

激光与光电子学进展

2 kW 级双向光纤包层光滤除器

袁纬仪¹, 付敏¹, 李智贤¹, 王泽锋^{1,2,3}, 陈子伦^{1,2,3*}¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;³脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 包层光滤除器(CPS)能将光纤中包层光滤除,保证大功率光纤激光系统的高光束质量和稳定性,是大功率光纤激光系统稳定运行的重要核心器件之一。本文基于分段腐蚀法,设计了一种新的可实现双向滤除的弱-强-弱 CPS 制备方案。在无主动制冷、激光输入功率为 2051 W 的情况下,分别测试了正反向输入时的 CPS 性能,CPS 局部最高温度为 31.2 °C,温升速率为 3.5 °C/kW,滤除效率为 20.1 dB。对 CPS 进行双向设计,可以将光纤包层中的回返光均匀滤除,进一步提升光纤激光器系统的安全性及可靠性。该研究可为大功率光纤激光系统提供重要的器件支撑。

关键词 激光器; 光纤激光器; 包层光滤除器; 分段腐蚀; 大功率

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222312

2 kW Bidirectional Fiber Cladding Power Stripper

Yuan Weiyi¹, Fu Min¹, Li Zhixian¹, Wang Zefeng^{1,2,3}, Chen Zilun^{1,2,3*}¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;³State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract The cladding power stripper (CPS) can remove cladding light to ensure the high beam quality and stability of the high power fiber laser system. It is one of the important core devices for the stable operation of a high power fiber laser system. This paper uses a new bidirectional low-high-low CPS based on the segmented corrosion method. The local maximum temperature of CPS is 31.2 °C, the temperature increase rate is as low as 3.5 °C/kW, and the stripping efficiency is 20.1 dB when the input power is 2051 W without active cooling. The bidirectional design of CPS can gradually strip the backlight in the fiber cladding, and further, improve the safety and reliability of the fiber laser system. This research can provide important device support for high power fiber laser systems.

Key words lasers; fiber laser; cladding power stripper; fractional etching; high power

1 引言

光纤激光器以光束质量好、易于实现高功率和高效率等特点,吸引了研究学者极大的关注^[1]。采用包层泵浦技术的光纤激光器、放大器的出现,使得光纤激光器的输出功率实现了从毫瓦级到千瓦级的跨越^[2-3]。在实际的光纤激光系统中,光纤的弯曲和熔接等因素会导致部分信号光泄漏到包层中。除此之外,还有被放大的自发辐射光以及部分未被纤芯吸收的残留泵浦光^[4]在光纤内包层中传输。实际系统中的这些因素不

仅会导致输出激光的光束质量变差,还会增加激光输出系统损伤的风险(比如光纤端帽和输出准直聚焦系统等的损伤^[5]),并直接关系到大功率激光器能否安全、稳定地运行。包层光滤除器(CPS)能够有效滤除包层光,保证了大功率激光器的稳定性与光束的高质量,是光纤激光系统的关键元器件之一^[6-7]。

CPS 破坏光纤包层外边界的全反射条件,使包层光通过折射、散射或者吸收效应传输到包层外,从而实现包层光的滤除^[8]。目前 CPS 制备的常用方法有表面涂覆法^[9]、表面腐蚀法^[10]等。

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-17; 录用日期: 2022-08-31; 网络首发日期: 2022-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(11974427)、湖南省自然科学基金杰出青年基金(2019JJ20023)

通信作者: *zilun2003@163.com

表面涂覆法是指在光纤外表面涂覆高折射率聚合物来制备 CPS。2014 年,国防科技大学 Guo 等^[11]通过表面涂覆法研制了一种级联的包层光滤除器,在 150 W 的包层光功率下,CPS 的滤除效率为 18 dB,局部最高温度小于 64 °C。涂覆法因涂覆胶的物理性能而受到限制,如耐高温性能有限等。2017 年,清华大学 Yan 等^[12]结合涂覆法和腐蚀法,设计并实现了一种级联式的包层光滤除器,对于 1187 W 的包层光功率,滤除效率为 26.59 dB,最高温度低于 35 °C。

表面腐蚀法是指腐蚀破坏光纤包层外表面平滑的状态,使得包层光在该区域发生散射损耗,从而实现包层光的滤除。利用腐蚀法制备的 CPS 中,包层光直接散射到空气中,因此能够承受较高的温度^[13-14],且通过分段腐蚀的方法,可以得到很好的热管理能力,在大功率激光传输领域具有较大的优势。2017 年,南京理工大学 Yin 等^[15]使用 HF 腐蚀光纤制备了两段式 CPS,功率处理能力达 670 W,滤除效率为 19.8 dB,光纤温度分布均匀,无热点形成。2020 年,中国科学院半导体研究所 Zou 等^[16]划分三段腐蚀光纤,每段的滤除能力逐步提升以将包层光均匀滤除,得到的 CPS 滤除功率为 1117 W,滤除效率为 42 dB,空气冷却条件下的温升速率为 0.011 °C/W。

随着光纤激光输出功率的进一步提升,光纤包层光滤除器的滤除能力也需要进一步提升。同时在光纤激光系统的应用过程中会伴随大量返回的光,这些光经过输出头进入到光纤激光系统中。回返光进入光纤激光系统后,首先通过的光纤器件即为 CPS。一般来说,正向 CPS 的分段滤除能力,随着激光的输出方向越来越强,回返光直接进入强的滤除部分,会产生极大的温升并产生安全隐患^[17],因此在设计 CPS 时也应充分考虑对回返光的滤除能力。

本文通过优化设计光纤包层光滤除器的分段腐蚀滤除结构,细化滤除工艺,同时考虑对回返光的高效滤除,即采用弱-强-弱的滤除方式,研制了具备高滤除效率、低温升系数、结构紧凑的 CPS,其正反向滤除能力均大于 2 kW,滤除效率为 20.1 dB,温升速率为 3.5 °C/kW。高功率双向光纤 CPS 的研制,可为大功率光纤激光系统提供强有力的器件支撑。

2 高功率 CPS 的制备

2.1 表面腐蚀法原理分析

表面腐蚀法采用化学腐蚀剂腐蚀光纤,破坏光纤包层外表面平滑的状态,使包层光在该区域发生散射损耗,从而实现包层光的滤除。目前使用较多的化学腐蚀剂为氢氟酸,本文也采用质量分数 55% 的氢氟酸与玻璃蒙砂膏配比而成的腐蚀剂。

表面腐蚀法包层光滤除的原理为:腐蚀剂腐蚀光纤后,光纤表面形成如图 1 所示的凹凸不平的颗粒,破坏了光在外包层的全反射条件,从而实现包层光的滤

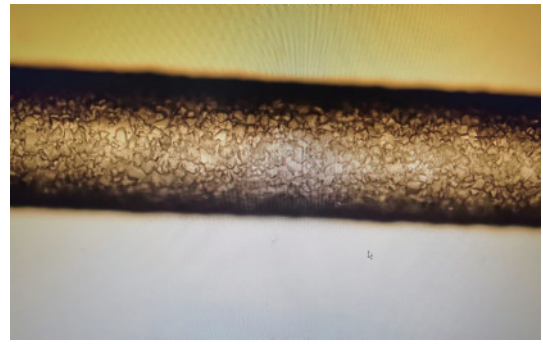
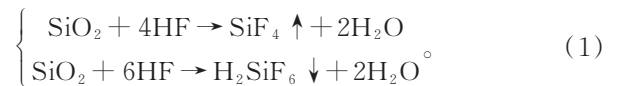


图 1 腐蚀光纤表面图

Fig. 1 Surface of corroded optical fiber

除。光纤的主要成分为二氧化硅(SiO_2),氢氟酸溶液与 SiO_2 反应的化学反应式通常表示为



反应生成的 H_2SiF_6 会沉积在光纤表面的颗粒上,从而形成腐蚀产物膜,阻挡进一步腐蚀,而生成的 SiF_4 气体的脱离会影响腐蚀产物膜的厚度,进而影响光纤腐蚀速率和表面微结构密度。随着腐蚀过程的进行,光纤表面粗糙度逐渐增加,引起包层光的散射损耗,包层光将被直接散射在空气中,从而实现包层光的滤除。而且,氢氟酸的腐蚀作用会减小光纤包层直径,也有利于包层光滤除。

散射出来的包层光被滤除器内腔吸收转换成热量,并通过水冷将热量带走。研究光纤腐蚀时间和腐蚀长度与包层光滤除率之间的关系,对 CPS 的散热研究十分重要。

实验研究了三种不同腐蚀长度的光纤 CPS。基于中心波长为 976 nm 的半导体激光器,测量了在 10 mm、30 mm、70 mm 三种腐蚀长度条件下,CPS 的包层光滤除率从 0 dB 升到 12 dB 需要的腐蚀时间,结果如图 2 所示。70 mm 光纤达到 12 dB 约需要 5 min 的腐蚀时间,在相同腐蚀长度的情况下,随着腐蚀时间的增加,光纤表面粗糙度增加,包层光滤除率逐渐增大。

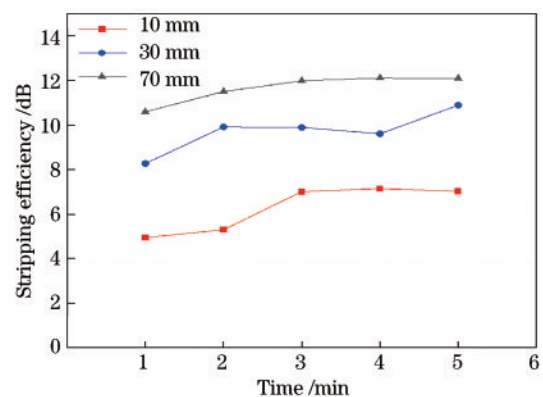


图 2 不同腐蚀长度下滤除率与腐蚀时间的关系

Fig. 2 Relationship between stripping efficiency and corrosion time under different corrosion lengths

但是,如果在较短的光纤腐蚀初始段滤除大量的包层光,则容易导致腐蚀初始端温度升高。在相同腐蚀时间的情况下,腐蚀长度越长,滤除的包层光越多,包层光滤除率越大。

2.2 制备材料及制备工艺

采用 Nufern 公司的双包层光纤作为 CPS 制备材料,纤芯和内包层的尺寸分别为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 $0.065/0.46$ 。为得到平整的涂覆层剥离点,防止在剥离点处出现热点,采用藤仓公司的 PCS-100 剥离机剥离涂覆层。本文采用分段腐蚀法制备 CPS,制备过程为:首先用 PCS-100 剥离机在光纤中段剥除涂覆层,然后选取一定长度的纸板,将纸板固定在夹具上(图 3),将光纤预腐蚀段悬空置于纸板上,将腐蚀液滴涂在纸板上,使光纤预腐蚀段浸泡于腐蚀液中,腐蚀一定时间后将光纤取出清洗,重复多次该工艺过程直至制备完成。



图 3 腐蚀光纤实物图

Fig. 3 Corroded optical fiber

高 NA 包层光相较于低 NA 的包层光,在同等滤除率下所需光纤长度更短,易在器件前端集中泄漏,导致温度集中而出现热点,增加了器件温度控制的难度。为实现更高功率的包层光滤除,需使用分段腐蚀法制备 CPS。根据上述实验结果,不同腐蚀长度及腐蚀时间对于 CPS 的滤除性能有着重要影响。第一段是包层光滤除容易集中的部分,其滤除率不能过大。合理设计滤除梯度能够在提高 CPS 滤除性能的同时提高热均匀性。CPS 的结构应尽量紧凑,以便于后续应用于大功率激光系统。结合理论研究及实际需求,设计的分段腐蚀 CPS 的三段长度分别为 $10\ \text{mm}$ 、 $30\ \text{mm}$ 、 $30\ \text{mm}$,腐蚀区域总长度为 $70\ \text{mm}$,将该样品记为 CPS#1,设计样品工艺参数如表 1 所示。

将 CPS#1 与 $600\ \text{W}$ 的半导体激光器输出光纤

表 1 CPS#1 制备工艺

Table 1 CPS#1 preparation process

Parameter	Part 1	Part 2	Part 3
Corrosion length /mm	10	30	30
Corrosion time /min	1	2	5

($220/242\ \mu\text{m}$) 熔接,输出激光的中心波长为 $976\ \text{nm}$,利用功率计测量通过 CPS#1 后剩余的泵浦功率。可知,输出功率为 $26.3\ \text{W}$,滤除率为 $13.5\ \text{dB}$ 。CPS 温度如图 4 所示,最高温度为 $30\ ^\circ\text{C}$,三段腐蚀段均没有明显的温升。这说明分段腐蚀能够将整个 CPS 的热量分散,提高了 CPS 的热均匀性。

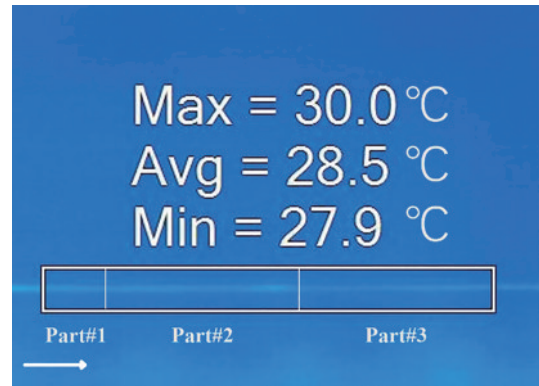


图 4 $600\ \text{W}$ 输入功率时的 CPS#1 温度图

Fig. 4 Temperature of CPS#1 with $600\ \text{W}$ input power

2.3 CPS 的性能检测

为测试高功率时 CPS#1 性能,搭建如图 5 所示的实验系统。该装置采用一个 7×1 的泵浦耦合器,用其中的三个输入臂将 3 个功率均为 $700\ \text{W}$ 的泵浦光源进行合成,合成后的功率为 $2100\ \text{W}$,注入激光为满注入条件,输出激光的中心波长为 $915\ \text{nm}$,泵浦耦合器输入光纤为 $220/242\ \mu\text{m}$ (NA=0.22) 的多模光纤,输出光纤为 Nufern 公司的 $20/400\ \mu\text{m}$ 的光纤。将泵浦耦合器的输出光纤与 CPS#1 的输入光纤熔接,利用功率计测量通过 CPS#1 后剩余的泵浦功率,并用红外热像仪检测 CPS#1 上滤除区域的温度随功率的变化。衰减系数表示为

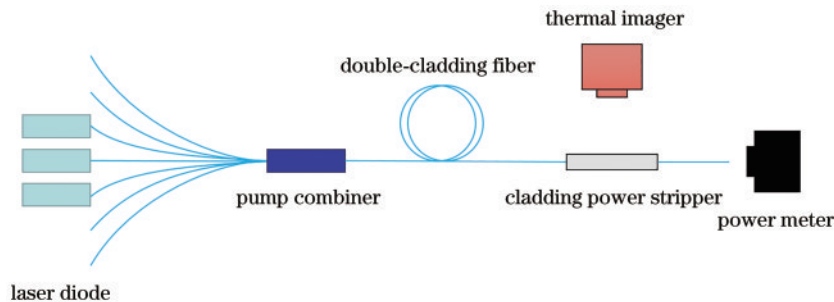


图 5 CPS#1 滤除效率和温度测试光路图

Fig. 5 Stripping efficiency and temperature test optical path diagram of CPS#1

$$K = -10\log\left(\frac{P_1}{P_0}\right), \quad (2)$$

式中： P_0 表示激光二极管(LD)经过合束器后功率计读数； P_1 表示经过CPS滤除后功率计读数，即输出功率。

在无主动制冷的情况下，当输入功率达到 2051 W 时，输出功率为 20.2 W，证明该方案制备的CPS能够滤除 2000 W 的功率。图 6 的方点线显示了CPS#1 输出功率-输入功率关系曲线。图 6 的三角形点线显示

了CPS#1的滤除效率，此结果显示，随着输入功率的提升，CPS#1的滤除效率始终保持稳定在 20 dB 左右，当输入功率为 2051 W 时，CPS 的滤除效率约为 20.1 dB。如图 7 所示，CPS#1 最高温度为 30.4 °C，处于可靠的工作范围^[18]，此时室温为 24 °C，温升速率约为 3.1 °C/kW。器件没有出现明显的热点，说明泄漏的包层光没有集中在器件前端，器件的温度场分布较为均匀，分段腐蚀方法提高了CPS的热均匀性。

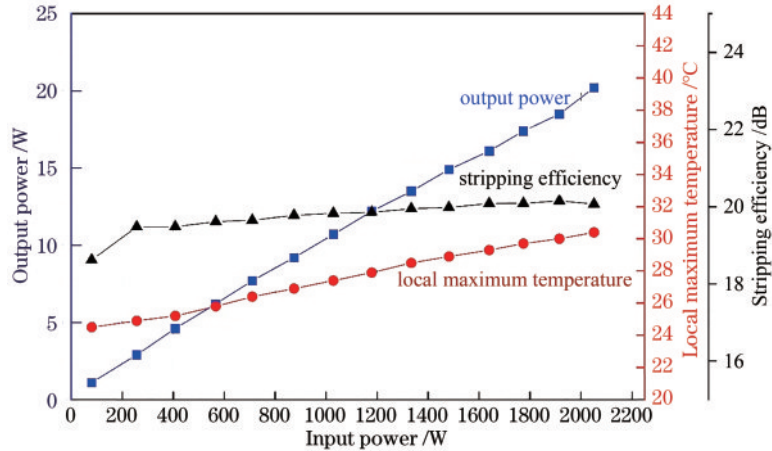


图 6 CPS#1 输出功率、温度和滤除效率随输入功率变化图

Fig. 6 CPS#1 output power, temperature, and stripping efficiency varying with input power

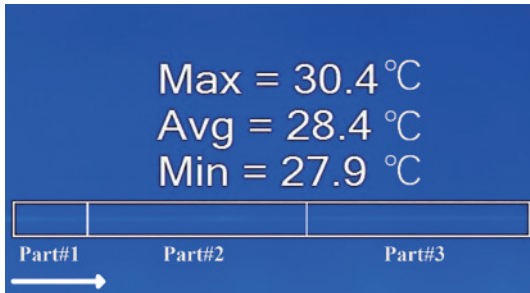


图 7 2 kW 输入功率时的CPS#1 温度图

Fig. 7 Temperature of CPS#1 with 2 kW input power

在光纤激光系统的应用过程中，会伴随大量返回的光通过输出头反向进入CPS，分段滤除的CPS能够沿着设计好的方向均匀滤除光纤中的包层光，但当回返光反向进入CPS时，由于末端的滤除能力很强，回返光将在很短的光纤长度被滤除，容易产生热点，影响系统的稳定性。对CPS#1进行反向出光实验，如图 8 所示，当输入功率为 257 W 时，CPS 局部最高温度已

经达到 52.1 °C。

2.4 CPS 的双向设计

为防止反向光将CPS烧坏并影响激光器中的光纤和其他光纤器件，本文提出对CPS进行弱-强-弱的双向滤除设计，这种方案可以实现更高功率的回光滤除，避免回返光在较短的距离内被大量滤除而导致局部过热，从而进一步提升了光纤激光器系统的安全性与可靠性。

所设计的CPS的5段长度分别为 10 mm、30 mm、30 mm、30 mm、10 mm，腐蚀区域总长度为 110 mm，将该样品记为CPS#2，设计样品工艺参数如表 2 所示。

表 2 CPS#2 制备工艺

Table 2 CPS#2 preparation process

Parameter	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4	Part 5
Corrosion length /mm	10	30	30	30	10
Corrosion time /min	1	2	5	2	1

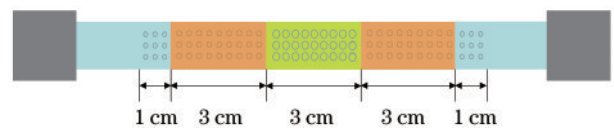


图 9 双向设计CPS示意图

Fig. 9 Schematic of bidirectional designed CPS

对CPS#2进行正反向测试，将CPS#2的两端依次与 2100 W 泵浦耦合器的输出光纤(20/400 μm)熔接，注入激光为满注入条件，输出中心波长为 915 nm，利



图 8 CPS#1 反向出光时的温度图

Fig. 8 CPS#1 temperature with reverse input light

用功率计测量通过 CPS#2 后剩余的泵浦功率。将光源与 CPS#2 左端连接时记为正向出光,光源与 CPS#2 右端连接时记为反向出光。图 10 为双向出光时输出功率随输入功率的变化图,当输入功率为 2051 W 时,两个方向滤除效率基本一致,均大于 20 dB。图 11 为正向出光 5 min 后器件的温度图,局部最高温度为 31.2 °C,此时室温为 24 °C,温升速率约为 3.5 °C/kW。图 12 为反向出光 5 min 后器件的温度图,局部最高温度为 31.2 °C。正向出光与反向出光时器件的滤除效率和最高温度均基本一致,说明双向设计的 CPS 对反向的回返光同样具有较强的滤除能力和热管理能力,能够进一步提升光纤激光器系统的安全性与可靠性。

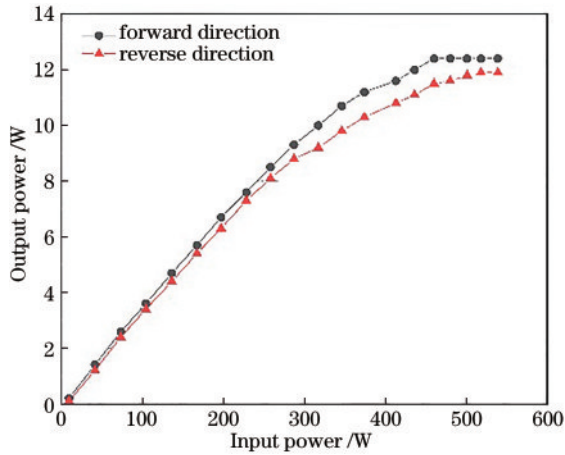


图 10 双向出光时输出功率随输入功率变化图

Fig. 10 Variation of output power with input power for bidirectional optical input



图 11 CPS#2 正向出光温度图

Fig. 11 CPS#2 temperature with forward input

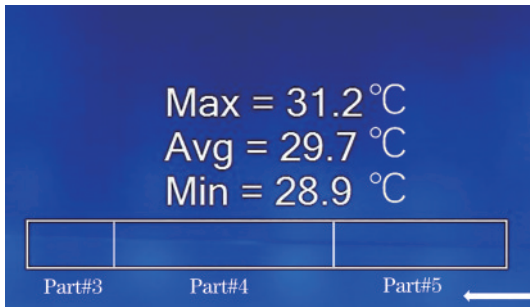


图 12 CPS#2 反向出光温度图

Fig. 12 CPS#2 temperature with reverse input

3 CPS 的封装

CPS 在制作完成后,由于表面腐蚀后的光纤会变得脆弱易折并且粗糙,表面暴露在空气中极易粘附灰尘导致产生高温点,因此需要对其进行封装,方便后期使用。在完成包层光滤除器裸测后,使用洁净玻璃管进行密封(图 13),保持表面腐蚀光纤始终处于干净的环境中。



图 13 CPS 套玻璃管实物图

Fig. 13 Physical drawing of CPS sleeve glass tube

将套管后的 CPS 穿入水冷夹具中,水冷夹具示意图如图 14 所示,剖面图如图 15 所示。夹具内部设置圆柱形空腔,空腔内壁进行发黑处理,以最大化壳体对滤除光的吸收^[19],套管后的 CPS 在其中悬空放置。水冷夹具使用 AB 胶封装后,在夹具侧面通上 25 °C 的循环水进行水冷处理,水冷夹具实物图如图 16 所示。对 CPS 进行封装后,对其进行数小时的 2 kW 包层光滤除测试,在 25 °C 水冷制冷的情况下,封装壳体的最高温度稳定小于 40 °C,有效制冷封装保证了滤除器可以长时间稳定运行。

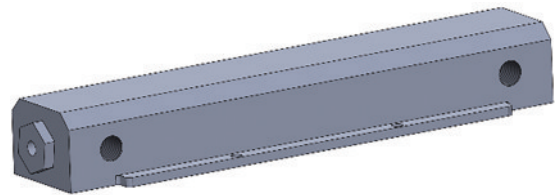


图 14 水冷夹具示意图

Fig. 14 Schematic of water cooling fixture

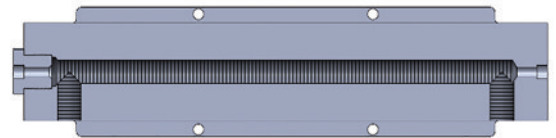


图 15 水冷夹具剖面图

Fig. 15 Cross-section drawing of water cooling fixture

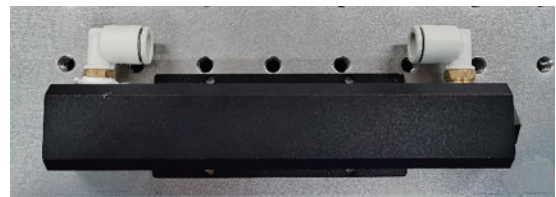


图 16 水冷夹具实物图

Fig. 16 Physical drawing of water cooling fixture

4 结 论

本文基于分段腐蚀方法,通过优化设计光纤 CPS 分段腐蚀滤除结构,细化滤除工艺,研制了具备高滤除效率、低温升系数、结构紧凑、制备简单的 CPS。随着输入包层光功率的提升,CPS 滤除效率保持稳定,当输入功率为 2051 W 时,CPS 滤除效率达 20.1 dB,局部最高温度为 31.2 °C,温升速率为 3.5 °C/kW。本文的工作在保证滤除效率的情况下提升了 CPS 的热管理能力,从而提升了 CPS 的功率滤除能力,可为大功率光纤激光系统提供重要的器件支撑。

参 考 文 献

- [1] 杨昌盛,岑旭,徐善辉,等.单频光纤激光器研究进展[J].光学学报,2021,41(1):0114002.
Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114002.
- [2] 王小林,张汉伟,杨保来,等.高功率掺镱光纤振荡器:研究现状与发展趋势[J].中国激光,2021,48(4):0401004.
Wang X L, Zhang H W, Yang B L, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator: current situation and future developments[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401004.
- [3] 肖起榕,田佳丁,李丹,等.级联泵浦高功率掺镱光纤激光器:进展与展望[J].中国激光,2021,48(15):1501004.
Xiao Q R, Tian J D, Li D, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501004.
- [4] Wetter A, Faucher M, Sévigny B. High power cladding light strippers[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6873: 687327.
- [5] 刘星洋.中波红外传能光纤耦合传输关键技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2019.
Liu X Y. Research on key technologies of coupling and transmission of medium-wave infrared energy transfer fiber[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [6] Holehouse N, Magné J, Auger M. High power performance limits of fiber components[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9344: 93441F.
- [7] 赵水,段云锋,王强,等.光纤激光器中包层光滤除器的研究进展[J].激光与红外,2015,45(7):749-752.
Zhao S, Duan Y F, Wang Q, et al. Research progress of the cladding light strippers in fiber lasers[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(7): 749-752.
- [8] Bansal L, Supradeepa V R, Kremp T, et al. High power cladding mode stripper[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9344: 93440F.
- [9] 李杰雄.高功率光纤激光器包层光滤除研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
Li J X. Research on the cladding light stripper in high power fiber laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [10] 尹路.大功率光纤激光器光束质量控制及非线性效应抑制关键技术研究[D].南京:南京理工大学,2019.
Yin L. Research on key technologies for control of beam quality and suppression of non-linear effects for high-power fiber lasers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [11] Guo W, Chen Z L, Zhou H, et al. Cascaded cladding light extracting strippers for high power fiber lasers and amplifiers[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1501106.
- [12] Yan P, Sun J Y, Huang Y S, et al. Kilowatt-level cladding light stripper for high-power fiber laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 1935-1939.
- [13] 孙静,邹淑珍,陈寒,等.高功率包层光剥离器最新研究进展[J].激光与光电子学进展,2017,54(11):110001.
Sun J, Zou S Z, Chen H, et al. Recent progress of high-power cladding light stripper[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 110001.
- [14] Wysmolek M, Ottenhues C, Pulzer T, et al. Microstructured fiber cladding light stripper for kilowatt-class laser systems[J]. Applied Optics, 2018, 57(23): 6640-6644.
- [15] Yin L, Yan M J, Han Z G, et al. High power cladding light stripper using segmented corrosion method: theoretical and experimental studies[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8760-8776.
- [16] Zou S Z, Yu H J, Zhang J Y, et al. Highly efficient fiber cladding light stripper fabricated by chemical mask etching method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 5136-5141.
- [17] 郭良,湛鸿伟,王泽锋,等.被动双包层光纤中包层光产生实验研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(2):020602.
Guo L, Chen H W, Wang Z F, et al. Experimental study on the generation of cladding light in passive double-clad fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020602.
- [18] 胡志涛,陈晓龙,何兵,等.高功率光纤激光器包层光滤除器的温度场研究[J].中国激光,2016,43(7):0701004.
Hu Z T, Chen X L, He B, et al. Temperature distribution of cladding light strippers in high power all-fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0701004.
- [19] 刘珂,李敏,黄珊,等.大于500W非水冷光纤包层光剥离器[J].强激光与粒子束,2021,33(2):021005.
Liu Y, Li M, Huang S, et al. >500 W passively-cooled fiber cladding light stripper[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(2): 021005.