

国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出

王雪娇 肖起榕 闫平 陈霄 李丹 杜城 莫琦 衣永青 潘蓉 巩马理

3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber

Wang Xue-Jiao Xiao Qi-Rong Yan Ping Chen Xiao Li Dan Du Cheng Mo Qi Yi Yong-Qing Pan Rong Gong Ma-Li

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 164204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高速线性光采样用被动锁模光纤激光器重复频率优化

Repetition rate optimization of passively mode-locked fiber laser for high-speed linear optical sampling

物理学报.2015, 64(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134206>

303MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器

A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser

物理学报.2015, 64(11): 114210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114210>

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>

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light

物理学报.2015, 64(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

300 W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W级激光输出*

王雪娇¹⁾ 肖起榕¹⁾ 闫平^{1)†} 陈霄¹⁾ 李丹¹⁾ 杜城²⁾ 莫琦²⁾
衣永青³⁾ 潘蓉³⁾ 巩马理¹⁾

1)(清华大学精密仪器系, 光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

2)(武汉烽火锐光科技有限公司, 武汉 430074)

3)(中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

(2014年12月2日收到; 2015年3月12日收到修改稿)

基于国产光纤构建了直接抽运全光纤化主控振荡器功率放大器结构光纤激光器, 放大级分别采用武汉烽火锐光科技有限公司和中国电子科技集团公司第四十六研究所提供的国产20/400 μm 掺镱双包层光纤作为增益光纤, 通过全国产化放大级实现了3050和3092 W的1080 nm激光输出. 放大级提取效率分别为67.3%和68.2%, 光-光效率分别为63.0%和63.9%. 据可查询资料, 这是公开报道的直接抽运全光纤激光输出的最高水平, 同时由于采用了国产光纤作为放大级增益光纤, 表明国产光纤具备了3 kW级光纤激光器输出能力. 通过国产光纤横截端面以及光纤熔接显微镜图像实验分析知, 光纤制造工艺的不足是导致国产光纤激光器效率低的主要原因. 继续改进光纤工艺, 提升抽运功率, 优化光纤长度, 有望实现更高功率的全国产化光纤激光器输出.

关键词: 高功率光纤激光器, 直接抽运, 国产光纤, 全光纤化

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

DOI: 10.7498/aps.64.164204

1 引言

与其他激光器相比, 光纤激光器由于具有转换效率高、光束质量好以及结构紧凑等优点而被工业、科研、军事和加工等领域广泛应用. 因此, 国内外科研工作者们不断致力于提高光纤激光器输出功率的研究^[1,2], 美国的IPG公司更是将单纤输出最高功率刷新至10 kW, 这也是目前为止单纤输出的最高功率水平^[3].

目前, 高功率光纤激光器的抽运方式主要有两种. 一种是直接抽运, 用975 nm输出半导体激光器(laser diode, LD)作为抽运源对增益光纤直接进行抽运^[4-7]; 另一种是级联抽运, 用高亮度的新波长抽运源(1018或1030 nm等, 通常为直接抽运光纤

激光器)对信号光进行功率放大, 从半导体激光到最终光纤激光输出一共经过了两次转化^[3,8]. 两种方式均是实现高功率光纤激光输出的有效技术途径. 其中, IPG公司的10 kW输出即为利用级联抽运方式所得^[3]. 级联抽运方式由于抽运源(1018或1030 nm等)亮度高, 对抽运耦合方式技术要求较低, 然而, 级联抽运主放大级所采用的掺镱光纤对非975 nm抽运波长的吸收系数较低, 因此其增益光纤需要特别设计合适的掺杂和芯包比等参数. 相比而言, 高功率直接抽运方式对增益纤掺杂和芯包比要求不特殊, 但是由于其抽运源为低亮度半导体抽运光, 因此对增益光纤耐受功率和光纤抽运耦合要求均较高, 使得光纤抽运合束器的制备成为较大难点.

* 国家自然科学基金(批准号: 61307057)和中国博士后科学基金(批准号: 2012M520258, 2013T60109)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pyan@mail.tsinghua.edu.cn

世界各国对直接抽运技术开展了大量研究工作. 2009年, 英国南安普顿大学的光电子研究中心利用分立式结构在 1.1 μm 波段实现了 2.1 kW 的单模激光输出 [4]. 2011年, Nufern 公司成功实现全光纤化直接抽运主控振荡器功率放大器 (MOPA) 结构 1 kW 激光输出 [5]. 2012年, 德国 Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG 公司以自主研发的极大模场光纤构建分立式光纤激光器实现 4 kW 激光输出 [6], 此结果是国外报道的 LD 直接抽运光纤激光器最高输出功率. 2014年, 美国相干公司采用分立结构获得了 3 kW 直接抽运光纤激光输出 [7]. 分立式直接抽运光纤激光器的抽运耦合利用分立透镜耦合方式回避光纤抽运合束器技术难题, 其稳定性和可靠性较差.

在国内高功率光纤激光器发展中, 清华大学 [9]、国防科技大学 [10]、中国科学院上海光学精密机械研究所等 [11] 研究机构做了深入的研究并取得一定突破, 同时在基于国产光纤的高功率光纤激光器实验方面也做出了相关研究. 2006年, 清华大学光子与电子研究中心采用国产光纤利用分立式激光器实现了 714 W 的激光输出 [12]. 2009年, 中国科学院上海光学精密机械研究所基于国产掺镱双包层光纤构建分立式结构实现 1.75 kW 输出, 斜效率为 76% [13]. 2012年, 国防科学技术大学光电科学与工程学院成功实现了国产全光纤化激光器 525 W 输出 [14].

综上所述, 基于国产光纤构建全光纤化直接抽运光纤激光器实现高功率激光输出存在挑战, 这是因为其在攻克关键技术存在三个难点: 一是受到

国产光纤自身结构的限制, 二是受到光纤抽运合束器的抽运能力限制, 三是受到熔接工艺的限制. 而熔接工艺作为全光纤化技术中需攻克难点的依托, 起着至关重要的作用, 同时其熔接点的质量严重影响着光纤激光器的光束质量和效率等多项技术指标, 甚至限制了激光器在实际上能实现的最高功率. 我们课题组近年来在高功率直接抽运光纤激光器方面做了大量研究, 在基础理论和工程技术 (如抽运合束器自主制备和光纤熔接) 上均积累了丰富的经验, 将其应用于国产光纤的全光纤化直接抽运高功率实验中, 得到了有效的突破. 而在国产光纤高功率应用上的有效突破将会有力地促进高功率光纤激光器的研制和推广应用, 并大幅降低成本.

本文分别采用武汉烽火锐光科技有限公司和中国电子科技集团公司第四十六研究所 (简称 46 所) 提供的国产 20/400 μm 掺镱双包层光纤 (Ytterbium doped double-clad fiber, YDCF) 作为放大级增益光纤, 构建了直接抽运全光纤化光纤激光器, 分别获得 3050 W 和 3092 W 的 1080 nm 高功率激光输出, 成功实现了基于国产光纤的直接抽运全光纤化光纤激光器 3 kW 级单纤输出.

2 实验装置

搭建的 MOPA 结构全光纤化光纤激光器结构如图 1 所示, 包括一个种子源和一个全国产化光纤放大级, 各器件之间采用光纤熔接的方式连接, 形成全光纤结构. 整个系统采用间接水冷方式进行散热.

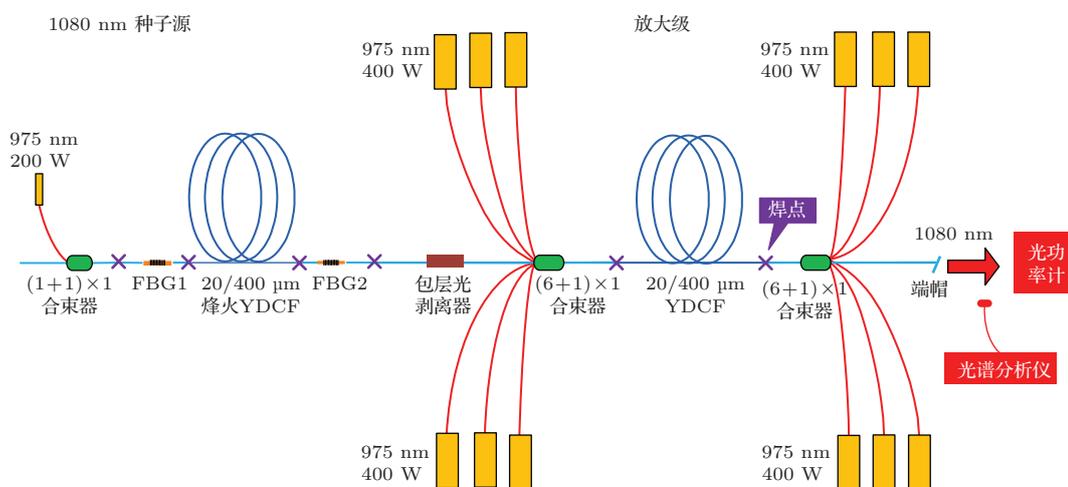


图1 (网刊彩色) MOPA 结构全光纤化光纤激光器原理图

Fig. 1. (color online) Experimental setup of the MOPA configuration all-fiber laser.

种子源由一组光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG), LD 抽运源和 YDCF 组成. FBG 中心波长为 1080 nm, 反射率分别为 98%, 10%. LD 抽运源为 200 W 的 975 nm 半导体激光器, 对振荡器进行端面抽运. 种子源的增益光纤为武汉烽火通信科技有限公司提供的国产 20/400 μm YDCF, 纤芯直径为 20 μm , 内包层直径为 400 μm , 纤芯和包层的数值孔径分别为 0.075 和 0.48. 增益纤在 975 nm 处的吸收系数为 1.25 dB/m, 利用此值对增益纤长度进行了合理优化设计. 在种子振荡器末端续接一个包层光剥离器, 滤除残余包层激光. 经过包层剥离器之后的种子光通过 $(6+1) \times 1$ 合束器注入放大级中.

由于在高功率抽运时, 双向抽运使得抽运功率更为均匀, 整个光纤上热负载较低^[15], 因此放大级采用了双向抽运方式. 前后向均由 6 个输出功率为 400 W 的 975 nm 半导体激光器构成. 前向的 6 个 LD 和种子光经由 $(6+1) \times 1$ 合束器注入到放大级的国产增益纤中. 后向的 6 个 LD 以同样的方式经由 $(6+1) \times 1$ 合束器对称地注入到放大级的国产增益纤中. 放大级分别使用两种国产增益纤进行实验: 实验一为武汉烽火锐光科技有限公司的 YDCF, 采用光纤参数和种子增益纤参数相同; 实验二为 46 所的 YDCF, 纤芯直径为 20 μm , 内包层直径为 400 μm , 纤芯和包层的数值孔径分别为 0.06 和 0.48, 增益纤在 975 nm 处吸收系数为 1.70 dB/m. 两个实验中均利用增益纤在 975 nm 处的吸收系数对放大级增益纤长度进行优化选取. 其中需注意的是放大级采用双向抽运方式, 且所用 LD 均为非锁波长抽运源, 为了在电流加载过程中抽运吸收均充分, 放大级增益纤要在通常抽运吸收充分的基础上适当增长. 后向 $(6+1) \times 1$ 合束器的信号臂作为整个 MOPA 系统的输出端, 在其末端制作端帽, 防止高功率下输出端的损坏, 且进行 8° 切斜角处理, 避免反射光对元件的损伤. 整个放大级均使用国产光纤元件组成, 合束器以及包层光剥离器均为自主研发.

3 结果与分析

针对搭建的 MOPA 结构光纤激光器, 首先对种子进行了测试. 当注入约 145 W 抽运功率时, 得到种子输出纯信号光为 91 W, 光光效率为 62.8%, 后续的放大级实验均在种子输出为 91 W 的条件下

进行.

在放大级采用武汉烽火锐光科技有限公司 YDCF 实现 3050 W 的激光输出中, 得到放大级提取效率特性曲线如图 2(a) 所示. 当放大级增益纤注入约 4400 W 抽运光时, 获得 3050 W 的 1080 nm 激光输出, 放大级提取效率为 67.3%, 光-光效率为 63.0%. 图 2(b) 所示为该情形下 MOPA 结构光纤激光器输出光谱图 (内嵌低功率下光束质量图). 从图中可以看出, 种子输出 91 W 时光谱中心波长为 1080.0 nm, 光谱带宽为 1.1 nm, 而放大器输出 3050 W 时光谱中心波长为 1080.2 nm, 光谱带宽为 2.9 nm, 种子光经过放大级后光谱发生展宽. 另外观察放大器的输出光谱发现, 在 975 nm 波段并未有抽运光光谱存在, 即输出光中无残余抽运. 但是在中心波长约为 1130.0 nm 附近出现了微弱的非线性效应——受激拉曼散射光, 在线性坐标下分别对输出激光和拉曼光进行积分计算, 得拉曼光功率占总输出光功率的比例仅为 4.9%, 因此本实验中受激

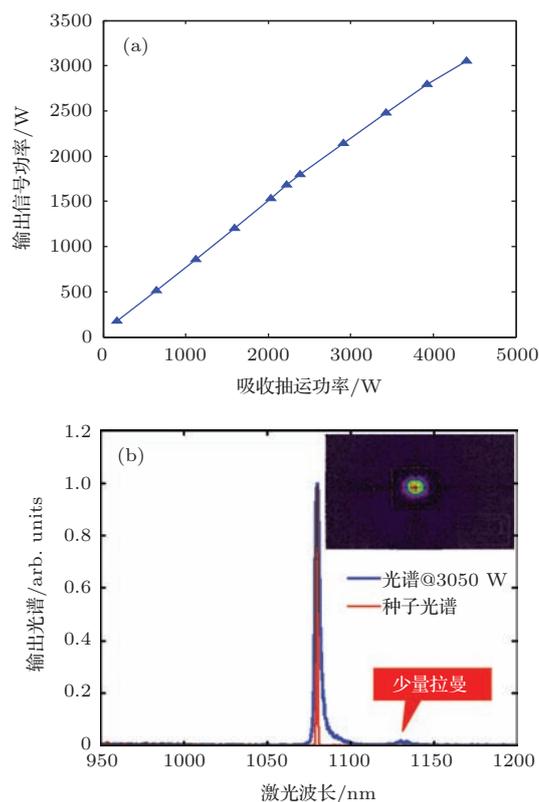


图2 (网刊彩色) 放大级采用烽火增益纤时的输出特性 (a) 放大级提取效率特性曲线; (b) 输出光谱 (内插图为低功率光束质量图)

Fig. 2. (color online) Output properties of the amplifier employing the gain fiber manufactured by fiber home: (a) the extraction efficiency; (b) spectra (beam quality inset).

拉曼散射光对输出激光的影响不大. 下一步实验中, 可以优化增益光纤长度, 进一步降低受激拉曼散射的影响, 提升激光输出功率. 另外采用光束质量分析仪对激光器在百瓦级低功率下的光束质量进行了初步测量, 光斑如图 2(b) 中的内插图所示, 初步判定其 $M^2 < 2$.

在放大级采用 46 所的 YDCF 实现 3092 W 输出的初步实验中, 得到放大级提取效率特性曲线如图 3 所示. 当放大级增益纤注入约 4400 W 抽运光时, 获得 3092 W 的 1080 nm 激光输出, 放大级提取效率为 68.2%, 光-光效率为 63.9%. 由此两种具有代表性的国产光纤均通过直接抽运全光纤化结构成功实现 3 kW 级激光输出.

对比国内外高功率光纤激光器的实验结果, 本实验中的全光纤化 MOPA 结构光纤激光器效率均偏低. 分析可能有以下原因: 国产光纤在制作工艺上仍存在一定不足, 如光纤纤芯原材料纯度不够, 使得背景损耗增加, 导致光纤温度增加, 造成增益光纤对抽运光的吸收系数降低^[16], 影响激光功率输出水平; 光纤纤芯折射率分布不均, 导致纤芯传输的模式发生泄漏, 影响信号光的传输; 光纤自身结构有缺陷, 如图 4 中所示, 国产增益纤八边形包层较不规则, 增益纤和传能纤的芯/包偏心分别为 5.85 和 8.62 μm , 各自纤芯不圆度分别为 10.25% 和 2.0%, 与国外同类光纤参数对比, 国产光纤自身结构缺陷较为严重, 这使得主焊点熔接产生明显的轴向偏差, 如图 5 所示, 熔接偏差损耗造成抽运光在此处发生损耗, 导致实际进入放大级的抽运光功率减少, 影响激光器效率.

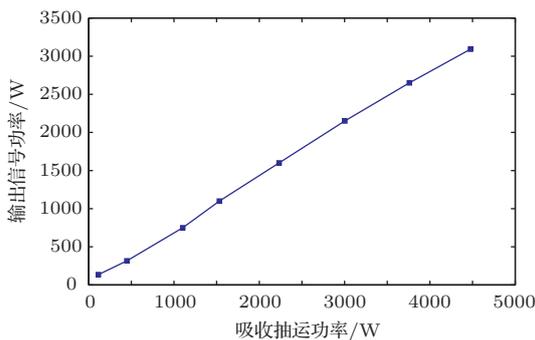


图 3 (网刊彩色) 放大级采用 46 所增益纤时的提取效率特性曲线

Fig. 3. (color online) The extraction efficiency curve of the amplifier employing the gain fiber manufactured by No. 46 Research Institute.

实验难点主要体现在放大级增益纤的散热处理上. 结合实际实验条件, 利用基于速率方程构建的仿真模型^[17,18], 对双向抽运下每 100 mm 吸收抽

运功率和每 100 mm 产生热功率随着光纤长度的变化做了理论分析, 如图 6 所示. 可以看出, 在光纤的首尾两端, 曲线切线斜率最大, 即靠近主焊点之后单位长度内吸收抽运功率和产生热功率最大, 造成此处温度最高. 同时结合上文分析, 熔接偏差损耗使得抽运光和信号光均在此处发生泄漏. 例如利用光束传输方法对此情形下的轴向偏差进行模式仿真, 则可知轴向偏差导致纤芯中激光的理论损耗值约为 0.30 dB. 而在发生泄漏的光束中, 部分光被焊点处以及焊点后附近的光纤吸收, 使得主焊点后增益纤热积累更为严重, 因此此处的热处理是高功率输出成功与否的关键环节. 实验中为了更好地进行散热, 采用间接水冷方式, 将放大级增益纤盘置于热沉板上, 设定热沉板温度为 18 $^{\circ}\text{C}$, 得到了较好的实验结果.

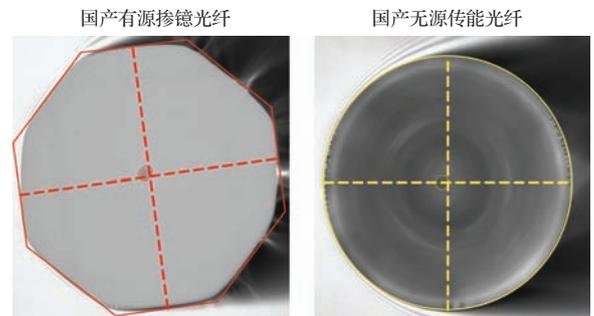


图 4 (网刊彩色) 国产有源掺镱光纤 (红线为纤芯外轮廓线和标准八边形包层轮廓线) 和国产无源传能光纤 (黄线为纤芯外轮廓线和标准圆形包层轮廓线) 横截面显微镜图像

Fig. 4. (color online) The microscopic images of cross section of the homemade active Yb-doped fiber and the passive fiber. The core outline and normal cladding outline of the active fiber is marked in red, while that of the passive fiber is marked in yellow.

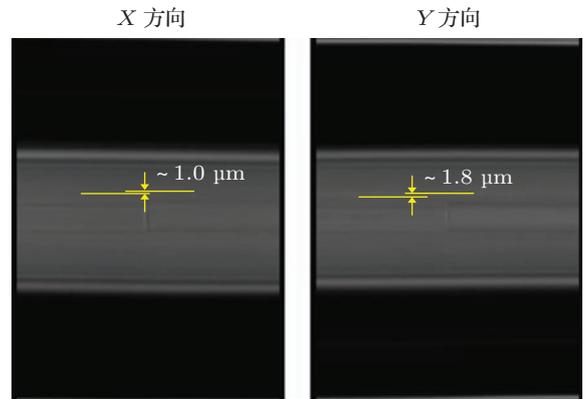


图 5 (网刊彩色) 国产有源掺镱光纤和无源传能光纤熔接显微镜图像

Fig. 5. (color online) The microscopic images of cross section of the splicing fuse of the homemade active Yb-doped fiber and the passive fiber.

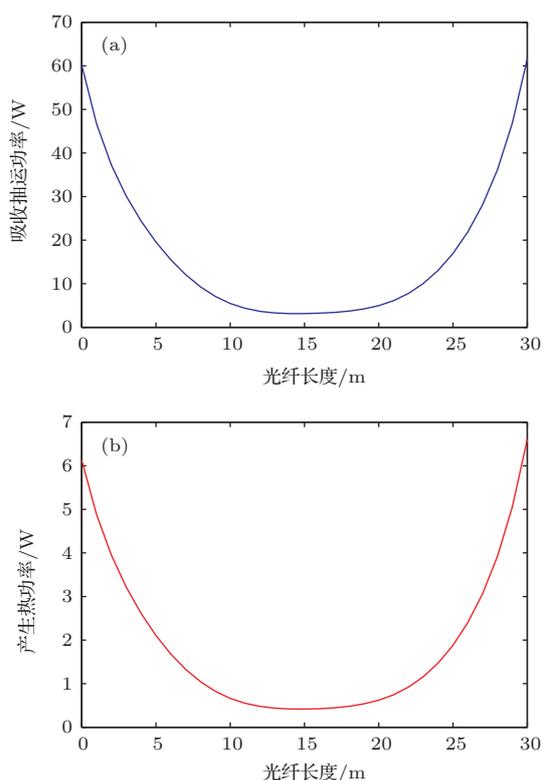


图6 (网刊彩色) 双向抽运下 (a) 每 100 mm 吸收抽运功率和 (b) 每 100 mm 产生热功率随着光纤长度的变化

Fig. 6. (color online) In double-end-pumped case, (a) the absorbed pump power and (b) the thermal power generated every 100 mm as a function of the length of fiber.

本文采用两种不同的国产光纤, 通过直接抽运全光纤化结构成功实现了 3 kW 单纤稳定输出, 并未发现光暗化现象, 表明国产光纤具备了 3 kW 级光纤激光器输出的能力. 由于实验条件所限, 未进行更长时间的光暗化测试, 这也是后续工作努力的方向. 为了提高国产光纤激光器的效率, 实现更高功率的全国产化光纤激光器输出, 一方面希望继续改进光纤工艺, 如研制高精度预制棒、外形规则、掺杂均匀, 确保涂覆层制作材料质量, 加强抗热性和均匀性等; 另一方面在实验条件中提升抽运功率, 优化光纤长度, 降低光纤熔接损耗.

4 结 论

高功率光纤激光器由于其优越性受到国内外科研工作者的极大关注. 本文构建了直接抽运全光纤化 MOPA 结构激光器, 分别采用武汉烽火锐光科技有限公司和中国电子科技集团公司第四十六研究所提供的国产 20/400 μm YDCF 作为放大级增益主光纤, 通过全国产化放大级实现了 3050

和 3092 W 的 1080 nm 高功率激光输出, 放大级提取效率分别为 67.3% 和 68.2%, 光-光效率分别为 63.0% 和 63.9%. 据可查询资料, 这是公开报道的直接抽运全光纤激光输出的最高水平. 同时我们采用国产光纤作为放大级增益主光纤, 结果表明国产光纤具备了 3 kW 级光纤激光器输出能力. 结合国产光纤横截面以及光纤熔接显微镜图像实验表明, 光纤制造工艺上的不足是导致激光器效率低的主要原因. 继续改进光纤工艺, 提升抽运功率, 优化光纤长度, 有望实现更高功率的全国产化光纤激光器输出.

参考文献

- [1] Cesar J, Jens L, Andreas T 2013 *Nat. Photon.* **7** 861
- [2] Tao R M, Zhou P, Wang X L, Si L, Liu Z J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085202 (in Chinese) [陶汝茂, 周朴, 王小林, 司磊, 刘泽金 2014 物理学报 **63** 085202]
- [3] Stiles E 2009 *Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers*
- [4] Jeong Y C, Boyland A J, Sahu J K, Chung S H, Nilsson J, Payne D N 2009 *J. Opt. Soc. Korea* **13** 416
- [5] Samson B, Carter A, Tankala K 2011 *Nat. Photon.* **5** 466
- [6] Langner A, Sucha M, Schötza G, Justb F, Leichb M, Schwuchowb A, Grimm St, Zimerc H, Kozakc M, Wedelc B, Rehmann G, Bachertd C, Krause V 2012 *Proc. SPIE* **8237** 82370F
- [7] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, Petit V, Pooler E S 2014 *Proc. SPIE* **8961** 89610
- [8] Wirth C, Schmidt O, Kliner A, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A 2011 *Opt. Lett.* **36** 3061
- [9] Yan P, Xiao Q R, Fu C, Wang Y P, Gong M L 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0416001 (in Chinese) [闫平, 肖起榕, 付晨, 王亚平, 巩马理 2012 中国激光 **39** 0416001]
- [10] Liu Z J, Leng J Y, Guo S F, Wang W L, Huang L J, Cao J Q, Si L, Xu X J, Chen J B 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 0908003 (in Chinese) [刘泽金, 冷进勇, 郭少锋, 王文亮, 黄良金, 曹润秋, 司磊, 许晓军, 陈金宝 2013 中国激光 **40** 0908003]
- [11] 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
- [12] Li C, Yan P, Chen G, Gong M L, Yuan Y Y 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 738 (in Chinese) [李晨, 闫平, 陈刚, 巩马理, 袁艳阳 2006 中国激光 **33** 738]
- [13] He B, Zhou J, Lou Q H, Xue Y H, Li Z, Wang W, Dong J X, Wei Y R, Chen W B 2010 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **52** 1668
- [14] Wang X L, Gong Z Q, Zhou P, Guo S F, Si L, Xu X J, Chen J B 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0408007 (in Chinese) [王小林, 龚智群, 周朴, 郭少锋, 司磊, 许晓军, 陈金宝 2012 中国激光 **39** 0408007]

- [15] Yuan Y Y 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [袁艳阳 2008 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [16] Xiang P, Liang D 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 127
- [17] Kelson I, Hardy A A1998 *IEEE J. Quantum Elect.* **34** 1570
- [18] Gong M L, Yuan Y Y, Li C, Yan P, Zhang H T, Liao S Y 2007 *Opt. Express* **15** 3236

3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber*

Wang Xue-Jiao¹⁾ Xiao Qi-Rong¹⁾ Yan Ping^{1)†} Chen Xiao¹⁾ Li Dan¹⁾ Du Cheng²⁾
Mo Qi²⁾ Yi Yong-Qing³⁾ Pan Rong³⁾ Gong Ma-Li¹⁾

1) (*Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Wuhan Fiber Home Technologies Group, Wuhan 430074, China*)

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

(Received 2 December 2014; revised manuscript received 12 March 2015)

Abstract

In this paper we present an all-fiber directly pumped fiber laser in master oscillator power amplifier configuration based on domestically manufactured fibers. In the amplifier stage of the laser, the gain fibers adopt the 20/400 μm Yb-doped double cladding fibers manufactured separately by Wuhan Fiber Home Technologies Group and China Electronics Technology Group Corporation No. 46 Research Institute in two individual experiments. Via this homemade amplifier stage, the system achieves a 1080 nm fiber laser with output powers of 3050 W and 3092 W respectively with two types of fibers. When the gain fiber of the amplifier adopts the YDF manufactured by Wuhan Fiber Home Technologies Group, the corresponding extraction efficiency and the optical-to-optical efficiency reach 67.3% and 63.0% respectively. No residual pump laser is found in the spectrum of output laser, and the beam quality is measured to be $M^2 < 2$. Similarly, when the gain fiber of the amplifier adopts the YDF manufactured by China Electronics Technology Group Corporation No. 46 Research Institute, the corresponding extraction efficiency and the optical-to-optical efficiency reach 68.2% and 63.9% respectively. To the best of our knowledge, this is the best result ever reported for directly pumped all-fiber laser. Meanwhile, as we use the domestically manufactured fiber as the gain fiber in the amplifier stage, the result verifies the usage of homemade active fibers in 3-kilowatt level fiber laser. By combining the results of the high power fiber laser, the low efficiency of domestic fiber laser in our experiment might be explained to be due to defects in fiber manufacturing process, the inhomogeneous refractive index of the core, structural flaw of the homemade fiber observed by the microscopic images of the cross section and the splicing fuse of homemade fibers. The main difficulty of these two experiments lies in the heat dissipation of the gain fiber in the amplifier stage. Also, due to the restriction of experimental condition, photodarkening test is unable to run for a longer period of time, which is the focus of our further work. Therefore, measures such as refining fiber manufacturing techniques, increasing pump power and optimizing the length of fiber are suggested to be taken in order to obtain a higher output power from homemade fiber laser.

Keywords: high power fiber laser, direct pumping, domestic fibers, all-fiber

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

DOI: 10.7498/aps.64.164204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61307057) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2012M520258, 2013T60109).

† Corresponding author. E-mail: pyan@mail.tsinghua.edu.cn