

基于国产传能光纤的高功率包层光滤除器实验研究

孙伟, 严勇虎, 郭洁, 姚之圃, 朱永刚, 贺作为, 袁健, 陈伟*

江苏亨通光纤科技有限公司, 江苏 苏州 215200

摘要 为了滤除高功率光纤激光器传能光纤包层中的剩余泵浦光、高阶模式激光、纤芯泄漏激光和反射光, 提高高功率光纤激光器的光束质量和稳定性, 基于自研国产双包层 $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 传能光纤, 以 KHF_2 溶液、玻璃蒙砂膏和 HF 为腐蚀剂, 采用分段腐蚀工艺, 并复合应用腐蚀剂, 制备了带梯度结构的包层光滤除器。所制备的包层光滤除器在输入泵浦光功率为 343 W 时, 输出功率只有 2.22 W, 功率衰减系数达 21.9 dB。为了在真实应用场景下利用激光器输出端传能光纤包层获得高功率低数值孔径激光, 采用自研 $19\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 双包层掺镱光纤构建光纤激光系统, 在 1173 W 激光输入时包层光滤除器可滤除 208 W 低数值孔径包层光, 在无主动散热条件下滤除器运行温度稳定在 $45\ ^\circ\text{C}$ 以下。基于国产传能光纤制备的包层光滤除器可满足高功率光纤激光器的应用要求, 保证了高功率光纤激光器的高光束质量和稳定性。

关键词 激光器; 包层光滤除器; 传能光纤; 分段腐蚀; 光纤激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1801003

1 引言

千瓦、万瓦级光纤激光器相比于二极管泵浦固体激光器具有光束质量优、电光转换效率高、运转稳定、集成度高等优势, 在工业加工、增材制造、国防军事等领域已有广泛应用。随着激光加工技术的进步, 这些应用对高功率光纤激光器的光束质量和稳定性的要求越来越高。但由于传能光纤包层内可能存在剩余泵浦光、纤芯泄漏高阶模式激光和返回光等包层光^[1], 这些包层光功率会随激光功率的增加而增加, 严重影响激光器的光束质量和稳定性。包层光滤除器 (CLS) 作为包层光滤除的关键器件, 能有效剥除包层光, 保证高功率全光纤激光器的稳定性与光束质量。在实际激光应用中, 包层光滤除器的另一重要作用是抗返回光。加工件表面由于反射返回到光纤中的光对光纤激光器谐振腔和光纤器件都有危害, 干扰谐振腔的稳定性、烧毁光纤光栅和合束器等光纤器件及击穿指示红光芯片^[2], 包层光滤除器可以有效消除包层中传输的返回光, 减小返回光危害。

CLS 的基本原理是采用技术手段破坏传能光纤包层光的全反射条件, 将包层光泄漏到光纤外部, 实现滤除作用。常用方法有涂覆高折胶、化学腐蚀、激光刻蚀^[1,3]和基于吸收效应的方法^[4-5]。

激光刻蚀制备方式可精确控制光纤包层表面的刻蚀结构, 但制备 CLS 需要昂贵的设备, 制备成本高。

Boyd 等^[1]使用 CO_2 激光器刻蚀光纤包层表面, 刻蚀后表面结构为深度为 3.5 mm、间距为 $620\ \mu\text{m}$ 、总长为 60 mm 的条状结构, 当输入光功率为 300 W 时, 所制备的 CLS 的功率衰减系数为 20 dB, 表面温度为 $80\ ^\circ\text{C}$ 。Michael 等^[3]利用紫外激光器对光纤进行刻蚀, 刻蚀后表面结构为 7.5 mm 深的条纹, 制备的 CLS 的最大包层光功率衰减系数为 15.2 dB, 温升系数为 $1\ ^\circ\text{C}/\text{W}$, 当剥离功率约为 11 W 时, CLS 温度为 $38\ ^\circ\text{C}$ 。

涂覆高折胶制备方式是利用折射率变化来破坏全反射条件。该方法受涂覆胶物理性能的限制, 难以应用于高温环境^[6-7]。新涂覆剥离方式与 CLS 结构创新相结合可扩展该方法的应用范围。Kai 等^[8]采用五段剥离涂覆层方法, 当 CLS 剥离功率为 132 W 时, 器件的最高稳定工作温度为 $50.0\ ^\circ\text{C}$ 。Yan 等^[9]将光纤腐蚀 CLS 与级联聚合物涂覆 CLS 结合在一起, 设计制造的大功率 CLS 能够在 1187 W 包层光下持续工作, 功率衰减系数为 26.59 dB, 并且最高局部温度低于 $35\ ^\circ\text{C}$ 。

化学腐蚀制备方式简单易操作, 制备器件表面结构稳定。腐蚀原理是: 光纤包层主要成分 SiO_2 与腐蚀剂反应生成微细颗粒, 颗粒在光纤表面均匀地分布, 阻止氢氟酸的进一步腐蚀, 而颗粒间的光纤则继续被腐蚀, 不同程度的侵蚀使光纤表面生成凹凸不平的表面形貌。可以通过控制生成颗粒的形状、尺寸等来控制腐蚀后光纤的表面结构。

Kliner 等^[10]采用包含氢氟酸 (HF) 和酸性氟化物

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-01-12; 录用日期: 2022-01-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB2900700)

通信作者: *chenweiSD@shu.edu.cn

的腐蚀膏腐蚀制备 CLS,制备样品通过了 500 W 剥离功率测试。在滤除高数值孔径(NA)包层光时功率衰减系数超过 20 dB,而在低 NA 光下功率衰减系数只有 6 dB。Li 等^[11]将剥离光纤涂层段与透明石英管熔接,并沿石英管施加不同量的腐蚀剂,制备了磨砂表面,实现了包层光的均匀滤除,在 200 W 包层光测试时实现了 20 dB 的功率衰减系数。Yin 等^[12]使用 HF 腐蚀光纤制备了两段式 CLS,其包层光功率衰减系数为 19.8 dB,功率耐受能力高达 670 W,包层光被均匀剥离,温度分布均匀,没有形成热点。An 等^[13]利用微通道热沉,并通过热交换理论进行仿真,制备的 CLS 在高功率光纤激光器中剥离了 1000 W 的包层光。刘巧等^[14]采用特氟龙夹具在 KHF₂ 溶液中分段腐蚀制备了紫铜封装的包层光滤除器件,可以滤除 500 W 的 NA 为 0.22 的包层光。Liu 等^[15]通过在多段特氟龙毛细管中添加腐蚀剂,制备了多段式的包层光滤除器,封装后可以滤除 2.16 kW 的半导体激光器合束激光,功率衰减系数达到 21.7 dB。

目前 CLS 的主要研究方向是通过不同方法实现更高功率下的更大衰减系数和更低温升系数。由于低 NA 光所需的滤除距离长而高 NA 光会集中泄漏,在实际应用中难以实现高功率衰减系数,高功率 CLS 的温升问题依然难以解决。

本文采用国产自研传能光纤,通过多种腐蚀剂复合应用,以分段腐蚀方式,制备了表面结构呈梯度变化的 CLS。采用自研纤芯细于传能光纤的双包层掺铒光纤作为光纤激光增益介质,通过谐振腔内增益光纤与传能光纤纤芯模场的失配,获取了高功率低数值孔径的包层激光,并在真实应用场景下验证了 CLS。当输入泵浦光功率为 343 W 时,功率衰减系数为 21.9 dB;当激光输入功率为 1173 W 时,所制备的 CLS 可滤除 208 W 包层光,工作温度稳定在 45 °C 以下。

2 实验研究

2.1 制备材料及制备工艺

采用自研的细纤芯包层尺寸为 20 μm/400 μm 的双包层传能光纤(PDF)作为滤除器制备材料,对应的 NA 为 0.065/0.46。腐蚀剂采用浓度(质量分数)为 47% 的氢氟酸(HF)、玻璃蒙砂膏、质量浓度为 0.1 g/mL 的 KHF₂ 溶液,其中 HF 是用于光棒酸洗

的高纯度氢氟酸。实验采用分段腐蚀法制备 CLS,制备过程是:首先用热剥钳剥去一段光纤涂覆层,然后把光纤放入装有腐蚀剂的凹槽内,腐蚀一段时间后,取出光纤,并用去离子水冲洗腐蚀部分,重复多次工艺过程,直至制备完成。

相较于低 NA 的包层光,高 NA 包层光在同等剥离功率下所需的完全剥离光纤长度短,因此散射功率密度较大,易造成器件温度集中,出现热点现象。为了探索不同腐蚀剂工艺下滤除器的滤除特性,设计了表 1 所示的实验参数。实验中腐蚀传能光纤长度均为 25 mm。

表 1 腐蚀工艺参数表

Table 1 Parameters for corrosion process

Sample No.	Etchant	Corrosion time /min
1	HF	6
2		8
3		10
4		20
5	Glass frosted paste	6
6		8
7		15
8		30
9	KHF ₂	3
10		30
11		50
12		80

2.2 CLS 的性能检测及设备

为了测试高 NA 包层光剥离时 CLS 的性能,搭建了图 1 所示的测试装置。测量半导体激光器输入激光时 CLS 对 976 nm 波长泵浦光的滤除性能以及发热情况。该装置以三个 140 W 半导体激光器(LD)作为输入光源,输出中心波长为 976 nm,输出尾纤纤径为 105 μm/125 μm,输出光束的数值孔径为~0.18。在半导体激光器尾纤处连接合束的输入光纤,将合束器输出光纤连接实验制备的 CLS 样品。为了减少返回光,对 CLS 输出端进行了 8°切角处理。利用功率计记录输出功率,并用热成像仪观察 CLS 发热状况,功率衰减系数为

$$K = -10\lg(P_0/P_1), \quad (1)$$

式中: P_0 表示 LD 经过合束器后的功率计读数; P_1 表示经过 CLS 滤除后的功率计读数即输出功率。

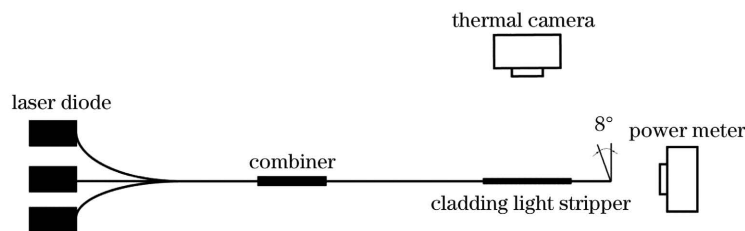


图 1 半导体激光器的测试装置

Fig. 1 Test device of semiconductor laser

只用图 1 所示测试装置进行检测不能够表征 CLS 在实际高功率光纤激光器中的应用情况,实际纤芯泄漏的高阶模激光的 NA 远低于泵浦光。为此搭建了图 2 所示的光纤激光测试装置。该装置的泵浦光源采用 17 个 140 W 的 LD,其由光纤合束器合束后输入到由光纤光栅和双包层掺镱光纤组成的激光谐振腔中,输出端连接实验制备的 CLS。该测试装置可表征 CLS 的实际应用情况。另外,值得一提的是,为了获得与纤芯激光一样亮度的高功率包层激光,采用自制的 19 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 掺镱光纤作为增益介质,当掺镱光纤与高反光栅端的传能光纤熔接时,通过纤芯失配来实现传能光纤纤芯激光向掺镱光纤包层的泄漏。另外,在高反光栅端,掺镱光纤的缠绕直径在 80 mm 以下,小直径缠绕促进了纤芯高阶模的泄漏,以此来获得百瓦量级低 NA 的包层激光。实验采用红外观察仪调整激光光路,采用热成像仪测试器件的发热情况,采用功率计测试功率数据。

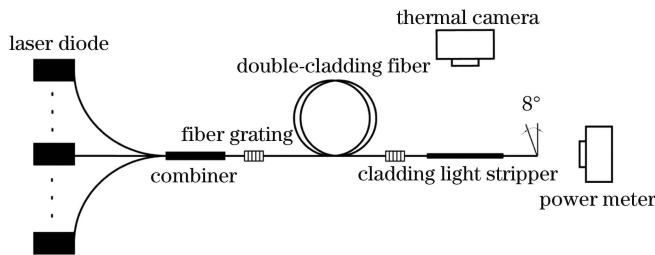


图 2 光纤激光器的测试装置
Fig. 2 Test device of fiber laser

3 实验结果与分析

3.1 不同 CLS 的滤除性能

为了测试不同工艺制备方式下 CLS 的滤除性能,将表 1 中的样品接入到图 1 所示的测试装置上进行测试,在半导体激光器总输入功率为 180 W 时测试滤除效果,根据测试结果绘制了图 3 所示的各样品的功率衰减系数图。其中, HF 腐蚀制备的样品的功率衰减系数最小,在 1 dB 以内; KHF_2 腐蚀制备的样品的功

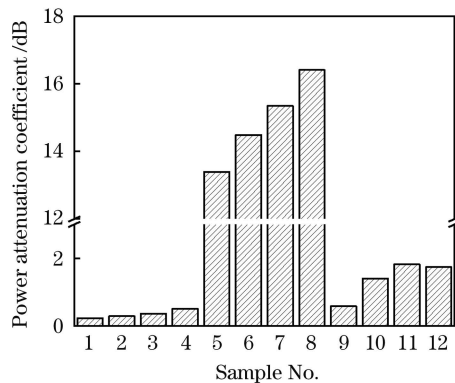


图 3 不同工艺下 CLS 的功率衰减系数
Fig. 3 Power attenuation coefficients of CLS for different processes

率衰减系数随着腐蚀时间的增加而逐渐增大,其值趋于 2 dB 并保持稳定;玻璃蒙砂膏腐蚀制备的样品的功率衰减系数最大,可达 16 dB,其对半导体激光的滤除性能是最好的。

图 4 为表 1 中样品在图 1 所示测试平台上测试时的漏光图。其中,样品 4 的漏光形状最小,如图 4(a)所示,验证了 HF 腐蚀制备的样品的功率衰减系数小的测试结果;样品 8 的漏光图呈现出一个带拖尾的球形状态,如图 4(b)所示,这样意味着球形头部的散射功率密度大,在滤除高功率包层光时存在高温隐患,因此玻璃蒙砂膏不宜作为第一段腐蚀剂;样品 12 的漏光图呈现圆柱状,如图 4(c)所示,这样的漏光形状可以降低散射功率密度,如果再增加腐蚀距离,散射功率密度会更低,因此 KHF_2 可作为第一段腐蚀剂。



图 4 不同样品的漏光图。(a)样品 4;(b)样品 8;(c)样品 12
Fig. 4 Light leakage diagrams of different samples.
(a) Sample 4; (b) sample 8; (c) sample 12

3.2 不同 CLS 的显微形貌

不同腐蚀方式下光纤直径的变化曲线如图 5 所示。在玻璃蒙砂膏和 KHF_2 腐蚀方式下,光纤直径随腐蚀时间的变化不大。这是由于反应生成的 K_2SiF_6 沉积在光纤表面上且颗粒均匀分布,进一步的腐蚀被阻挡,包层直径的减小速度减慢。在时间小于 30 min 的区间内, HF 腐蚀方式下的光纤的直径与腐蚀时间呈近似线性变化关系,随后由于 HF 挥发和反应的不断消耗等,包层直径的减小速度减慢。

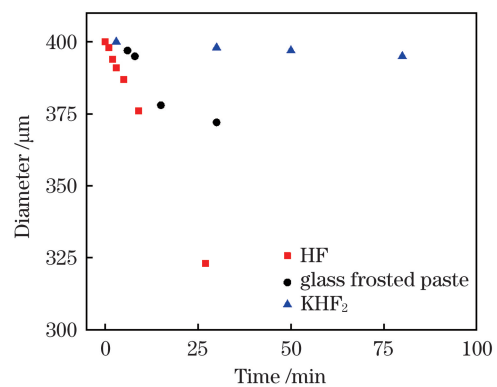


图 5 不同腐蚀方式下光纤直径随时间的变化曲线
Fig. 5 Fiber diameter versus time for different corrosion methods

图 6 所示为不同 HF 腐蚀时间下的光纤表面结构。随着腐蚀时间的增加,光纤直径减小,光纤表面无明显腐蚀形貌,与无腐蚀的光纤没有差别。因此,结合图 5 与图 6 可知,利用 HF 腐蚀工艺可制备特定直径的 CLS。

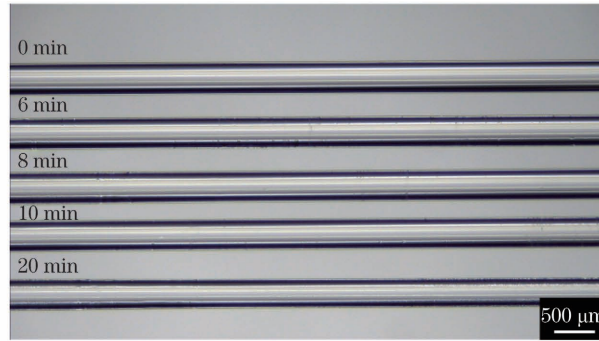


图 6 不同 HF 腐蚀时间下光纤的表面结构

Fig. 6 Surface structures of fiber under different HF corrosion time

图 7 所示为两种不同样品的显微结构。可以看出,小颗粒均匀覆盖在光纤表面上,但样品 8 的粗糙度要比样品 12 大。粗糙度差异导致图 3 所示的功率衰

减系数的差异,表面粗糙度越大,对应的功率衰减系数也越大。因此,玻璃蒙砂膏和 KHF_2 适合在光纤表面上制备粗糙的结构, HF 适合制备特殊直径的光纤。

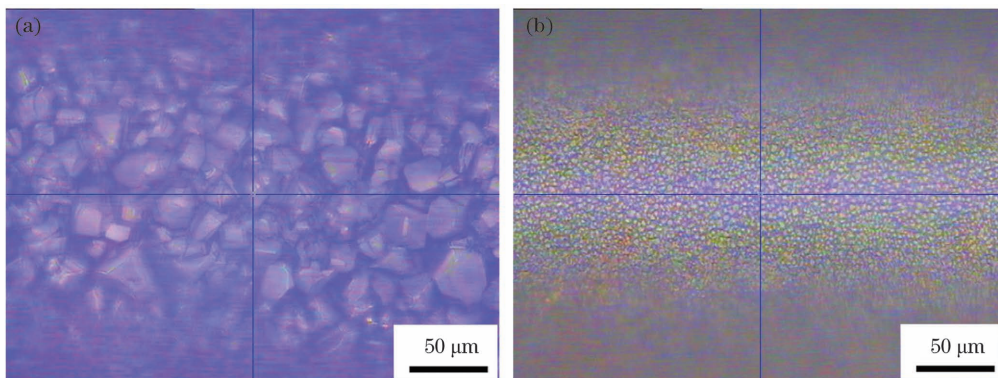


图 7 不同样品的包层表面形貌图。(a)样品 8;(b)样品 12

Fig. 7 Surface morphologies of claddings for different samples. (a) Sample 8; (b) sample 12

3.3 分段腐蚀制备梯度结构的 CLS

根据上述实验结果可知, CLS 对滤除性能有着重要的影响, CLS 长度越长, 越有利于降低散射功率密度。第一段是包层光泄漏容易集中的地方, 其表面粗糙度不能过大; 随着包层光的滤除, 光纤中低 NA 光的比例相对增多, 选取合理梯度以缓和过渡并增大粗糙

度能够提升 CLS 的滤除性能。因此本文设计分段腐蚀 CLS 的四段长度分别为 70, 25, 25, 25 mm。腐蚀区域总长度为 150 mm, 在特氟龙材质的固定长度的腐蚀槽中开展实验。由图 3 和图 4 的结果, 选取 KHF_2 作为第一段的腐蚀剂, 用玻璃蒙砂膏和 HF 作为最后一段的腐蚀剂, 设计的样品制备工艺如表 2 所示。

表 2 CLS 制备工艺

Table 2 CLS preparation process

Fiber	First optical fiber	Second optical fiber	Third optical fiber	Fourth optical fiber
Process	KHF_2 corrosion for 45 min	Glass frosted paste corrosion for 15 min + KHF_2 corrosion for 30 min	Glass frosted paste corrosion for 30 min	HF corrosion for 10 min + glass frosted paste corrosion for 30 min

不同段光纤的表面形貌如图 8 所示, 可以看出, 从第一段到第三段, 粗糙度逐步增加。在第一段由 KHF_2 腐蚀的表面上, 均匀分布着粒径为 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 的颗粒, 包层直径约为 $392\ \mu\text{m}$, 该段长度为 70 mm 以延缓滤除, 均匀泄漏一部分包层光。第二段包层直径约为 $375\ \mu\text{m}$, 其表面颗粒粗糙度介于第一段和第三段之间, 是粒径为 $9\sim 20\ \mu\text{m}$ 的不规则表面颗粒。第三段包层直径约为 $365\ \mu\text{m}$, 分布着粒径为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 的颗粒, 用于滤除一部分第二段未滤除掉的包层光。第四段的包层直径约为 $330\ \mu\text{m}$, 表面形貌与第三段相同。

整个分段式的滤除器在径上呈梯度减小, 通过逐段滤除来降低器件的局部发热量。

利用图 1 所示测试装置测试所制备的 CLS 的滤光性能。半导体激光器作为输入光源时 CLS 的性能如图 9(a) 所示。可以看出, 随着输入功率的增加, CLS 的滤除功率呈线性增加, 接入 CLS 后泵浦光被滤除干净, 只有少部分光在纤芯内传播。当输入功率为 343 W 时, 经过 CLS 滤除, 输出功率只有 2.22 W, 功率衰减系数为 21.9 dB。将 CLS 接入图 2 所示的测试装置, 测试 CLS 的实际应用效果。计算接入 CLS 前

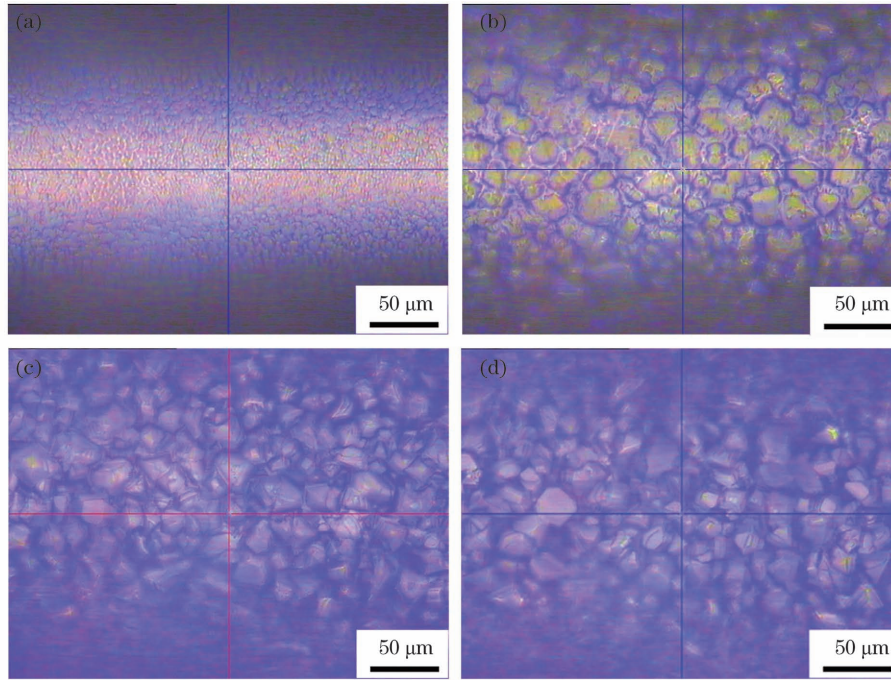


图 8 不同段光纤的表面形貌。(a)第一段;(b)第二段;(c)第三段;(d)第四段

Fig. 8 Surface morphologies of different fiber parts. (a) First part; (b) second part; (c) third part; (d) fourth part

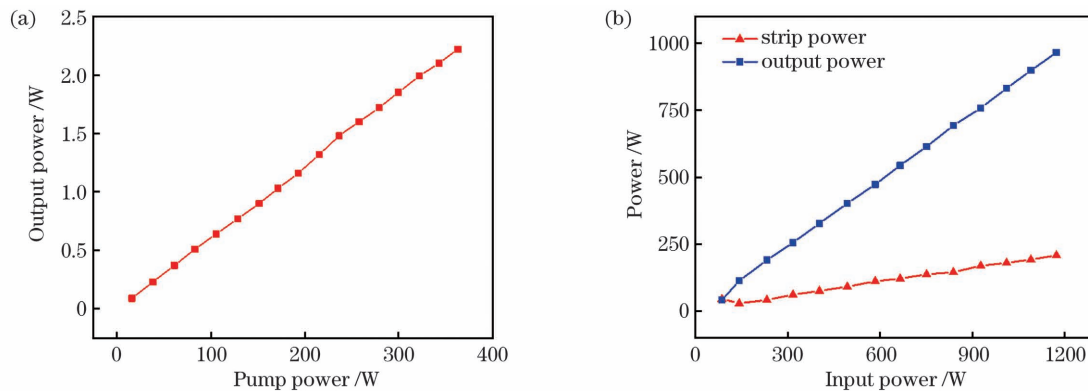


图 9 CLS 测试功率曲线。(a)半导体激光输入;(b)光纤激光输入

Fig. 9 CLS test power curves. (a) Semiconductor laser input; (b) fiber laser input

后功率数值的差值并记作滤除功率,以此来评定 CLS 的包层光滤除能力。测试结果如图 9(b)所示,激光输出功率和 CLS 滤除功率均随输入功率的增加呈线性增加,说明 CLS 在该测试系统中可稳定工作。当激光输入功率为 1173 W 时,CLS 可滤除 208 W 的低数值孔径的包层光。滤除前后的光谱如图 10 所示,976 nm 的泵浦光经过谐振腔后被充分吸收,与输出激光的光谱强度差值高于 50 dB,残余泵浦光功率在 1 W 以内。在滤除器的输出端剥除一段涂覆层后,涂覆 2 cm 长的折射率为 1.52 的高折胶,在滤除 208 W 的包层激光后,该高折胶在室温下无明显发热现象,可认定分段式滤除器基本将包层内的激光滤除干净了。

图 11(a)所示为滤除 208 W 包层激光后 CLS 的热成像图,其中粗箭头方向表示激光传输方向。热成像图显示 CLS 光纤表面最高温度只有 41.3 °C。图 11(b)显示,泄漏的包层光没有集中在某一段,而是

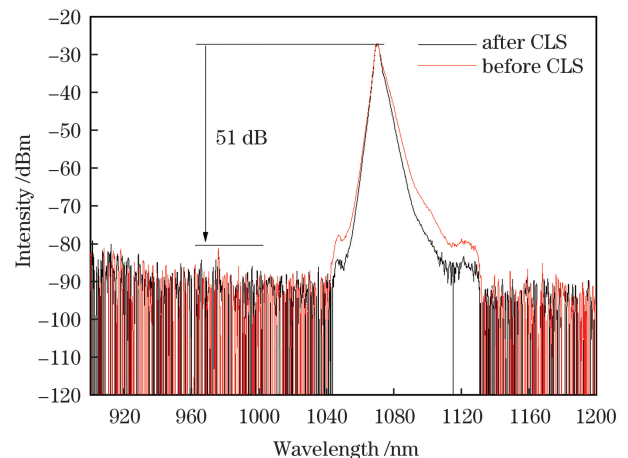


图 10 包层光滤除前后输出的光谱图

Fig. 10 Laser output spectra before and after filtering cladding light

在每一段都有一部分包层光泄漏,这样避免了在某一段集中滤除包层光,造成温度急剧升高,可使温度场分布比较均匀,有利于后续器件封装的热管理设计。

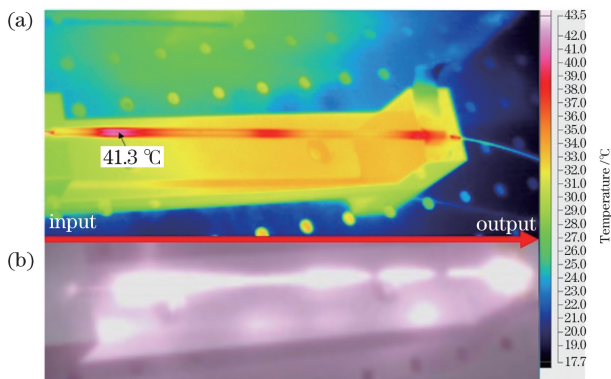


图 11 CLS 的漏光图像和热成像图。(a)热成像图;(b)漏光图像

Fig. 11 Light leakage image and thermal image of CLS.

(a) Thermal image; (b) light leakage image

4 结 论

基于国产传能光纤制备了可用于高功率光纤激光器的无水冷却包层光滤除器。通过优化腐蚀工艺和光纤表面结构,制备了梯度结构的 CLS。当泵浦光输入功率为 343 W 时,CLS 的功率衰减系数达 21.9 dB;当 1173 W 低数值孔径激光输入时,所制备的 CLS 可滤除 208 W 的包层光,包层光基本被滤除干净,滤除器工作温度稳定在 45 °C 以下。所制备的基于国产传能光纤的梯度结构 CLS 适用于千瓦高功率光纤激光器。未来将通过优化包层光滤除器的制备工艺和提升包层中低 NA 激光的功率,实现更高功率激光的滤除,并提升器件的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Boyd K, Simakov N, Hemming A, et al. CO₂ laser-fabricated cladding light strippers for high-power fiber lasers and amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 2915-2920.
- [2] 朱振,肖成峰,夏伟,等. 大功率 640 nm 红光半导体激光器的

设计及制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 081403.

- Zhu Z, Xiao C F, Xia W, et al. Design and fabrication of high power 640 nm red laser diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081403.
- [3] Berisset M, Lebrun L, Faucon M, et al. Laser surface texturization for high power cladding light stripper [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 220-226.
- [4] 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.
- [5] Babazadeh A, Nasirabad R R, Norouzey A, et al. Robust cladding light stripper for high-power fiber lasers using soft metals [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(12): 2611-2615.
- [6] 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): 2320736.
- [7] Meleshkevich M, Ilyashenko V, Shkurikhin O. High power fiber laser system with cladding light stripper: US7839901 [J]. 2010-11-23.
- [8] Gong K, Hao M M, Li J B. The thermal effect of cladding power stripper for high power fiber lasers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(32): 3768-3773.
- [9] 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.
- [10] Kliner A, Hou K C, Plötner M, et al. Fabrication and evaluation of a 500 W cladding-light stripper [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8616: 178-185.
- [11] Li T L, Wu J, Sun Y H, et al. An improved method for stripping cladding light in high power fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9255: 123-128.
- [12] 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.
- [13] An H X, Liu X G, Bi Z Y. Study and design of cladding power stripper for high power fiber laser systems [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4: e28.
- [14] 刘珂,李敏,黄珊,等. 大于 500 W 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.
- [15] Liu Y, Huang S, Wu W J, et al. >2 kW high stability robust fiber cladding mode stripper with moderate package temperature rising [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1151-1154.

Experimental Research on High-Power Cladding Light Stripper Based on Domestic Power Delivery Fiber

Sun Wei, Yan Yonghu, Guo Jie, Yao Zhipu, Zhu Yonggang, He Zuowei, Yuan Jian, Chen Wei*

Jiangsu Alpha Optic-Electric Technology Co., Ltd., Suzhou 215200, Jiangsu, China

Abstract

Objective In order to filter out the residual pump light, the high-order mode laser, the core leakage laser, and the reflected laser in the power delivery fiber (PDF) cladding of a high power fiber laser, it is urgent to improve the beam quality and keep the operational stability of a high power fiber laser. Cladding light stripper (CLS) as the critical component for cladding light filtering, is capable of efficiently stripping cladding light and ensuring the stability and beam

quality of a fiber laser. In the practical laser applications, another significant effect of CLS is to resist returning light. Due to the reflection from the workpiece surface, the light returning back to the fiber damages the resonant tank and the fiber components, disturbs the stability of the resonant tank, burns the fiber components including the fiber Bragg grating (FBG) and the combiner, and breaks down the red light chip. CLS is able to effectively eliminate the returning light transmitting in the fiber cladding, so that the damage can be suppressed enormously. At present, the main research direction of CLS is to achieve a higher power attenuation coefficient, a lower temperature rise coefficient, and a tolerance of high power through different methods.

In practical application of low numerical aperture(NA)cladding light, it is difficult to withstand high power and high attenuation coefficient, and the problem of high power CLS temperature rise is still difficult to solve, which is mainly due to the long filtering distance required for low NA light and the concentrated leakage of high NA light. Most researches about CLS devices use the PDF materials at abroad.

Methods Here the self-developed $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ power delivery optical fiber is used as the preparation material of a CLS device, the KHF_2 solution, glass frosted paste, and hydrofluoric acid are used as the etchants, and the segmented etching method and the composite application of the three etchants are adopted to prepare the gradient structured CLS. In order to test the CLS performance during stripping of high NA cladding light, a test device (Fig. 1) is built. The filtering performance and heating of CLS for 976 nm pump LD input are measured. This device uses three 140 W LDs as the input laser source. In order to test the filtering performance of CLS under different etchant processes, the samples (Table 1) are connected to the test device for a test. The input power of the pump laser is 180 W.

According to the corrosion characteristics of each corrosive agent, the glass frosted paste and KHF_2 are suitable for making rough structures on the PDF surface, and the HF is suitable for preparing a section of optical fiber with a special diameter. After filtering the cladding light, the power proportion of low NA light in the fiber increases relatively. Reasonable gradient transition and increase in roughness can improve the filtering performance of CLS. Therefore, the lengths of four sections of the gradually corroded CLS are designed as 70 mm, 25 mm, 25 mm, and 25 mm, respectively. According to the test result of a filtered pump laser, the KHF_2 is used as the corrosive agent in the first section, and the glass frosted paste and HF are used as the corrosive agents in the last section. The process parameters of the designed CLS samples are shown in Table 2. The NAs of the high-order mode laser leaked from the actual core and the laser returned by the workpiece are much smaller than that of the pump light. In order to obtain high-power cladding light with the same brightness as that of the low NA core laser, the self-developed ytterbium doped fiber with a size of $19\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ is adopted as the gain medium. When the ytterbium doped fiber is fused with an energy transfer fiber at the high reflective grid end, the core laser in the energy transfer fiber leaks to the cladding layer of the ytterbium doped fiber through the fiber core mismatch. Furthermore, the bending diameter of the fiber at the end of the high reflective fiber grating is less than 80 mm, which promotes the leakage of the high-order mode laser in the fiber core, so as to obtain the hundreds of watts level low NA cladding laser.

Results and Discussions The samples in Table 1 are used to strip the 180 W high NA pump laser with the test device shown in Fig. 1, and the obtained results are shown in Fig. 3. The power attenuation coefficient of the sample prepared by HF corrosion is the smallest, which is within 1 dB. The power attenuation coefficient of the sample prepared by KHF_2 corrosion increases gradually with the increase of corrosion time, and its value approaches 2 dB and then remains balanced. The power attenuation coefficient of the sample prepared by glass frosted paste corrosion is the largest, which is up to 16 dB, and its filtering performance for semiconductor laser is the best. The CLS light leakage diagrams of different samples are shown in Fig. 4. Judging from the light leakage shape, the scattering power density in the cladding layer is reduced. If the corrosion length increases, the scattering power density decreases. Therefore, KHF_2 is suitable for the first stage.

The prepared CLS by the composite corrosion process (Table 2) is used to strip the 343 W pump laser power with the device shown in Fig. 1, and the output power is only 2.22 W with no obvious fever. The test results are shown in Fig. 9(a), and the corresponding power attenuation coefficient is 21.9 dB. As shown in Table 2, the composite corrosion process is more suitable for a high power laser stripper. Connecting the CLS (Table 2) to the test device (Fig. 2) can reflect the actual application effect of a CLS. The power difference before and after CLS access is calculated and recorded as the stripping power, so as to evaluate the optical stripping ability of the CLS cladding. The test results are shown in Fig. 9(b). Both the laser output power and the CLS stripping power increase linearly with the increase of input power, indicating that CLS can work stably and strip a low NA 208 W cladding laser when the laser input power is 1173 W. The CLS device is suspended without heat sink scattering. The direction of the bold arrow in Fig. 11 indicates the laser transmission direction, and the thermal imaging diagram shows that the maximum temperature of CLS is only $41.3\ ^\circ\text{C}$, and the temperature field is evenly distributed.

Conclusions Based on the self-development PDF, the anhydrous cold CLS is prepared for a high power fiber laser. The gradient structure of CLS is prepared by optimizing the corrosion process and the surface structure of the optical fiber. When the pump light input power is 343 W, the power attenuation coefficient is 21.9 dB. The 1173 W input laser can be used to strip the 208 W low NA cladding light, and the working temperature of the stripper is stable below 45 °C. The CLS performance can meet the application requirements of high beam quality and stability high-intensity fiber lasers.

Key words lasers; cladding light stripper; power delivery fiber; segmented corrosion; fiber laser