg D R, Andrusyak O, Venus G, Smirnov V, Glebov L 2014 *Appl. Opt.* **53** 1242
- [7] Goodno G D, Book L D, Rothenberg E 2009 *Opt. Lett.* **34** 1204
- [8] Wang X, Zhou P, Wang X, Xiao H, Si L 2013 *Opt. Express* **21** 32386
- [9] Pearson L, Kim J W, Zhang Z, Ibsen M, Sahu J K, Clarkson W A 2010 *Opt. Express* **18** 1607
- [10] Shah L, Sims R A, Kadwani P, Willis C C C, Bradford J B, Pung A, Poutous M K, Johnson E G, Richardson M 2012 *Opt. Express* **20** 20558
- [11] Liu J, Shi H, Liu K, Hou Y, Wang P 2014 *Opt. Express* **22** 13572
- [12] Liu J, Wang P 2013 *Chinese J Laser* **40** 2001 (in Chinese) [刘江, 王璞 2013 中国激光 **40** 2001]
- [13] Liu J, Wang Q, Wang P 2012 *Opt. Express* **20** 22442

- [14] Liu J, Xu J, Liu K, Tan F, Wang P 2013 *Opt. Lett.* **38** 4150  
 [15] Simsa R A, Willisa C C C, Kadwania P, McComba T S, Shaha L, Sudesha V, Rothb Z, Poutousb M K, Johnsonb E, Richardson M 2011 *Opt. Commun.* **284** 1988  
 [16] Shah L, Sims R A, Kadwani P, Willis C C C, Bradford J B, Sincore A, Richardson M 2015 *Appl. Opt.* **54** 757

## 342W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser\*

Liu Jiang Liu Chen Shi Hong-Xing Wang Pu<sup>†</sup>

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

( Received 18 April 2016; revised manuscript received 14 July 2016 )

### Abstract

High-power narrow-linewidth rare-earth-doped fiber lasers, which are well known for their high beam quality and high efficiency properties, have rapidly developed in the last decade, due to the needs of a vast range of applications such as nonlinear frequency conversion, and incoherent spectral beam combination to further scale up the total output power of fiber lasers. At the same time, many efforts have also been made to extend the operating wavelength of narrow-linewidth fiber laser toward the longer mid-infrared wavelength region, which was motivated by a large number of promising applications such as atmosphere monitoring, and pump source for mid-infrared optical parametric oscillator. In most cases, thulium-doped fiber lasers operate efficiently in a wavelength range of 1.8–2.1  $\mu\text{m}$ , which could be considered as being one of the most important sources of narrow-linewidth laser radiation that has been developed and intensively investigated in the last several years. Here, we demonstrate a high-power narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser based on master-oscillator power-amplifier (MOPA) configuration. The MOPA yields 342 W of narrow-linewidth laser output at the central wavelength of 2000.3 nm with a 3-dB spectral bandwidth of 90 pm. The beam quality factor is measured to be  $M^2$  of  $<1.15$  at an output power of 300 W. No indication of stimulated Brillouin scattering could be observed at the highest output power level, and the output power is only currently limited by 793 nm available pump power. This kind of high-power narrow-linewidth thulium-doped all-fiber MOPA represents a promising achievement in the generation of high-power laser source via incoherent spectral beam combination.

**Keywords:** fiber laser, fiber amplifier, narrow-linewidth laser

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Pk

**DOI:** 10.7498/aps.65.194209

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61527822, 61235010, 61505004), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2016T90019, 2015M570019), the Beijing Postdoctoral Research Foundation, China (Grant No. 2015ZZ-03), and the Scientific Research General Program of Beijing Municipal Commission of Education, China (Grant No. KM201610005028).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn