

国产光纤实现同带抽运 3000 W 激光输出

王泽晖 肖起榕 王雪娇 衣永青 庞璐 潘蓉 黄昱升 田佳丁 李丹 闫平 巩马理

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

Wang Ze-Hui Xiao Qi-Rong Wang Xue-Jiao Yi Yong-Qing Pang Lu Pan Rong Huang Yu-Sheng
Tian Jia-Ding Li Dan Yan Ping Gong Ma-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 024205 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171676

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171676>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Nd³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究](#)

Stimulated emission and laser behaviors of Nd³⁺/Yb³⁺ Co-doped phosphate glass fiber
物理学报.2017, 66(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164204>

[342W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器](#)

342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser
物理学报.2016, 65(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194209>

[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>

[光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究](#)

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system
物理学报.2015, 64(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

[高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器](#)

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser
物理学报.2015, 64(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

国产光纤实现同带抽运3000 W激光输出*

王泽晖¹⁾ 肖起榕^{1)†} 王雪娇¹⁾ 衣永青²⁾ 庞璐²⁾ 潘蓉²⁾ 黄昱升¹⁾
田佳丁¹⁾ 李丹¹⁾ 闫平¹⁾ 巩马理¹⁾

1) (清华大学精密仪器系, 北京 100084)

2) (中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

(2017年7月20日收到; 2017年9月25日收到修改稿)

同带抽运是目前实现高功率光纤激光器的有效手段. 本文基于同带抽运方式, 以国产25/250 μm 掺镱双包层光纤为增益光纤, 构建了全光纤化的主控振荡器功率放大器. 实验中采用的国产光纤是中国电子科技集团公司第四十六研究所采用化学气相沉积结合气相-液相复合掺杂工艺制备的, 其 Yb^{3+} 离子的分布更均匀, 吸收截面更大, 吸收系数更高. 实验中, 在种子光功率为67.8 W、抽运总功率为3511 W的条件下, 实现了3079 W的激光输出, 斜效率为85.9%, 光束质量 M^2 约为2.14, 3 dB带宽为1.4 nm, 这是目前基于国产光纤同带抽运方式实现的最高功率. 理论和实验结果表明国产光纤制备技术不断成熟, 已经具备承受高功率输出的能力. 继续提高抽运功率, 优化增益光纤长度, 改良散热方式, 国产光纤有望实现更高功率的激光输出.

关键词: 光纤激光器, 同带抽运, 国产光纤, 高功率

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.67.20171676

1 引言

掺镱光纤激光器(ytterbium-doped fiber lasers, YDFLs)因其转换效率高、亮度高、光束质量好而在工业、科研等领域应用广泛. 以激光二极管(LD)作为抽运源, 双包层掺镱光纤作为增益介质, 采用主控振荡器功率放大器(master oscillator power amplifier, MOPA)结构的光纤激光器, 已经可以实现千瓦量级的激光输出^[1-5], 最高可以实现大于4 kW的近衍射极限输出^[6]. 与传统的LD抽运源相比, YDFL可以实现更高亮度的抽运功率注入, 可以进一步提升光纤激光器抽运效率与输出功率. 同时, 使用1000—1030 nm的YDFL作为抽运源, 更加接近输出波长, 可以有效地减少量子亏损, 降低光纤中的热功率, 实现更好的热管理与控制^[7-12]. 因此, 使用YDFL作为抽运源, 采用同带抽运的方式可以实现更高功率的激光输出, 成为目

前高功率光纤激光器的主要发展方向之一. 需要指出的是, 增益光纤在1018 nm附近的吸收系数远小于976 nm的吸收系数, 为充分吸收抽运光, 通常需要较长的增益光纤. 增益光纤长度增长, 可引起受激拉曼散射等非线性现象^[13], 为此对激光器的设计提出了更高要求.

2009年, IPG公司基于同带抽运的方式, 实现了单纤输出10 kW^[14], 随后, IPG公司又于2012年实现了单纤17 kW的激光输出^[15]. 2015年, 国防科技大学Xiao等^[16]采用同带抽运的方式, 利用制备的6台476 W@1018 nm的光纤激光器作为抽运源, 成功实现了2140 W的激光输出, 输出波长为1090 nm, 斜效率为86.9%, 光束质量为 M^2 约为1.9. 2016年, 西安光学精密机械研究所Yang等^[17]以同带抽运的方式将16.5 W的种子光(@1080 nm)放大至185 W, 光-光效率为85%. 2017年, 国防科技大学Zhou等^[18]报道了基于24路1018 nm的YDFL抽运源, 实现总功率3.5 kW的激光输出, 斜

* 国家自然科学基金(批准号: 61675114)和清华大学自主科研项目(批准号: 20151080709)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiaoqirong08@gmail.com

效率为87.5%，其输出光谱可以看到一阶受激拉曼光. 在使用国产光纤方面，2015年王岩山等^[19]基于15/130 μm 国产光纤，制备1018 nm 同带抽运源，激光输出功率大于150 W. 迄今为止，未见基于国产光纤的同带抽运光纤激光放大的报道.

本文采用中国电子科技集团公司第四十六研究所(以下简称中国电科46所)制备的25/250 μm 双包层掺镜光纤作为MOPA结构放大级的增益光纤，实现了基于同带抽运，超过3 kW的激光功率输出.

2 实验装置

实验装置采用MOPA结构，全光纤化设计，如图1所示. 种子源是输出波长为1080 nm的光纤振

荡器，尾纤尺寸为20/400 μm. 种子源后接包层光泄漏器(cladding light stripper, CLS)，泄漏器光纤尺寸为20/400 μm，与增益光纤相同. 滤去残余包层光后，纤芯中的种子光经(2+1)×1合束器的信号臂注入放大级.(2+1)×1合束器的信号臂为双包层光纤，其纤芯与内包层直径为20/130 μm，抽运臂为多模光纤，其纤芯与包层直径为105/125 μm，输出纤为双包层光纤，其纤芯与内包层直径为25/250 μm. 种子源增益光纤的内包层直径大于合束器信号臂光纤的内包层直径，需用氢氟酸(HF)腐蚀增益光纤，使二者内包层尺寸相同，再进行熔接. 由于在合束器前加入了包层光泄漏器，同时焊点两端光纤纤芯尺寸相同，因此对增益光纤包层进行腐蚀不会造成腐蚀区、焊点的局部过热现象.

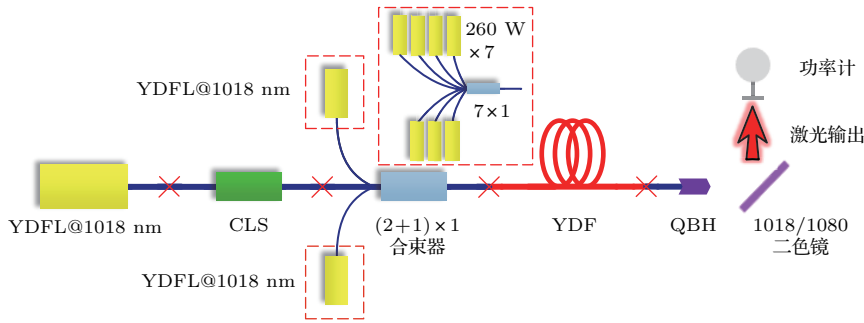


图1 同带抽运光纤激光器原理图

Fig. 1. Schematic diagram of the tandem pump fiber laser.

放大级如图1所示，抽运源为14台输出功率约为260 W的1018 nm YDFL，将其分为两组，每组中的7台激光器由7×1功率耦合器合束后(如图1中红框所示)，经100/120/360 μm的多模光纤(数值孔径NA=0.2)输出，总输出功率约为1800 W. 抽运源输出尾纤直接与合束器抽运臂进行熔接. 放大级中的增益光纤采用中国电科46所制备的八边形掺镜光纤，其纤芯直径为25 μm，数值孔径为0.068，内包层直径为250 μm，数值孔径为0.472，光纤在1018 nm处的吸收系数为0.41 dB/m. 增益光纤前端与合束器的输出纤(25/250 μm)熔接，尾端与

QBH输出头熔接，经1018 nm/1080 nm二色镜反射后输出，实验中的二色镜对1080 nm波段的光高反，对1018 nm波段的光高透. 引入QBH可有效避免返回光对种子源、抽运源的损伤与破坏，二色镜可以滤除残余抽运光.

3 数值分析

考虑增益光纤过长极易引起受激拉曼散射，需要对增益光纤进行优化设计，建立如下所示的速率方程组^[20,21]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p(z)}{dz} &= \Gamma_p[(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z) - \sigma_{ap}N]P_p(z) - \alpha_p P_p(z), \\ \frac{dP_s(z)}{dz} &= \Gamma_s[(\sigma_{as} + \sigma_{es})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s(z) - \alpha_s P_s(z) - \frac{\lambda_r}{\lambda_s} \frac{g_r}{A_{eff}} [P_r^+(z) + P_r^-(z) + 4P_{spon}]P_s(z), \\ \frac{dP_r^\pm(z)}{dz} &= \pm \Gamma_r[(\sigma_{ar} + \sigma_{er})N_2(z) - \sigma_{ar}N]P_r^\pm(z) \mp \alpha_r P_r^\pm(z) \pm \frac{g_r}{A_{eff}} [P_r^\pm(z) + 2P_{spon}]P_s(z), \end{aligned}$$

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{P_s(z)\sigma_{as}\Gamma_s\lambda_s + P_p(z)\sigma_{ap}\Gamma_p\lambda_p + [P_r^+(z) + P_r^-(z)]\sigma_{ar}\Gamma_r\lambda_r}{P_s(z)(\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s\lambda_s + P_p(z)(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p\lambda_p + [P_r^+(z) + P_r^-(z)](\sigma_{ar} + \sigma_{er})\Gamma_r\lambda_r + \frac{hcA_c}{\tau}}$$

式中, 角标 p, s, r 分别代表抽运光、信号光和一阶拉曼光, +, - 分别代表前向与后向的光信号; Γ 为填充因子; σ_a 为吸收截面; σ_e 为发射截面; h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为波长; τ 为 Yb 粒子上能级的寿命; A_c 为纤芯面积; A_{eff} 为等效纤芯面积; N 为粒子数密度; g_r 为拉曼增益系数, 其值为 0.5×10^{-13} ; α 为背景损耗, 抽运光、信号光、拉曼光损耗分别为 4.04, 14.3, 20 dB/km; $N_2(z)$ 表示光纤上能级粒子数密度; Δf 为一阶拉曼散射光波长处的自发辐射谱宽, 其值为 0.25 THz; P_{spont} 表示为光纤中沿一个方向上单个偏振态的自发拉曼噪声, 表达式为 [22]

$$P_{spont} = h\nu_r\Delta f \left\{ 1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(\nu_s - \nu_r)}{K_B T}\right] - 1} \right\},$$

K_B 为玻尔兹曼常数, ν 为频率, T 为温度, 取 300 K.

图 2 显示了当抽运功率为 3500 W 时, 放大器中抽运光、信号光、拉曼光的功率分布情况. 将图 2 分为三个部分, 第一部分为光纤小于 40 m, 信号光功率随光纤长度增长而升高; 第二部分为光纤长度介于 40—60 m 之间, 信号光功率趋于饱和, 功率增长较慢, 此时尚未达到拉曼阈值; 第三部分为光纤长度大于 60 m, 光功率达到拉曼阈值, 信号光功率将不再增加, 能量转移到一阶拉曼光上. 为避免产生非线性效应, 同时有效的利用增益, 减小信号光损耗, 将增益光纤长度优化至 40 m, 此时无受激拉曼散射现象, 仿真输出光功率为 3.13 kW.

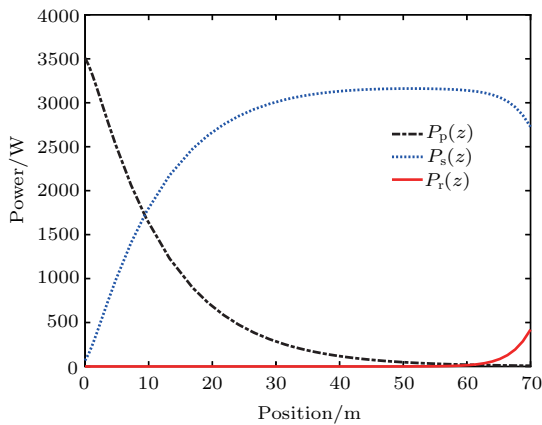


图 2 激光放大器中抽运光、信号光、拉曼光功率分布图
Fig. 2. Calculated power distribution of pump, signal and Raman laser along the fiber.

4 实验结果与分析

实验中使用的增益光纤是中国电科 46 所采用化学气相沉积 (modified chemical vapor deposition, MCVD) 结合气相-液相复合掺杂工艺制备的针对 1018 nm 高吸收的双包层掺镱光纤. 其光纤的制备过程为: 1) 在较高温度下 (1800—2100 °C) 于反应管内壁沉积若干层 (5—10 层) 阻挡层, 阻挡层主要成分为 SiO₂, 目的是阻止水分与杂质扩散到芯层, 阻挡层与石英管共同作为预制棒的包层; 2) 在较低温度下 (1200—1500 °C) 沉积疏松层, 疏松层的主要成分为 SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅; 3) 将含有 Yb³⁺ 离子的溶液注入反应管中浸泡疏松层, 待 Yb³⁺ 离子充分扩散到疏松层的空隙当中后, 将剩余溶液取出, 并对疏松层进行脱水处理; 4) 在高温下将疏松层玻璃化; 5) 重复步骤 2)—4) 若干次; 6) 在高温下将中空反应管缩成实心预制棒; 7) 对掺杂预制棒进行套管、磨八角形等加工处理; 8) 利用光纤拉丝塔将八角形预制棒控制成光纤并进行涂覆.

同时, 中国电科 46 所对上述工艺进行了技术改进和创新, 包括: 1) 在沉积疏松层时, 通过优化沉积温度、热源移动速度、原料流量等参数, 有效解决了光纤预制棒疏松芯层中微孔大小尺寸差距大、分布不均匀的技术难题; 2) 采用气相-液相共掺技术, 保证了 [AlO] 四面体在基质中的分布均匀性, 相比于 [SiO], [AlO] 拥有负电价, 要吸附阳离子以保持电中性, 间接提高了 Yb³⁺ 离子的分布均匀性; 3) 结合多层疏松芯层沉积技术, 进一步提高了 Yb³⁺ 离子的掺杂均匀性, 并有效解决了高浓度掺 Yb³⁺ 离子时出现的析晶问题; 4) 通过调节双包层掺镱光纤纤芯中共掺剂铝、磷元素的掺杂比例, 增加了 Yb³⁺ 离子周围环境的非对称性, 拓宽了光纤中 Yb³⁺ 离子的吸收截面; 5) 在预制棒加工时, 改善了预制棒夹持方式, 并优化了进给速度、磨片旋转速度等参数, 有效提高了光纤预制棒八角形的加工精度, 并有效降低了预制棒表面微缺陷的数量.

放大级中的增益光纤长度优化为 40 m, 增益光纤对 1018 nm 抽运光的总吸收为 16 dB, 抽运光基本吸收完成. 放大级输出功率如图 3 所示, 输出激光功率随着抽运光功率的提高而线性增强, 最高的

输出功率为3079 W, 此时抽运输入功率为3511 W, 斜效率为85.9%. 图4为在最高输出功率下的光谱图, 输出激光的中心波长为1080.2 nm, 3 dB带宽为1.4 nm. 从光谱上可以看到, 在1130 nm附近没有受激拉曼散射现象发生, 激光功率未达到受激拉曼散射阈值, 与仿真结果一致. 实验中种子光的功率为67.8 W, 输出光谱如图4中内嵌图所示, 3 dB带宽为0.9 nm. 实验中使用PRIMES生产的激光光束质量分析仪来测量输出激光的 M^2 因子. 当抽运功率为600 W时, M^2 约为2.14, 测量结果如图5所示.

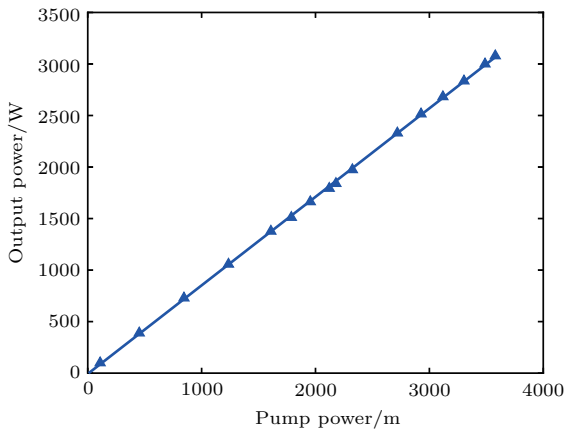


图3 光纤输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3. Curve of output power versus pump power.

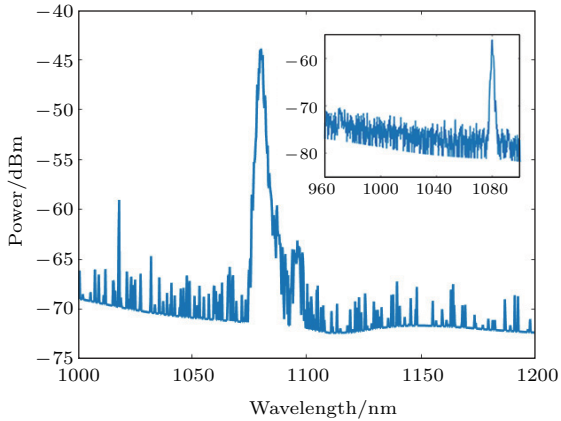


图4 输出激光光谱(内嵌图为种子光光谱)

Fig. 4. Spectrum of output laser (seed spectrum inset).

图6所示为中国电科46所制备的25/250 μm 双包层光纤在显微镜下观测的横截面, 其八边形形状比较规则, 对边间距误差小于1 μm , 纤芯内包层同心度误差小于1.5 μm . 图7为放大器主焊点的显微镜图像, 无明显轴向偏差. 与文献[23]进行对比

并结合上述的实验验证, 说明国产光纤的制作技术日趋成熟, 已经具备承受高功率输出的能力.

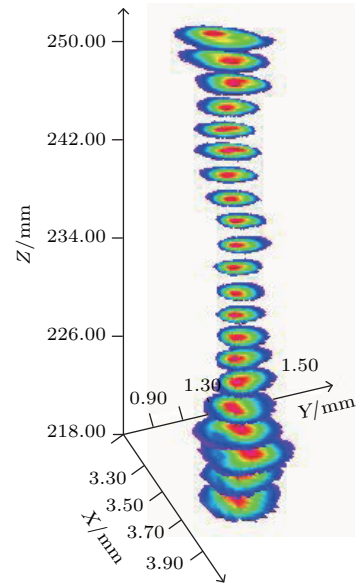


图5 光束测量结果

Fig. 5. Beam quality measurement results.

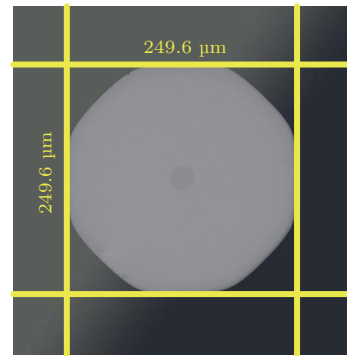


图6 国产增益光纤截面图

Fig. 6. Cross section of the domestic gain fiber.

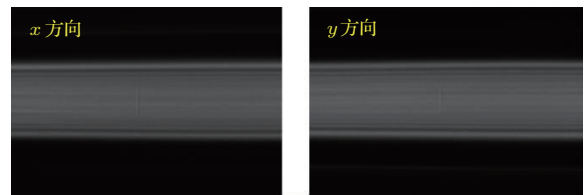


图7 国产增益光纤主焊点显微镜像

Fig. 7. Microscopic image of the splicing joint of the domestic gain fiber (for both x and y direction).

与直接抽运相比, 同带抽运具有量子亏损较小、易于热管理的优势[24]. 下面基于速率方程与热传导方程[25-28], 分别就976 nm直接抽运与1018 nm同带抽运对光纤内热功率密度分布进行理论计算, 其中热功率密度 Q 定义为纤芯中单位体

积内产生的热功率,即

$$Q(z) = -\frac{dP_Q(z)}{A_c dz},$$

其中, A_c 为纤芯面积, $P_Q(z)$ 为产热功率分布函数. 设 η 为量子效率, 则在 dz 长度内产热功率可以表示为

$$dP_Q(z) = (1 - \eta)dP_p(z).$$

仿真结果如图 8 所示, 抽运方式为前向抽运 3500 W, 增益光纤均为 25/250 μm 掺 Yb 光纤, 增益光纤在 1018 nm 处的吸收系数为 0.41 dB/m, 在 976 nm 处的吸收系数为 4.8 dB/m. 与直接抽运相比, 同带抽运中热功率密度要小接近两个数量级, 同时, 热功率的分布更加均匀, 利于系统的热管理, 但付出的代价是需要更长的光纤. 综上, 因在热管理上优势明显, 同带抽运将会是实现更高功率激光输出的有效技术途径.

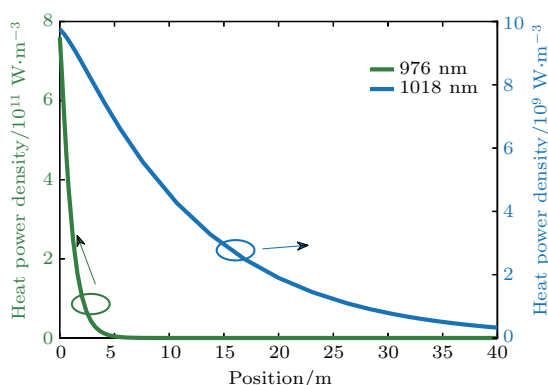


图 8 直接抽运与同带抽运热功率密度分布

Fig. 8. Calculated heat power density distribution of direct and tandem pump along the fiber.

5 总 结

同带抽运是实现高功率光纤激光器的有效途径, 也是目前研究的一大热点. 本文基于同带抽运方式, 放大级增益光纤采用中国电子科技集团公司第四十六研究所制备的 25/250 μm 掺 Yb 光纤, 当种子光功率为 67.8 W、抽运总功率为 3511 W 时, 获得了超过 3 kW 的激光输出, 斜效率为 85.9%, M^2 约为 2.14, 中心波长为 1080.2 nm, 3 dB 带宽为 1.4 nm. 同时, 对同带抽运激光放大器进行了理论数值分析, 数值分析结果与实验结果相近. 此外, 从产热的角度, 对同带抽运以及直接抽运进行了分析比较, 说明了同带抽运方式在热管理上的巨大优

势. 进一步提高抽运功率, 同时优化增益光纤长度, 改良散热方式, 国产光纤有望实现更高功率的激光输出.

参考文献

- [1] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [2] Fang Q, Shi W, Qin Y G, Meng X J, Zhang Q H 2014 *Laser Phys. Lett.* **11** 105102
- [3] Beier F, Hupel C, Nold J, Kuhn S, Hein S, Ihring J, Sattler B, Haarlammert N, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A 2016 *Opt. Express* **24** 6011
- [4] Yan P, Yin S P, He J W, Fu C, Wang Y P, Gong M L 2011 *IEEE Photon. Tech. L.* **23** 697
- [5] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, Petit V, Pooler E S 2014 *Proc. SPIE* San Francisco, California, United States, March 12, 2014 p89610V
- [6] Beier F, Hupel C, Kuhn S, Hein S, Nold J, Proske F, Sattler B, Liem A, Jauregui C, Limpert J 2017 *Opt. Express* **25** 14892
- [7] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** B63
- [8] Yan P, Wang X J, Li D, Huang Y S, Sun J Y, Xiao Q R, Gong M L 2017 *Opt. Lett.* **42** 1193
- [9] Codemard C A, Sahu J K, Nilsson J 2010 *IEEE J. Quantum Elect.* **46** 1860
- [10] Wu W M, Xiao H, Xu J M, Leng J Y, Zhou P, Guo S F 2011 *Laser Optoelectr. Prog.* **48** 11 (in Chinese) [吴武明, 肖虎, 许将明, 冷进勇, 周朴, 郭少锋 2011 激光与光电子学进展 **48** 11]
- [11] Panbharwala Y, Yang P, Nilsson J, Srinivasan B 2016 *13th International Conference on Fiber Optics and Photonics* Kanpur, India, December 4–8, 2016 Tu2E.3
- [12] Zervas M N, Codemard C A 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **20** 219
- [13] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, Xu X J, Liu Z J 2011 *Opt. Express* **19** 18645
- [14] Ferin A, Abramov M, O'Connor M, Fomin V, Gapontsev V 2009 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, Maryland, United States, May 31–June 5, 2009 CThA3
- [15] Ferin A, Gapontsev V, Fomin V, Abramov A, Abramov M, Mochalov D 2012 *6th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications* St. Petersburg, Russia, June 25–29, 2012 TuSY1-12
- [16] Xiao H, Leng J Y, Zhang H W, Huang L J, Xu J M, Zhou P 2015 *Appl. Opt.* **54** 8166
- [17] Yang H N, Zhao W, Si J H, Zhao B Y, Zhu Y G 2016 *J. Opt.* **18** 125801
- [18] Zhou P, Xiao H, Leng J Y, Xu J M, Chen Z L, Zhang H W, Liu Z J 2017 *JOSA B* **34** A29
- [19] Wang Y S, Sun Y H, Ma Y, Li T L, Gao Q S, Tang C, Zhang K 2014 *Chin. J. Lasers* **42** 69 (in Chinese) [王岩山, 孙殷宏, 马毅, 李腾龙, 高清松, 唐淳, 张凯 2014 中国激光 **42** 69]

- [20] Zhang H W, Xiao H, Zhou P, Wang X L, Xu X J 2014 *Opt. Express* **22** 10248
- [21] Xiao Q R, Yan P, Li D, Sun J Y, Wang X J, Huang Y S, Gong M L 2016 *Opt. Express* **24** 6758
- [22] Churkin D V, Babin S A, Eltaher A E, Harper P, Kablukov S I, Karalekas V, Aniacastañón J D, Podivilov E V, Turitsyn S K 2010 *Phys. Rev. A* **82** 033828
- [23] Wang X J, Xiao Q R, Yan P, Chen X, Li D, Du C, Mo Q, Yi Y Q, Pan R, Gong M L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164204 (in Chinese) [王雪娇, 肖起榕, 闫平, 陈霄, 李丹, 杜城, 莫琦, 衣永青, 潘蓉, 巩马理 2015 物理学报 **64** 164204]
- [24] Yang W Q, Hou J, Song R, Liu Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084210 (in Chinese) [杨未强, 侯静, 宋锐, 刘泽金 2011 物理学报 **60** 084210]
- [25] Yan P, Wang X J, Huang Y S, Fu C, Sun J Y, Xiao Q R, Li D, Gong M L 2017 *Chin. Phys. B* **26** 336
- [26] Zhu H T, Lou Q H, Zhou J, Qi Y F, Dong J X, Wei Y R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4966 (in Chinese) [朱洪涛, 楼祺洪, 周军, 漆云凤, 董景星, 魏运荣 2008 物理学报 **57** 4966]
- [27] Lapointe M, Chatigny S, Piché M, Cain-Skaff M, Maran J 2009 *Proc. SPIE* San Jose, California, United States, February 19, 2009 71951U
- [28] Fan Y Y, He B, Zhou J, Zheng J T, Liu H K, Wei Y R, Dong J X, Lou Q H 2011 *Opt. Express* **19** 15162

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber*

Wang Ze-Hui¹⁾ Xiao Qi-Rong^{1)†} Wang Xue-Jiao¹⁾ Yi Yong-Qing²⁾ Pang Lu²⁾
Pan Rong²⁾ Huang Yu-Sheng¹⁾ Tian Jia-Ding¹⁾ Li Dan¹⁾ Yan Ping¹⁾ Gong Ma-Li¹⁾

1) (Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (No. 46 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China)

(Received 20 July 2017; revised manuscript received 25 September 2017)

Abstract

In recent years, high power fiber laser has received great attention, leading to wide applications in numerous fields such as industry, biology and relevant research. Nevertheless, the output power of typical diode pumped fiber laser is limited by the thermal effect and brightness of pump source. Owing to the low quantum deficit, the tandem pumping employing ytterbium-doped fiber lasers (YDFs) as the pumping source can effectively reduce the thermal issue and achieve high power output. With the much lower absorption coefficient at 1018 nm than at 976 nm, longer gain fiber is necessary in tandem pumped configuration to sufficiently absorb pump light, which in turn induces a more severe nonlinear effect such as the stimulated Raman scattering, bringing in more challenges in laser configuration design. In this paper, we demonstrate an all-fiber laser under master oscillator power amplifier configuration based on tandem pumping with domestic gain fiber produced by China Electronics Technology Group Corporation No. 46 Research Institute. The diameters of the core and inner cladding of the Yb³⁺ doped double cladding fiber are 25 μm and 250 μm , respectively. The modified chemical vapor deposition method with gas-solution co-doping method is adopted so that the fiber has a more uniform distribution of Yb ions, larger absorption cross section and higher absorption coefficient (0.41 dB/m @1018 nm). In the amplifier stage, a 40-m-long gain fiber is pumped by fourteen 1018 nm fiber lasers with a maximum total output power of 3511 W. A 67.8 W 1080 nm seed is amplified to 3079 W with a corresponding slope efficiency of 85.9%. The beam quality factor M^2 is measured to be 2.14. In addition, no stimulated Raman scattering is found in output spectrum and the 3 dB band width of output laser is measured to be 1.4 nm. To the best of our knowledge, this marks the highest result ever reported for tandem pumping based on domestic gain fiber. Taking stimulated Raman scattering into account, the rate equations are built to calculate the properties and power evolution in the fiber amplifier. The numerical results are in good agreement with the experiment results. Besides, based on heat conduction equation, heat power density in the fiber core is analyzed, showing that the tandem pumping has great advantages in heat management and a huge potential to reach a higher power compared with the method of direct pumping. The theoretical and experimental results show that with ever-maturing fiber manufacturing technology, domestic fiber is capable of withstanding laser power as high as 3 kilowatts. Meanwhile, domestic fiber may achieve a higher output power by increasing the pump power, optimizing the gain fiber length and improving the cooling condition.

Keywords: fiber laser, tandem pumping, domestic fiber, high power

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.67.20171676

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61675114) and the Initiative Scientific Research Program of Tsinghua University (THU), China (Grant No. 20151080709).

† Corresponding author. E-mail: xiaoqirong08@gmail.com