

文章编号: 1001-3806(2017)06-0798-05

## 高功率光纤激光器的残留包层光滤除研究

李杰雄, 李波\*, 朱广志, 岳建堡, 王智用

(华中科技大学 光学与电子信息学院 激光加工国家工程中心, 武汉 430074)

**摘要:** 为了提高大功率双包层光纤激光器的光束质量、光谱特性以及光纤系统的稳定性,设计了一种用于滤除光纤内包层残留光的新型高功率包层光滤除器。采用蒙特卡洛算法以及光线轨迹追踪法对包层光滤除器进行了数值计算,评估包层光滤除器的滤除能力,并借助计算流体力学软件 ANSYS,分析包层光滤除器的温度场分布。结果表明,优化级联结构后的包层光滤除器的滤除效果达到 16.7dB,降低了包层光滤除器的热点温度,在 600W 的输入功率下,热点温度降低了 20.8℃,实现了包层光功率的均匀滤除;在滤除功率达到千瓦量级时,该包层光滤除器仍能够稳定工作在 70℃ 以内,满足大功率光纤激光器系统稳定运行的要求。

**关键词:** 光纤光学; 光纤激光器; 双包层光纤; 包层光滤除器**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.006

### Study on cladding light strippers in high power fiber lasers

LI Jiexiong, LI Bo, ZHU Guangzhi, YUE Jianbao, WANG Zhiyong

(National Engineering Research Center of Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to improve the beam quality and spectral characteristics of a high power double clad fiber laser and improve the stability of the optical fiber system, a novel high power cladding light stripper was designed to strip the residual optical power in the fiber cladding. High power cladding light stripper was analyzed through theoretical calculation and simulation analysis. Based on the Monte Carlo algorithm and light trajectory tracking method, the performance of the cladding light stripper was calculated. With the aid of computational fluid dynamics software ANSYS, the temperature field distribution of the cladding light stripper was analyzed. After optimizing the cascade model structure, strip efficiency of the stripper can reach up to 16.7dB, the hot-spot temperature of the cladding light stripper was reduced, and uniform strip was realized, hot-spot temperature was decreased 20.8℃ under the input power of 600W. The results show that the cladding light stripper can work stably at 70℃ when the power reaches the kilowatt level, it can meet the requirements of high power fiber laser systems.

**Key words:** fiber optics; fiber laser; double clad fiber; cladding light stripper

### 引言

近年来,随着光纤激光器、放大器的发展,光纤激光器的功率不断攀升,高功率光纤激光器已经成为一种应用广泛的工业加工激光器,对其光束质量以及系统的稳定性的要求也更加严格<sup>[1-2]</sup>。在双包层光纤激光器、放大器系统中,纤芯用来放大和传输信号光,而抽运光则限制在内包层中不断反射,通过掺杂的纤芯时被吸收,由于非线性效应的影响,增益光纤不能做得足够长,这直接导致了双包层光纤的内包层中残留了

一定的抽运光,在高功率光纤激光器中,这个功率可以达到百瓦级,而且,随着双包层光纤激光器输出功率的进一步提高,内包层中残留抽运光的功率将更高(达到千瓦级别)。除此之外还有增益光纤工作时产生的放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE),光纤弯曲、熔接时泄露到光纤内包层的信号光,以及一些由于外部反射而在包层中反向传输的杂散光。这些残留光在光纤内包层中传输,如果不滤除干净,将降低光纤激光器的光束质量,对光纤激光器系统后面链路中的器件产生很大的危害,因此,合理地处理这些残留的包层光已成为一件必要的事情<sup>[3-7]</sup>。

对双包层光纤内包层残留光的滤除,传统方法是在裸露内包层的光纤上涂覆一层高折射率的导光胶,并将其放在热沉的金属槽内以利于散热,由于涂覆了折射率大于内包层折射率的导光胶,破坏了光纤内外包层之间全反射的条件,从而使内包层的残留光泄露

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61308045);科技部中俄国际合作资助项目(2014DFR10870)

作者简介:李杰雄(1991-),男,硕士研究生,现主要从事高功率光纤激光器包层光滤除的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:libohust@126.com

收稿日期:2017-01-12;收到修改稿日期:2017-02-27

出去。但是,此种方法由于包层结构的突变,大量的光会在滤除器的前端泄露出去,产生大量的热,常常使前端的温度过高,从而极大地限制了包层光滤除器性能的进一步提高。为了使热量分布更加均匀,许多解决方案被提出,如:在一段光纤上涂覆 3 种折射率依次升高的导光胶<sup>[8]</sup>、使用级联的多段结构及折射率不同的导光胶<sup>[9]</sup>以及使用氢氟酸腐蚀内包层表面<sup>[10-12]</sup>等方法控制滤除速率。除此之外,还有利用软质金属材料填充吸收包层光<sup>[13]</sup>以及使用 CO<sub>2</sub> 激光器在裸露内包层的光纤上熔接石英管或在光纤表面上进行微加工<sup>[14-17]</sup>等方法进行双包层光纤中包层光的滤除。

本文中设计了一种新型的包层光滤除器,在裸露光纤内包层的表面涂覆折射率匹配的导光胶,制作特定形状的级联结构,破坏光纤内全反射的条件,将内包层的光直接滤除出内包层,并由吸热材料及流动的冷却水带走热量。与传统方法不同的是,吸热材料与光纤及导光胶不直接接触,且采用优化的级联结构实现内包层光的均匀滤除,减轻了热点温度对包层光滤除器的影响,提高了光纤激光器系统的热稳定性。

## 1 包层光滤除器的设计及原理

### 1.1 包层光滤除器的设计

包层光滤除器的目标是滤除光纤内包层的残留光,且满足两大原则:(1)在较短的距离内滤除残留的内包层光;(2)不能影响纤芯内传输的信号光。由于高功率双包层光纤激光器热效应严重制约着光纤激光器的输出功率和光束质量<sup>[18]</sup>,因此,应该均匀地将包层光滤除出来,避免集中滤除形成高温热点,影响包层光滤除器以及光纤激光器的稳定性。此外,散热方法对滤除器的温度控制也很重要。

双包层光纤由纤芯、内包层、外包层和保护层组成。如图 1 所示,将双包层光纤一定长度的涂覆层及外包层去除,在双包层光纤内包层的外表面,涂覆折射率大于或等于内包层折射率的导光胶,将涂覆的导光胶制作成特定形状的级联结构,破坏光线传播的全反射条件,使残留光折射出光纤内包层。然后,将所得到

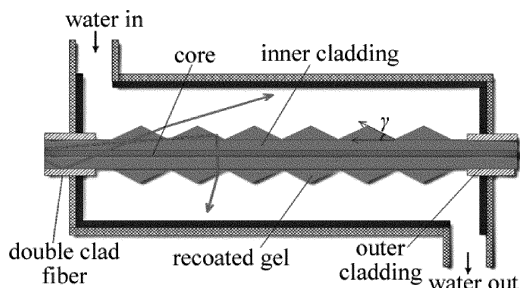


Fig. 1 Cross-section of cladding light stripper

的级联结构从冷却管套轴向穿过,在冷却套管内壁铺满吸热材料,以吸收从光纤包层滤出的光。并在冷却管道中通入循环流动的去离子水,进行冷却。

### 1.2 包层光滤除方法及原理

在双包层光纤中,信号光在线芯中传输,包层光在内包层与外包层界面被多次反射,只有满足全反射条件的光线才能被限制在包层内传输,在光纤内部通常存在子午光线和偏斜光线两类光线。图 2 所示为光纤内子午光线的全反射示意图。其中内包层折射率为  $n_2$ ,外包层折射率为  $n_3$ , $\theta_z$  为内包层内的光线与光纤轴线间的夹角。根据 Snell 定律,能够使光线在光纤纤壁界面产生内全反射的条件是:

$$\cos\theta_z \geq \frac{n_3}{n_2} \text{ 或者 } \sin\theta_z \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2} \quad (1)$$

因此对于子午光线,能产生全反射的约束条件为:

$$n_1 \sin\theta_i \leq \sqrt{n_2^2 - n_3^2} \quad (2)$$

式中, $\theta_i$  为光线入射角。阶跃型光纤的数值孔径  $D_{NA}$  为入射媒质折射率与最大入射角的正弦之积,即:

$$D_{NA} = n_1 \sin\theta_{i,m} = \sqrt{n_2^2 - n_3^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3)$$

式中, $\Delta$  为折射率差。则能够进入光纤且在光纤中传播的光线落在以  $\theta_{i,m}$  为锥角的圆锥之内,它表明了光纤内对传播光线的束缚能力与内外包层间的折射率差相关。

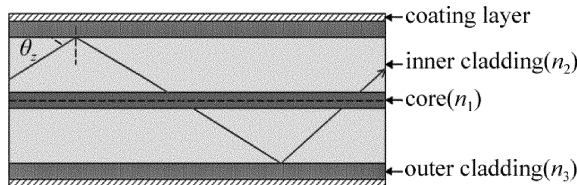


Fig. 2 All reflection of meridional ray

而对于偏斜光线,由于传播时不与纤轴相交,因而不限于单一平面内,光线轨迹为螺旋状折线,限制在圆筒内传播,由 Snell 定律及几何关系,在光纤端面有:

$$n_2 \sin\theta_2 = n_2 \sin\theta_z \leq \frac{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}}{\sin\theta_\phi} \quad (4)$$

因此,偏斜光线对应的数值孔径  $D_{NA_s}$  为:

$$D_{NA_s} = \frac{D_{NA}'}{\sin\theta_\phi} \quad (5)$$

式中, $D_{NA}'$  为子午光线数值孔径, $\theta_\phi$  为偏斜光线在光纤截面上的投影线与反射点处纤壁切线的夹角。由此可见,考虑到偏斜光线的贡献,光纤的实际收光能力比单纯考虑子午光线时更大。

双包层光纤中内包层的光经过滤除段时,由于涂覆的导光胶水的折射率与内包层的折射率匹配,将泄露到导光胶中传播。如图 1 所示,光线在涂覆层的出

射界面与光纤轴线成一定的角度  $\gamma$ , 由几何关系可以得出, 出射光线在涂覆层中的出射角将比光线在内包层中的出射角减小  $\gamma$ , 当涂覆层内出射角小于全反射临界角时, 出射光线将不满足全反射条件, 从而从涂覆层中折射出来。进一步地, 通过增大涂覆间隔, 改变涂覆层的密度, 可以降低包层光滤除出光纤的速率。通过这些参量的改变, 可以很容易地控制内包层残留光滤除出双包层光纤的速率, 从而优化包层光滤除器的结构, 达到均匀滤除内包层残留光的效果。

## 2 仿真分析与优化

### 2.1 理论模型研究与参量设定

如图3所示, 仿真所使用的双包层光纤的直径为  $20\mu\text{m}/400\mu\text{m}$  (纤芯/内包层), 数值孔径为  $0.06/0.46$  (纤芯/内包层), 长度为  $2\text{m}$ 。将包括螺旋模式的抽运光用透镜耦合进光纤内包层, 其中入射光线的数值孔径匹配内包层的数值孔径为  $0.46$ , 纤芯的模式为两种, 内包层中光的模式有上千种。在内包层中的抽运光虽然以多种不同的高阶模式进行传输, 这些光功率在空间分布上也是不尽相同的, 但是作为一个整体来看, 内包层中的光功率的空间角度分布可以当作均匀来对待。光纤尾端用功率计接收光纤末端出射的光, 用以监测输出的剩余光功率大小, 在仿真过程中, 功率计的位置可以移动, 用以监测不同位置输出的剩余光功率大小。在本文中, 为了对包层光滤除器的性能进行评估, 使用了蒙特卡洛算法以及光线轨迹追踪法, 模拟计算包层光滤除器的滤除能力, 假定纤芯中传输的信号光为基模, 而在内包层内存在着一定数量的高阶模式, 包层内光功率的空间角度分布假定为均匀, 输入到内包层的光功率大小设定为  $100\text{W}$ 。

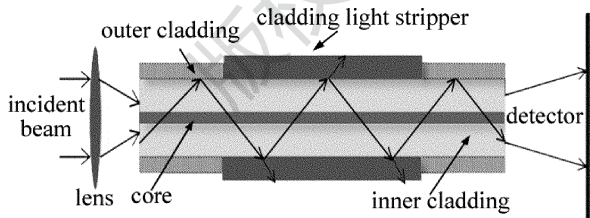


Fig. 3 Schematic diagram of simulation

### 2.2 包层光滤除器的性能

图4所示为所设计的包层光滤除器剖面图。将双包层光纤一段长度  $L = 7.00\text{cm}$  的外包层及保护层剥除, 在裸露的内包层上涂覆折射率为  $1.46$  的导光胶, 并制作成特定形状的级联结构, 用以破坏光纤内包层的全反射条件, 从而滤除包层光。应用理论模型计算得到长度为  $7.00\text{cm}$  的包层光滤除器末端输出的剩余光功率大小为  $3.65\text{W}$ , 获得的消光比为  $14.3\text{dB}$ 。剩余

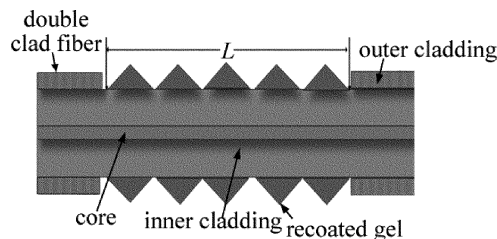


Fig. 4 Cross-section of the new cladding light stripper

光功率随滤除距离的关系, 如图5所示。前端的  $2\text{cm}$  滤出了将近  $80\%$  的光功率, 这些光功率将在包层光滤除器前端的吸热材料中吸收, 产生大量的热量, 使得包层光滤除器前端的散热压力比较大。

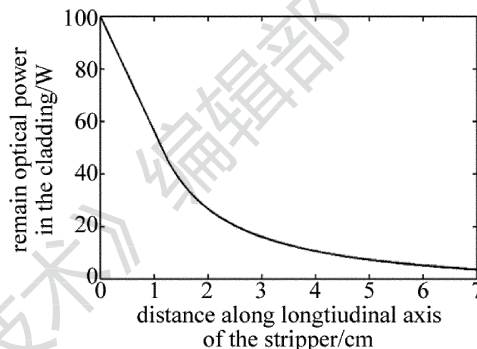


Fig. 5 Relationship between residual optical power and distance

### 2.3 包层光滤除器性能的优化

为了获得更为均匀的滤除效果, 可以考虑通过增加滤除长度, 降低涂覆层的密度, 并进行分段滤除, 每段实际滤除的总功率大小相当。如图6所示, 首先将双包层光纤中长度  $L = 12.00\text{cm}$  的外包层剥除分为5段, 各段长度分别为  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 2.00\text{cm}$ ,  $L_5 =$

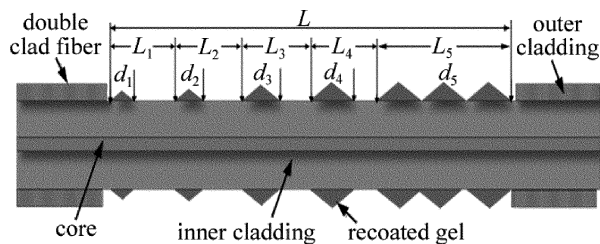


Fig. 6 Cross-section of the cladding light stripper after optimization

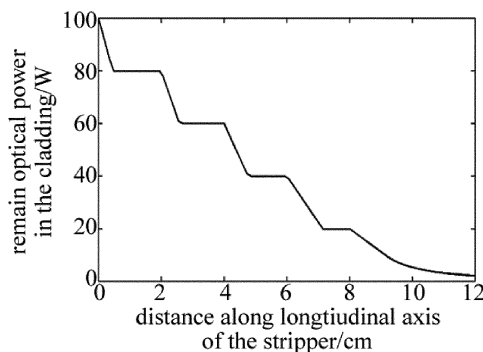


Fig. 7 Relationship between residual optical power and distance after optimization

4.00cm,依次在各段裸露的光纤外表面上涂覆导光胶,制成特定形状的级联结构,涂覆长度分别为  $d_1 = 0.46\text{cm}$ ,  $d_2 = 0.57\text{cm}$ ,  $d_3 = 0.76\text{cm}$ ,  $d_4 = 1.14\text{cm}$ ,  $d_5 = 4.00\text{cm}$ 。利用理论模型进行计算,得到模拟计算的结果,如图 7 所示。各段的滤除总功率均为 20W,相对于图 5,该包层光滤除器的滤除效果更加均匀;包层光滤除器末端输出的剩余光功率大小为 2.13W,获得的消光比为 16.7dB。

### 3 利用 ANSYS 进行温度场仿真

利用 ANSYS 的 CFD 模块对图 4 以及图 6 中的模型结构进行温度场的仿真分析,在外部用一块长度为 150mm、横截面是边长 20mm、厚度 5mm 的正方形铜管,将所设计的光纤结构包围,用以吸收滤除出的光能量并进行水冷。是将环境温度以及初始温度均设为 20.0℃,冷却的流体为去离子水,入口处的水温设定为 20.0℃,流速为 1.0m/s。仿真过程中,在不影响系统的传热及散热的基础上,忽略了影响较小的空气对流冷却以及辐射散热,并简化了仿真模型的细小特征以及系统封装等特征。在 100W 的输入功率下,仿真得到如图 8a、图 8b 所示的温度场分布图。图中右侧的温度梯度代表的是绝对温度,可以看到,优化结构前后的温升都较小,可见所设计的水冷结构带来了优秀的散热性能。随着输入功率的增加,在 600W 的输入

功率下,仿真得到如图 8c、图 8d 所示的温度场分布图。由此可以看到,优化前的结构,热量主要集中在滤除器的前端,产生了高温热点,最高温度为 66.2℃,经过优化后的结构,热量分布相对来说比较均匀,最高温度为 45.4℃,最高温度比优化之前下降了 20.8℃。

进一步可以发现,随着滤除功率的不断加大,优化前与优化后的包层光滤除器的最高温度都不断上升,如图 9 所示。但是,优化后的包层光滤除器的温度上升速度明显比优化前的温度上升速度更小。随着包层光功率上升到千瓦量级,更能体现优化后的包层光滤除器均匀滤除的优势。如图 10 所示,对于优化后的包层光滤除器模型,在滤除功率达到 1kW 量级时,最高温度仅为 62.3℃,仍在包层光滤除器能够稳定工作的温度范围内,能够满足高功率光纤激光器安全稳定运行的要求。

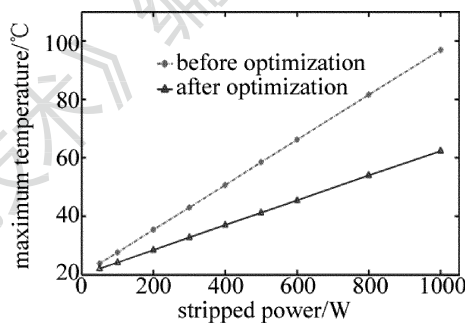


Fig. 9 Relationship between maximum temperature and stripped power

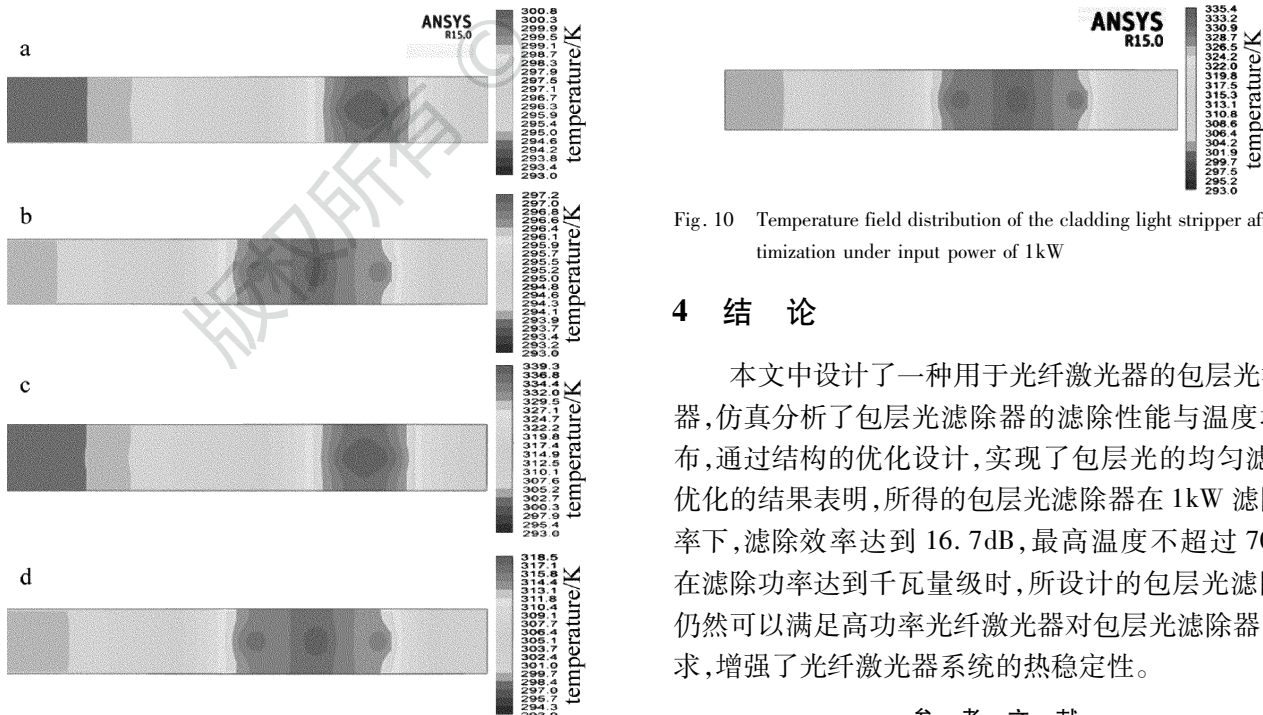


Fig. 8 Temperature field distribution

a—before optimization under input power of 100W b—after optimization under input power of 100W c—before optimization under input power of 600W d—after optimization under input power of 600W

Fig. 10 Temperature field distribution of the cladding light stripper after optimization under input power of 1kW

### 4 结论

本文中设计了一种用于光纤激光器的包层光滤除器,仿真分析了包层光滤除器的滤除性能与温度场分布,通过结构的优化设计,实现了包层光的均匀滤除。优化的结果表明,所得的包层光滤除器在 1kW 滤除功率下,滤除效率达到 16.7dB,最高温度不超过 70℃。在滤除功率达到千瓦量级时,所设计的包层光滤除器仍然可以满足高功率光纤激光器对包层光滤除器的要求,增强了光纤激光器系统的热稳定性。

#### 参考文献

[1] FANG G, XU X T, QUAN E CH, et al. Research of Yb-doped double-clad fiber lasers[J]. Laser Technology, 2014, 38(2): 278-282 (in Chinese).  
 [2] ZENG H F, XIAO F H, The development of Yb-doped double-clad fi-

- ber laser and its application[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 438-441 (in Chinese).
- [3] WETTER A, FAUCHER M, SÉVIGNY B. High power cladding light strippers[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, 6873: 687327.
- [4] ANDEREGG J, BROSNAN S J, THIELEN P A. System and method to remove light from cladding; US 7349596[P]. 2008-03-25.
- [5] KLINER D, TUCKER D A, LUGO J. Scalable cladding mode stripper device; US 8027555[P]. 2011-09-27.
- [6] MELESHKEVICH M, ILYASHENKO V, SHKURIKHIN O. High power fiber laser system with cladding light stripper; US 7839901 [P]. 2010-11-23.
- [7] ALESHKINA S, KOCHERGINA T A, BOBKOV K K, *et al.* High-power 125 $\mu\text{m}$ -optical-fiber cladding light stripper[C]//2016 Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO). Washington DC, USA: Optical Society of America, 2016: JTu5A. 106.
- [8] GUO W, CHEN Z, ZHOU H, *et al.* Comparison of different methods for stripping cladding light in the high-power fiber laser[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2013, 8904: 89041B.
- [9] GUO W, CHEN Z, ZHOU H, *et al.* Cascaded cladding light extracting strippers for high power fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1-6.
- [10] WANG W, LENG J, CAO J, *et al.* Method for stripping cladding light in the high power fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2013, 287(2): 187-191.
- [11] ESH R, NOROUZY A, GOLSHAN A H, *et al.* A novel method for stripping cladding lights in high power fiber lasers and amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(20): 3199-3202.
- [12] KLINER A, HOU K C, PLÖTNER M, *et al.* Fabrication and evaluation of a 500W cladding-light stripper[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2013, 8616: 86160N.
- [13] 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.
- [14] LANGSETH J E, MANL A E. All glass fiber laser cladding mode stripper; US 8433161 [P]. 2013-04-30.
- [15] LI T, WU J, SUN Y, *et al.* An improved method for stripping cladding light in high power fiber lasers[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9255: 92550M.
- [16] BANSAL L, SUPRADEEPA V R, KREMP T, *et al.* High power cladding mode stripper[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9344: 93440F.
- [17] BOYD K, SIMAKOV N, HEMMING A, *et al.* CO<sub>2</sub> laser-fabricated cladding light strippers for high-power fiber lasers and amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 2915-2920.
- [18] CHEN Z L, HOU J, JIANG Z F. Theoretical study on the thermal effect in Yb-doped double-clad high power fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 544-547 (in Chinese).