

文章编号: 1001-3806(2017)03-0337-05

大模场双包层光纤熔接的功率对准技术研究

李雪¹, 韩志刚², 尹路¹, 孟令强¹, 朱日宏^{2*}

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学 先进固体激光技术工信部重点实验室, 南京 210094)

摘要: 为了提高高功率光纤激光器中大模场双包层光纤的熔接质量, 采用 NUFERN 20/400 μm 双包层光纤搭建了光功率对准系统, 对大模场双包层光纤中存在包层光以及纤芯中只有基模和存在高阶模时光纤径向偏移与耦合效率的关系进行了理论分析和实验验证。结果表明, 大模场双包层光纤中包层光和纤芯中高阶模的存在使耦合效率对径向偏移变化的敏感度降低, 滤除包层光和高阶模后耦合效率随光纤径向偏移量呈高斯型变化; 使用光功率对准系统搭建千瓦级双端抽运激光系统, 最大输出功率约 1170W, 光光转换效率约 73%, 光束质量约 1.22, 实现了千瓦级准单模输出。光功率对准技术能够实现待熔光纤的精确对准, 对高功率光纤激光器输出性能的提升有重要意义。

关键词: 光纤光学; 高功率光纤激光器; 光纤熔接; 光功率对准技术; 大模场双包层光纤

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.03.007

Study on optical power alignment technique during the splice of large mode area double-cladding fiber

LI Xue¹, HAN Zhigang², YIN Lu¹, MENG Lingqiang¹, ZHU Rihong²

(1. Electronic Engineering and Optoelectronic Technology Institute, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Advanced Solid-state Laser Technology of Ministry of Industry and Information, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the splicing quality of large mode area double-cladding fiber, an optical power alignment system was designed by using NUFERN 20/400 μm double-cladding fiber. The cladding light in the cladding layer and the basic-mode light in the core were verified. The relationship between core dislocation and coupling efficiency was analyzed theoretically and verified experimentally. The existence of the cladding light or the higher-order mode in the core reduced the sensitivity of coupling efficiency to core dislocation. After stripping the cladding light and the higher-order mode, the coupling efficiency varies with core dislocation as Gaussian shape. A double-ended pumping fiber laser system with kW level output power was built by using the optical power alignment system, with the maximum output power of 1170W, optical-to-optical conversion efficiency of about 73% and beam quality factor of around 1.22. Quasi-single-mode output of kW level was gotten. The results show that accurate alignment of double-cladding fiber can be achieved with optical power alignment technique. The study is important for the improvement of output performance of high power fiber lasers.

Key words: fiber optics; high power fiber laser; fiber splice; optical power alignment technique; large mode area double-cladding fiber

引言

高功率光纤激光器是集结了包层抽运技术、双包层光纤制作技术和光纤光栅技术于一体的新型激光器。它因光束质量好、阈值低、散热性能好、结构紧凑、

功率消耗低等优点被广泛应用于科研、工业加工、印刷、打标、医疗以及军事领域^[1-5]。全光纤结构的高功率激光器主要由抽运合束器、光纤光栅、增益光纤等组成, 要将上述光纤器件及增益光纤有效地连接起来, 光纤熔接必不可少。熔接点的质量直接影响光纤激光器的输出性能, 质量差的熔接点会产生几瓦甚至几十瓦的功率损耗, 一方面降低了激光输出效率, 增加了系统的热处理负担; 另一方面, 质量差的熔接会激发出激光器中的高阶模, 影响激光的光束质量。

与传统光纤激光器不同, 高功率光纤激光器中的光纤器件及增益光纤大多采用大模场双包层光纤, 该

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目 (SBE201500157)

作者简介: 李雪 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhurihong@njust.edu.cn

收稿日期: 2016-04-06; 收到修改稿日期: 2016-06-16

种光纤不仅纤芯可以导光,包层也可导光。为了降低纤芯中传输激光的功率密度,大模场光纤的模场直径比普通单模光纤的模场直径大,且支持多个模式的激光传输。此外,为了提高掺杂离子的吸收效率,作为增益光纤使用时,双包层光纤的内包层通常不使用圆对称结构。因此,双包层光纤的熔接中,尤其是圆对称结构的双包层传能光纤和非圆对称结构的增益光纤熔接中,采用商用熔接机中基于包层影像的轮廓对准技术,很容易出现熔接纤芯错位,影响激光器的输出效率及光束质量^[6-8]。除了基于包层影像的轮廓对准技术外,光功率技术也是常用的光纤熔接对准技术^[9]。该技术测量待熔光纤在不同径向偏移情况下的耦合效率变化,根据测量结果的反馈控制熔接机的马达,最终实现光纤的高精度对准。传统的光功率对准技术大多针对单模或多模光纤的熔接,针对大模场双包层光纤的熔接对准技术并不多见。

本文中研究大模场双包层光纤熔接的功率对准技术,理论分析双包层光纤中只有基模传输和存在高阶模情况下光纤径向偏移与耦合效率的关系,搭建大模场双包层光纤的光功率对准系统,通过抑制包层光和高阶模对光束的影响提高光纤对准精度。基于光功率对准技术构建全光纤结构的光纤激光器系统,实现千瓦级光纤激光的准单模输出。

1 原 理

大模场双包层光纤主要由纤芯、内包层和外包层构成,其中纤芯的折射率最大,外包层的折射率最小。它与普通单模光纤的主要不同之处是其存在两个包层,光不仅可以在纤芯中传输,也可以在内包层中传输,而且在纤芯内不止可以传播一个模式^[10-11]。为了实现双包层光纤的熔接对准,构建如图 1 所示的熔接对准系统。光源由单模光纤输出,经过模场匹配器(mode field adaptor, MFA)后进入第 1 根待熔光纤(fiber-1),为了抑制 MFA 和待熔光纤的熔接点处产生的高阶模光 and 包层光的影响,光纤经盘绕并有包层光功率剥离器(cladding power stripper, CPS)剥离包层光。光束由第 1 根待熔光纤(fiber-1)耦合进第 2 根待熔光纤(fiber-2)。同样地,通过光纤盘绕和包层光剥离后,

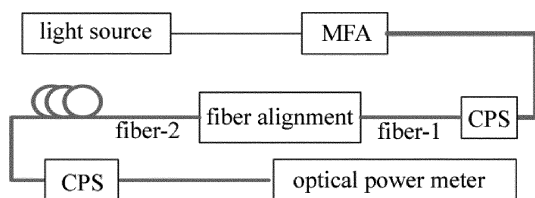


Fig. 1 Optical power alignment system for large-mode-field double-cladding fiber

光束输出到光功率计。

光纤对准时,光纤的径向偏移 d 、端面间隙 z 和光纤角度 θ (如图 2 所示, n_1 和 n_2 分别为纤芯和内包层折射率)都会造成激光传输场的变化,在纤芯中激发出高阶模,影响熔接点处的耦合效率。由于光纤熔接时,光纤角度能够控制到 0.1° 以下,光纤端面角度能控制到 0.3° 以内,光纤端面间距可以自己设定,所以本文中主要对大模场双包层光纤纤芯中基模传输和多模传输情况下的光纤熔接对准时光纤的径向偏移与光纤耦合效率的关系进行研究。

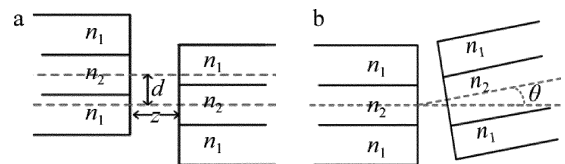


Fig. 2 Influential factors on fiber splicing

a—core dislocation d and end-face interval z b—fiber angle

1.1 纤芯中只有基模传输

设激光在双包层光纤的纤芯中传输,且为基模。则对两根参量完全相同的大模场双包层光纤在光纤熔接机中进行熔接,两个待熔端面均放在空气中($n = 1$),不考虑光纤端面反射损耗,根据经典波动理论,光纤熔接对准时从 fiber-1 到 fiber-2 的光功率耦合效率为^[12-13]:

$$T = \left| \int E_i E_r^* dS \right|^2 \quad (1)$$

式中, E_i 为接收光纤端面的模式场分布, E_r 为发射光纤端面的模式场分布,上标 * 表示共轭,积分区域 S 为两根光纤的重叠面积。光纤纤芯中传播的基模的光场分布可近似为高斯分布,则对准处耦光纤耦合效率为:

$$T = M \exp(-Nd^2) \quad (2)$$

式中, d 为光纤的径向偏移量, M 和 N 为常数。由(2)式可知,耦合效率与光纤径向偏移量为高斯型关系,在高斯曲线对称轴处的耦合效率最大。

1.2 纤芯中有高阶模传输

纤芯中存在高阶模的情况下,在连接点处要对两根光纤的光功率损耗进行精确的估计和分析比较困难,因为光功率损耗取决于光纤中模式间的光功率分配,假设光纤中所有模式被同等地激励,此时光纤的光束充满了整个光纤的数值孔径,可以采用几何方法进行计算分析^[14]。光功率耦合效率为:

$$T = A_0/A \quad (3)$$

式中, A 为发射光纤整个纤芯的数值孔径范围,是以 $r_1 = a + z \tan \theta_c$ 为半径的圆的面积; A_0 是以 $r_2 = a$ 为半径的圆与以 r_1 为半径的圆的重叠部分面积; a 为纤芯半径; θ_c 为双包层光纤纤芯数值孔径角; z 为常数。

随着光纤径向偏移量 d 的变化,耦合效率的计算

存在如图 3 所示两种情况,则光纤对准处光功率耦合效率为:

$$T = \begin{cases} r_2^2/r_1^2, & (0 \leq |d| < r_1 - r_2) \\ (\alpha r_1^2 + \beta r_2^2 - |d|r_1 \sin\alpha)/(\pi r_1^2), & (r_1 - r_2 \leq |d| \leq r_1 + r_2) \end{cases} \quad (4)$$

为了方便计算,设 α 和 β 是如图 3 所示中两个圆心与两个圆交点形成四边形的上下半角,则:

$$\begin{cases} \cos\alpha = (r_1^2 + d^2 - r_2^2)/(2|d|r_1) \\ \cos\beta = (r_2^2 + d^2 - r_1^2)/(2|d|r_2) \end{cases} \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可知,纤芯中存在高阶模时,当径向偏移小于 r_1 与 r_2 的差值时,耦合效率不会变化,降低了光纤的径向对准精度。

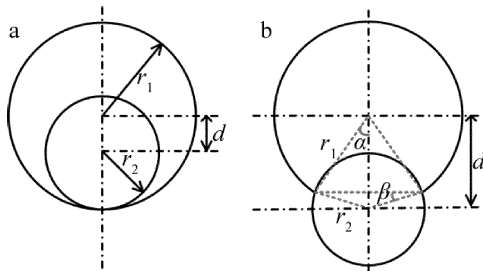


Fig. 3 Power distribution in fiber cross-section
a— $0 \leq |d| < r_1 - r_2$ b— $r_1 - r_2 \leq |d| \leq r_1 + r_2$

1.3 仿真计算

仿真纤芯直径 $20\mu\text{m}$ 、纤芯数值孔径 (numerical aperture, NA) 为 0.065;包层直径 $400\mu\text{m}$ 、内包层 NA 为 0.46 的双包层光纤对准时不同径向偏移下的耦合效率。设光纤中传播波长 $\lambda = 1.064\mu\text{m}$ 的光,纤芯中分别传输基模和高阶模时,光纤径向偏移量与光纤耦合效率关系如图 4 所示。基模 (single mode, SM) 传输时,径向偏移量与光纤耦合效率关系曲线为高斯线型,在其中心轴处的耦合效率最高;若纤芯中存在高阶模 (higher-mode, HM),光纤耦合效率在少量径向偏移时保持不变,峰值为一段直线,之后呈抛物线型变化;另外,从两条曲线的下降速度可以看出,高阶模存在时,光纤耦合效率对径向偏移量变化反应没有单模传输时敏感。

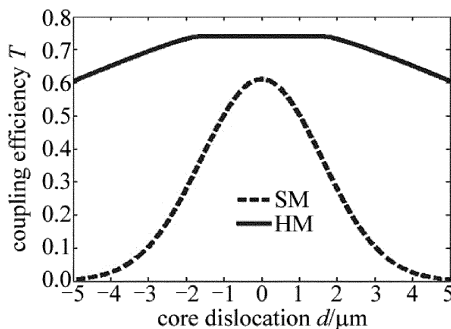


Fig. 4 Relationship between core dislocation and fiber coupling efficiency of SM and HM

2 实验与讨论

本文中采用纤芯直径为 $20\mu\text{m}$ 、纤芯 NA 为 0.065;包层直径为 $400\mu\text{m}$ 、内包层 NA 为 0.46 的双包层光纤 (Nufern, LMA-GDF-20/400-M, 以下简称为 Nufern 20/400 光纤) 搭建如图 1 所示光功率探测对准系统。为了抑制光纤对准过程中由端面反射光的干涉所引起的功率波动,采用中心波长为 1064nm 、半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 46nm 的放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源 (上海瀚宇, 型号 VASS-1060-B-13-GF, 输出功率稳定性优于 1%, 输出光纤为康宁 HI-1060, 由 $L_{\text{max}} = \lambda^2/\Delta\lambda$ 可知, 该光源的相干长度为 $24.62\mu\text{m}$ ^[15]) 作为系统光源, 由于 1064nm 的光在直径 $20\mu\text{m}$ 的纤芯中存在两个模式 (LP_{01} 模和 LP_{11} 模) 且光纤的内包层也支持 1064nm 波段光的传输, 若 HI-1060 光纤直接与双包层光纤熔接, 在双包层光纤中会激发 LP_{11} 模及包层模。测试系统中, 光源经过 HI-1060 光纤与 NUFERN 20/400 μm 光纤的模场匹配器 (MFA, 深圳朗光) 来抑制直接熔接时光纤模式不匹配产生的高阶模。为了抑制双包层光纤中包层光对系统输出功率的影响, 光纤对准处和光纤输出终端前的一段光纤都被剥除涂覆层, 并以折射率为 1.56 ($@\lambda = 589\text{nm}$) 的紫外固化胶重新涂覆。90% 以上的包层光将从这两段重新涂覆区域漏出, 实现包层光 CPS 的功能。需要对准的两根 20/400 μm 光纤 (图 1 中的 fiber-1 和 fiber-2) 被固定在藤仓 100P + 光纤熔接机上, 通过熔接机的精确马达控制功能调整光纤位置。

为了尽量减小光纤切割角度和摆放角度对功率对准测量结果的影响, 对准光纤的切割角度均控制在 0.2° 以内, 摆放角度控制在 0.1° 以内。实验中手动调节熔接机横向马达进行光纤精确对准。在未剥离包层光、剥离包层光以不同盘绕直径滤除高阶模的条件下, 每隔 $0.1\mu\text{m}$ 调节横向马达控制光纤的相对径向偏移量, 记录系统的输出功率 P 。图 1 中 fiber-1 的输出功率为 P_0 , 则对准处耦合效率 $T = P/P_0$ 。不同径向偏移量下的耦合效率变化规律如图 5 中上端曲线所示。可以看出, 若光纤没有剥离包层光, 调节光纤径向偏移量时, 耦合效率基本不变, 说明当双包层光纤的内包层起到波导作用时光纤的少量相对偏移并不影响对准系统的耦合效率, 无法指导光纤的精确对准; 当光纤以 140mm 直径盘绕光纤并剥离包层光时, 耦合效率随径向偏移量的变化如图 5 中的虚线所示, 耦合效率随偏移量呈抛物线变化, 具有明显的极值位置。

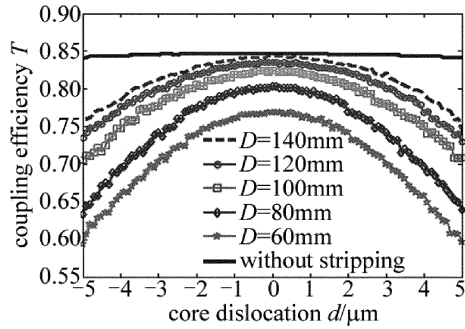


Fig. 5 Relationship between core dislocation and fiber coupling efficiency with different coiling diameter D

为了比较纤芯中高阶模对系统耦合效率的影响,在包层光功率剥离器前以不同直径对光纤进行盘绕,当光纤盘绕直径 D 分别为 120mm, 100mm, 80mm 和 60mm 时,耦合效率随径向偏移量的变化如图 5 中下方 4 条曲线所示。图 6 为图 5 中径向偏移量为 $2\mu\text{m}$ 时耦合效率随光纤盘绕直径的变化曲线。随着光纤盘绕直径的减小,相同径向偏移条件下的耦合效率减小,说明随着光纤盘绕直径的减小,纤芯中的高阶模不断地耦合进入包层中,被后面的包层光功率剥离器剥除,光功率以包层光的形式损耗掉,造成耦合效率降低。盘绕直径减小到 50mm 时,耦合效率急速下降,可认为此时已经产生基模损耗。

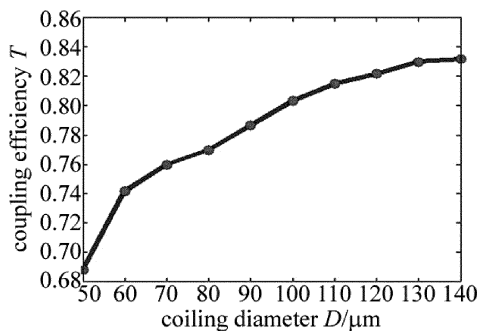


Fig. 6 Relationship between coiling diameter and coupling efficiency with core dislocation of $2\mu\text{m}$

以抛物线拟合不同光纤盘绕直径下耦合效率随径向偏移的变化关系,抛物线的二次项系数绝对值随光纤盘绕直径的变化如图 7 所示。光纤盘绕直径由

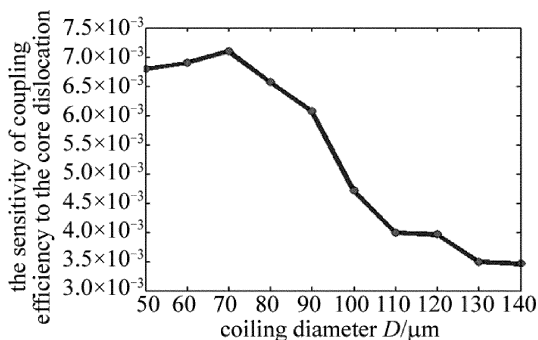


Fig. 7 Relationship between sensitivity of coupling efficiency to core dislocation and coiling diameter

140mm 减小到 70mm 时,拟合抛物线的二次项系数绝对值增大,也即耦合效率对光纤径向偏移的敏感度增加;盘绕直径达到 70mm 时,耦合效率对光纤径向偏移的敏感度最大;盘绕直径由 70mm 降到 50mm 时,耦合效率对光纤径向偏移的敏感度仅略微减小。可以认为,纤芯中若存在大量的高阶模,会降低耦合效率对径向偏移的敏感程度,降低光纤的对准精度,当纤芯中的基模比例远远高于高阶模时,耦合效率对径向偏移的敏感度较高,有利于熔接光纤的对准。

在使用光功率探测对准系统对大模场双包层光纤进行熔接对准,若没有滤除包层光,则随着径向偏移的改变耦合基本不变,无法进行光功率对准;滤除包层光后,光纤的径向偏移量与光纤的耦合效率近似为抛物线型关系,在抛物线的对称轴处即耦合效率最大时,两根光纤完全对准,此时熔接的熔接点的质量最优。然而由于高阶模的存在,故耦合效率对径向偏移的敏感程度有影响且极其不稳定,熔接过程中如光纤的颤动等因素都会造成输出功率不稳定,影响对准结果,所以在熔接对准系统中,要尽量滤除高阶模,提高对准精度。

3 应用

基于光功率对准技术搭建了如图 8 所示的千瓦级双端抽运全光纤激光器系统。系统中的抽运合束器、高反光栅、低反光栅、包层光功率剥离器及输出终端 (quartz block high power, QBH) 采用直径 $20\mu\text{m}$ 、包层 $400\mu\text{m}$ 的大模场双包层无源光纤 (Nufern LMA-GDF 20/400-M),其纤芯和内包层皆为圆对称结

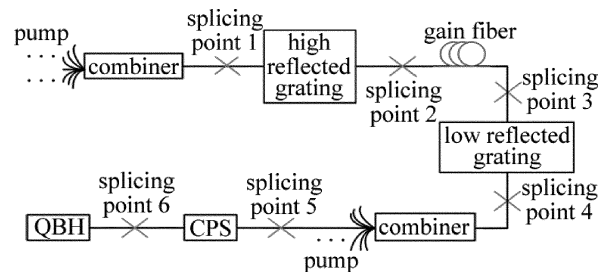


Fig. 8 Setup of high power fiber laser system

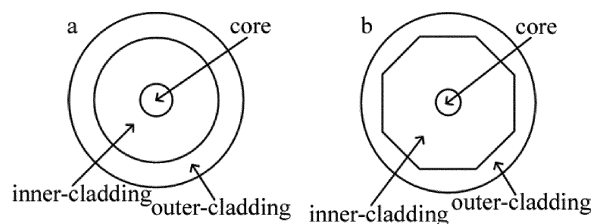


Fig. 9 Structure of large mode double-cladding fiber
a—cross-section of the circular inner-cladding b—cross-section of the octagonal inner-cladding

构,如图9a所示。增益光纤采用内包层为八角形的掺镱光纤(Nufem LMA-YDF 20/400-M),其纤芯直径为 $20\mu\text{m}$,内包层内切圆直径为 $400\mu\text{m}$,如图9b所示。对于无源光纤和有源光纤的熔接,如图8中的熔接点2及熔接点3,当采用熔接机自带的包层对准方法,熔接得到的图像存在明显的纤芯错位,如图10a所示。这主要是由于掺镱光纤的内包层为八角形,并非圆对称结构。采用光功率对准技术并不依赖光纤内包层的形状,对准后熔接得到的图像如图10b所示,对准后的熔接图像完好。

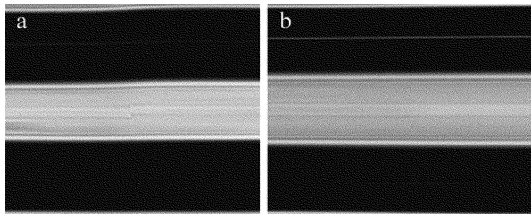


Fig. 10 Splice images with different alignment methods
a—splice image with automatic alignment b—splice image with optical power alignment

图11a为采用光功率对准法搭建的千瓦级高功率光纤激光器系统的抽运-输出功率曲线。输入抽运为 1500W 时,得到最大输出功率约 1170W ,其光光转换效率约 73% 。由光束质量仪测量激光器在最大输出功率时的光束质量,测量结果如图11b所示。光束质量 M^2 因子约为 1.22 ,说明通过光功率对准熔接技术得到了千瓦功率的准单模激光输出。

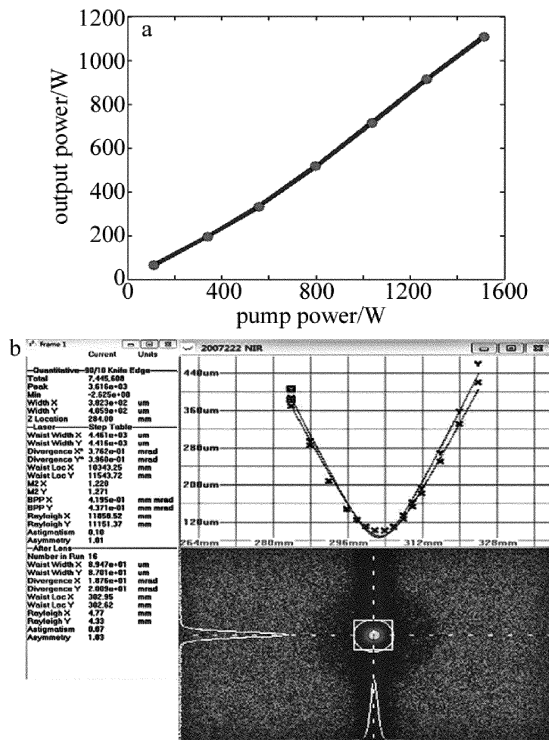


Fig. 11 Output performance of high power fiber laser at 11kW
a—output power at different pumped powers b—beam quality of output laser at 1.17kW

4 结论

理论和实验研究了大模场双包层光纤熔接的功率对准技术,结果表明:包层光和纤芯中高阶模的存在使耦合效率对径向偏移变化的敏感度降低,降低了光纤对准精度。基于光功率对准技术搭建了千瓦级双端抽运激光系统,输入抽运为 1500W 时,得到最大输出功率 1170W ,光光转换效率约 73% ,最大输出功率时的光束质量约为 1.22 ,实现了千瓦级激光器的准单模输出。采用光功率对准技术能够实现待熔光纤的精确对准,特别有利于高功率激光器中无源光纤和有源光纤的熔接,对高功率光纤激光器输出性能的提升有重要意义。

参考文献

- [1] JEONG Y C, BOYLAND A J, SAHU J K, *et al.* Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2009, 13(4): 416-422.
- [2] XIAO H, LENG J Y, ZHANG H W, *et al.* A 2.14kW tandem pumped fiber amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(1): 27010103(in Chinese).
- [3] RICHARDSON D J, NILSSON J, CLARKSON W A. High power fiber lasers; current status and future perspectives invited[J]. Journal of the Optical Society of America, 2010, B27(11): B63-B92.
- [4] ZHANG X X, GE T W, TAN Q R, *et al.* Research of Yb-doped all fibre lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(10): 1014002(in Chinese).
- [5] ZHANG H, YANG CH P, LI W, *et al.* Characteristics of high-power all-fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1287-1289(in Chinese).
- [6] WANG Y Sh, KE W W, SUN Y H, *et al.* Effect of core dislocation on performance of high power fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(12): 26121001(in Chinese).
- [7] WANG B Q. Research of reducing the fiber fusion splicer splice loss[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2012;15-20(in Chinese).
- [8] PENG J Zh. The research of alignment system to the laser injection and optical power detection in the fiber fusion splicer[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2014;3-21(in Chinese).
- [9] YIN Sh P, YAN P, GONG M L, *et al.* Fusion splicing of double-clad specialty fiber using active alignment technology[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(2): 020601.
- [10] ZHANG J H. Study on high power ytterbium-doped fiber lasers and key components[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012;11-14(in Chinese).
- [11] HUANG Ch. Investigation of high power ytterbium-doped double-clad fiber lasers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008;10-20(in Chinese).
- [12] MARCUSE D. Loss analysis of single-mode fiber splices[J]. Bell System Technical Journal, 1977, 56(5): 703-718.
- [13] HUANG Sh L, SHI W J. Research of the connection loss of the single-mode fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 1994, 23(2): 127-133(in Chinese).
- [14] OU P. The Simulation of the advanced optics (MATLAB) [M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2014;204-216(in Chinese).
- [15] LIANG Q T. Physical optics [M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008;75-96(in Chinese).