

## 国产 25/400 $\mu\text{m}$ 掺镱光纤实现 3.2 kW 激光输出

王 标, 庞 璐, 衣永青, 潘 蓉, 耿鹏程, 宁 鼎, 刘 君

(天津电子材料研究所, 天津 300220)

**摘 要:** 利用改进的化学气相沉积工艺结合溶液掺杂技术制备了高光束质量的 25/400  $\mu\text{m}$  双包层掺镱光纤。石英纤芯的掺杂组分为  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  有助于降低  $\text{Yb}^{3+}$  团簇, 增加  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度,  $\text{P}_2\text{O}_5$  起到降低光子暗化效应的作用。纤芯-包层折射率差为 0.001 2, 纤芯的数值孔径为 0.06。976 nm 波长处的包层吸收系数为 2.1 dB/m。构建双向抽运方式的主控振荡器功率放大器结构对增益光纤性能进行测试。实验中, 1 080 nm 种子光功率为 235 W, 在抽运光总功率为 3 706 W 时, 实现了最大功率 3 243 W 激光输出, 斜效率为 81.1%, 光束质量因子  $\beta$  为 1.7, 未发生受激拉曼散射现象。光纤激光器连续工作 1 h, 输出功率未见明显变化。采用相同测试方法及平台对 25/400  $\mu\text{m}$  型号的进口光纤进行测试, 对比实验结果表明: 实验中制备的双包层掺镱光纤主要性能指标已接近进口光纤。

**关键词:** 双包层掺镱光纤; 溶液掺杂; 光纤激光器; 高功率

**中图分类号:** TN244 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0706009

## 3.2 kW laser output by domestic 25/400 $\mu\text{m}$ Yb-doped fiber

Wang Biao, Pang Lu, Yi Yongqing, Pan Rong, Geng Pengcheng, Ning Ding, Liu Jun

(Tianjin Electronic Materials Institute, Tianjin 300220, China)

**Abstract:** A high power 25/400  $\mu\text{m}$  ytterbium doped double-cladding fiber (YDF) with excellent beam quality was successfully fabricated by MCVD in conjunction with solution doping technology. The dopants of the silica fiber core include  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$  could reduce the clustering of  $\text{Yb}^{3+}$  and increase the doping concentration.  $\text{P}_2\text{O}_5$  was helpful to restrain photodarkening phenomenon. The core-cladding refractive index difference is 0.001 2, corresponding to the core numerical aperture of 0.06. The value of the cladding absorption is 2.1 dB/m at 976 nm. Master oscillator power amplifier configuration based on two end pump was constructed to test the Yb-doped fiber performance. In the experiment, the power of the 1 080 nm seed is 235 W, the total power of the pump power is 3 706 W. The maximum output power is 3 243 W with a slope efficiency of 81.1%. The beam quality factor  $\beta$  was measured to be 1.7. Stimulated Raman scattering (SRS) has not been found in the output laser spectrum. The fiber laser continues to work for one hour, the output power is stable at 3 240 W. In addition, a kind of 25/400  $\mu\text{m}$  imported fiber was tested in the same experiment schematic. Comparative experimental results show that the performance of the domestic fiber is close to the imported fiber.

**Key words:** Yb-doped double cladding fiber; solution doping; fiber laser; high power

收稿日期: 2019-02-08; 修订日期: 2019-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61405179)

作者简介: 王标(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要从事特种光纤的研制等方面的研究。Email: biao\_wang@126.com

## 0 引言

光纤激光器具有电光转换效率、结构紧凑、光束质量好等优点,广泛应用于工业、国防、科研等领域<sup>[1-4]</sup>。自 20 世纪 80 年代开始,以掺镱光纤作为增益介质的光纤激光器开始受到人们的重视。1988 年,英国南安普顿大学 Hanna 领导的研究团队首次制备了掺镱光纤,并实现了 4 mW 的功率输出<sup>[5]</sup>。随着高亮度发光二极管、双包层掺镱光纤的制备工艺以及包层泵浦技术的发展,掺镱光纤激光器的单纤输出功率已由毫瓦级提升到万瓦量级。2004 年,南安普顿大学 Jeong 等设计 D 形内包层掺镱光纤(纤芯数值孔径 NA 为 0.05),输出功率达到 1.36 kW<sup>[6]</sup>;2009 年,美国 IPG 公司研制出 10 kW 的单模光纤激光器,其放大级抽运源为 1 018 nm 掺镱光纤激光器,不但增加了抽运源的亮度,而且降低了量子亏损,有效地抑制了掺镱光纤中的热效应;目前,IPG 公司已发布了 20 kW 的单模光纤激光器产品<sup>[7]</sup>。

作为光纤激光器的增益介质,双包层掺镱光纤的性能直接决定了光纤激光器的功率水平和激光性能。然而,国产双包层掺镱光纤在高功率激光输出时仍然受非线性效应、光子暗化效应等问题的影响,导致光纤激光器光束质量劣化,长时间工作时输出功率下降,严重降低激光器的使用性能<sup>[8-9]</sup>。因此,制备高功率稳定性、高光束质量的双包层掺镱光纤受到了越来越多的科研工作者的关注。

目前,制备掺镱光纤的方法主要有 MCVD 结合溶液掺杂法<sup>[10]</sup>,MCVD 结合螯合物气相掺杂法<sup>[11-12]</sup>,直接沉积法<sup>[13]</sup>等。其中,MCVD 结合溶液掺杂法因其技术成熟、操作方便,掺杂物可选择范围广等原因,成为目前制备双包层掺镱光纤最通用的方法。

文中通过 MCVD 结合溶液掺杂法制备 25/400  $\mu\text{m}$  双包层掺镱光纤,并搭建主功率振荡放大器(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)对掺镱光纤进行测试。采用 976 nm LD 作为抽运源,抽运总功率 3 706 W 时,光纤输出功率达到 3 243 W,连续工作 1 h,未发生光子暗化现象,输出激光光束质量因子  $\beta$  为 1.7。将实验中制备的掺镱光纤的主要性能参数(吸收系数、输出功率、斜率效率、光束质量、受激拉曼散射阈值、光子暗化效应)与同规格进口光纤进

行对比,结果表明目前研制的掺镱光纤性能已接近进口光纤。

## 1 实验设计

### 1.1 MCVD 结合溶液掺杂法制备光纤预制棒

实验中采用 MCVD 结合溶液掺杂法制备 25/400  $\mu\text{m}$  双包层掺镱光纤。光纤的制备过程为:(1) 在反应管内壁上沉积隔离层,沉积温度为 1 800~2 100  $^{\circ}\text{C}$ ,隔离层主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、F,目的是避免石英反应管中残留的  $\text{OH}^-$  在高温下反应时扩散入纤芯,纤芯中存在  $\text{OH}^-$  会造成光纤本底损耗的增加。隔离层中掺入 P 会提高隔离层的折射率,因此,需通入微量的  $\text{SF}_6$  使折射率降低,从而达到隔离层折射率和包层折射率相互匹配的目的;(2) 在隔离层上沉积疏松层,沉积温度为 1 200~1 500  $^{\circ}\text{C}$ ,疏松层的主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 。通过在纤芯中掺入  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,石英基质中形成  $\text{Al}-\text{O}-\text{Yb}$  键,其键长大于  $\text{Yb}-\text{O}-\text{Yb}$  键,因此  $\text{Yb}^{3+}$  之间的距离增加,避免了因稀土离子 Yb 高浓度掺杂带来的团簇效应,有效提高了  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂含量。 $\text{P}_2\text{O}_5$  的掺入可以有效降低氧缺陷,抑制光子暗化现象;(3) 将  $\text{YbCl}_3$  溶液注入内部沉积疏松芯层的反应管,充分浸泡,使  $\text{Yb}^{3+}$  充分扩散、吸附在疏松层中,形成芯层;(4) 对反应管进行干燥、脱水,并在高温下将中空反应管缩成实心预制棒;(5) 根据预制棒纤芯与包层直径的比例,对掺杂预制棒进行套管、磨八边形等加工处理;(6) 利用光纤拉丝塔将八边形预制棒拉制成设计尺寸的光纤并进行涂覆。

### 1.2 激光性能测试方案

激光性能测试装置采用 MOPA 结构,如图 1 所示。种子源的输出波长为 1 080 nm,尾纤尺寸为 20/400  $\mu\text{m}$ 。纤芯中的种子光经前向(6+1) $\times$ 1 合束器

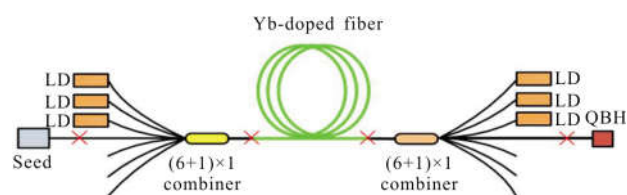


图 1 双向抽运光纤放大器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the bidirectionally pumping fiber amplifier

的信号臂注入放大级。(6+1)×1 合束器的信号臂为双包层光纤,其纤芯与内包层直径为 25/250 μm,泵浦臂为多模光纤,其纤芯与包层直径为 220/242 μm,输出纤为双包层光纤,其纤芯与内包层直径为 25/400 μm。

在放大级结构中,泵浦源为六台 976 nm LD,输出尾纤为三包层光纤,尺寸为 200/220/360 μm。三台 LD 与前向泵浦合束器泵浦臂相熔接。三台 LD 与后向泵浦合束器泵浦臂熔接。LD 尾纤尺寸大于泵浦臂内包层直径,需用氢氟酸腐蚀 LD 尾纤,使二者内包层直径相同,再进行熔接。放大级中的增益光纤采用实验中制备的双包层掺镱光纤,后向(6+1)合束器的信号纤与 QBH 输出头熔接,防止高功率下对输出端造成损伤。功率计测量输出功率,光谱仪测量激光输出光谱。

$$N_2(z) = \frac{\frac{[P_p^+(z)+P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{[P_s^+(z)+P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s}{h\nu_s A_c}}{\frac{[P_p^+(z)+P_p^-(z)]\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{[P_s^+(z)+P_s^-(z)](\sigma_{as}+\sigma_{es})\Gamma_s}{h\nu_s A_c} + \frac{1}{\tau}} \quad (5)$$

式中: $P_p^+(z)$ 为增益光纤不同位置处前向抽运光功率; $P_p^-(z)$ 为后向抽运光功率; $P_s^+(z)$ 为前向传输信号光功率; $P_s^-(z)$ 为后向传输信号光功率; $\sigma_{ap}$ 、 $\sigma_{as}$ 分别为抽运光和激光的吸收截面; $\sigma_{ep}$ 、 $\sigma_{es}$ 分别为抽运光和激光的发射截面; $\nu_p$ 、 $\nu_s$ 分别为抽运光和激光的频率; $h$ 为普朗克常数; $\tau$ 为 Yb 粒子上能级的寿命; $A_c$ 为纤芯面积; $N$ 为 Yb<sup>3+</sup>的掺杂浓度。

两端抽运光功率分别为 1 855 W 时,增益光纤上信号光以及泵浦光功率的分布情况如图 2 所示。经仿真计算,光纤的输出功率为 3 460 W。

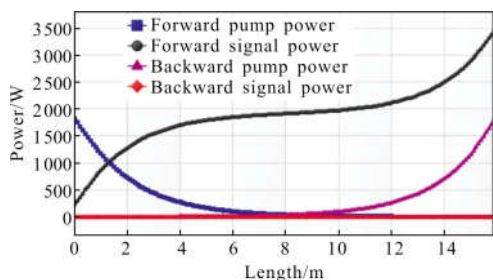


图 2 泵浦光和信号光沿增益光纤的功率分布

Fig.2 Power distribution of pump light and signal laser along the gain fiber

## 2 数值分析

对端面抽运双包层掺镱光纤激光器,建立速率方程组:

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = \Gamma_p[(\sigma_{ap}+\sigma_{ep})N_2(z)-\sigma_{ap}N]P_p^+(z)-\alpha_p P_p^+(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = -\Gamma_p[(\sigma_{ap}+\sigma_{ep})N_2(z)-\sigma_{ap}N]P_p^-(z)-\alpha_p P_p^-(z) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_s^+(z)}{dz} &= \Gamma_s[(\sigma_{as}+\sigma_{es})N_2(z)-\sigma_{as}N]P_s^+(z)+ \\ &\Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)P_0-\alpha_s P_s^+(z) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_s^-(z)}{dz} &= -\Gamma_s[(\sigma_{as}+\sigma_{es})N_2(z)-\sigma_{as}N]P_s^-(z)- \\ &\Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)P_0+\alpha_s P_s^-(z) \end{aligned} \quad (4)$$

## 3 实验结果与讨论

光纤预制棒样品的折射率分布由 Photon Kinetics 2600 预制棒分析仪测量。如图 3 所示。预制棒芯-包层折射率差为 0.001 2,对应光纤的数值孔径 NA 为 0.06。从折射率分布中可以看出,芯层折射率波动较小,这说明纤芯中各掺杂元素分布较为均匀。

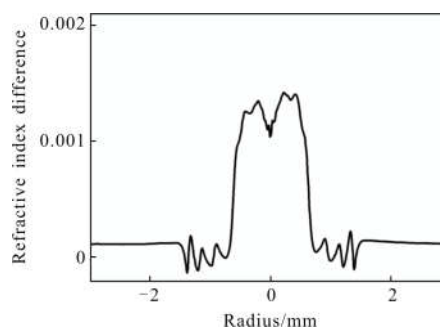


图 3 光纤预制棒折射率差分布

Fig.3 Refractive index difference distribution of optical fiber preform rod

为避免螺旋光的产生,提高纤芯对包层泵浦光的吸收,将掺镱光纤预制棒设计为八边形结构。拉丝

后,双包层掺镱光纤的截面图如图 4 所示。纤芯直径为 25.4  $\mu\text{m}$ ,内包层直径(边-边)为 401.2  $\mu\text{m}$ 。

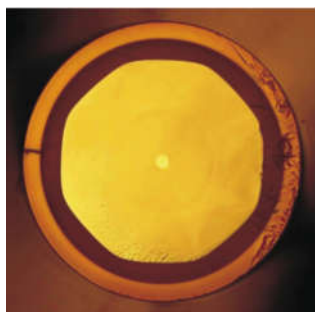


图 4 25/400  $\mu\text{m}$  掺镱光纤截面图

Fig.4 Cross section of the 25/400  $\mu\text{m}$  Yb-doped fiber

利用白光光源作为注入源,采用截断法对掺镱光纤内包层的吸收系数进行测量,测量结果如图 5 所示。图中黑色曲线为实验中研制的 25/400  $\mu\text{m}$  型双包层掺镱光纤样品的吸收谱线,红色曲线为同规格进口光纤的吸收谱线。从图 5 中可以看出,光纤的吸收峰在 915 nm 与 976 nm 附近。其中,实验中制备样品的吸收系数为 2.1 dB/m@976 nm。进口光纤吸收系数为 2.2 dB/m@976 nm。

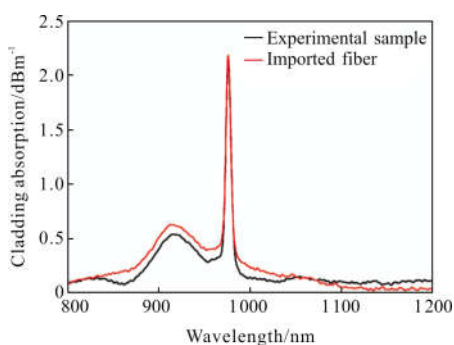


图 5 掺镱光纤的吸收系数

Fig.5 Cladding absorption of the Yb-doped fiber

实验中,1 080 nm 种子光的功率为 235 W,放大级中的增益光纤长度优化为 16 m,输出激光光谱如图 6 所示。信号光的强度随着泵浦光功率的增加,峰值不断提高。实验中没有做泵浦倾泻处理,从激光光谱中可以看出 976 nm 波长处有少量残余泵光。当输出功率为 3 243 W 时,信号光与残余泵浦光之差接近 23 dB,残余泵浦光仅占总输出功率的 0.5%。信号光的中心波长为 1 080.1 nm,3 dB 带宽为 3.1 nm。在光谱中,1 130 nm 波长附近没有新的峰产生,表明

制备的掺镱双包层光纤的受激拉曼散射阈值大于 3 200 W。

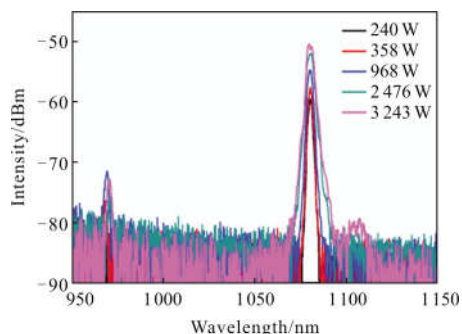


图 6 激光输出光谱随抽运光功率的变化

Fig.6 Variation of laser output spectrum with pumping power

输出激光功率随着泵浦光功率的变化如图 7 所示。其中黑色的点为实验中制备的光纤样品的数据。从图 7 中可以看出,实验样品的输出激光功率随着泵浦光的提高而线性增强,最高的输出功率为 3 243 W,此时泵浦输入功率为 3 709 W,斜效率为 81.1%,与仿真结果接近。在 3 243 W 时,测量输出激光的光束质量因子  $\beta$  为 1.7。图 7 中红色的点为 25/400  $\mu\text{m}$  型进口光纤输出功率随着泵浦光功率的变化。实验中,种子源功率为 246 W,双向抽运总功率为 3 681 W,最高输出功率为 3 292 W,放大级提取效率为 82.7%,未发现受激拉曼散射现象。在 3 292 W 时,测量激光的光束质量因子  $\beta$  为 1.35。

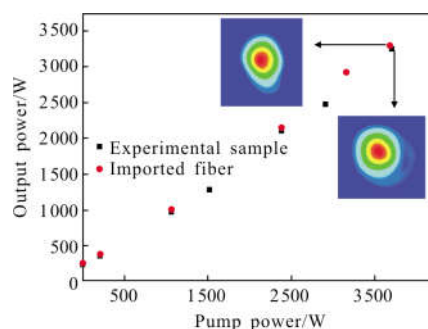


图 7 激光抽运功率与输出功率的关系(内嵌图分别为 3.2 kW 输出功率时的光束质量)

Fig.7 Relationship between laser pumping power and the output power (The inset represent for beam quality of 3.2 kW laser output)

分别对掺镱光纤实验样品和进口光纤进行 3.2 kW 激光输出功率稳定性测试,如图 8 所示。连续工作一小时,实验中制备的样品的输出功率维持在 3 240 W,



光功率衰减不明显。这说明共掺剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  对光纤的光子暗化的抑制作用效果明显。进口光纤输出功率水平维持在 3 290 W, 光功率未见明显变化。

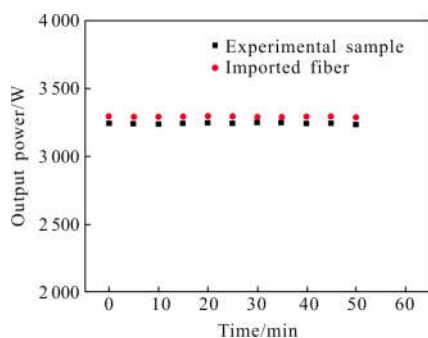


图 8 3 kW 激光输出 1 h 的功率稳定性

Fig.8 Power stability of 3 kW laser output in 1 h

将实验中制备的样品与进口光纤主要性能指标进行对比, 列入表 1 中。可以看出, 实验中研制的 3.2 kW 级双包层掺镱光纤样品性能已接近进口光纤。在光束质量、斜效率等方面与进口光纤存在差距的原因在于目前 MCVD 工艺制备的预制棒芯区的折射率分布仍不够均匀。纤芯石英基质中共掺 Yb/Al/P, 在高温缩棒过程中, P 容易挥发, 导致折射率中心凹陷偏大, 从而造成输出激光中仍存在一定的阶模, 劣化了光束质量, 影响了发光效率。

表 1 实验样品与进口光纤性能对比

Tab.1 Performance comparison of the experimental sample and imported fiber

	Cladding absorption @976nm / $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	Output power /W	Slope efficiency	Beam quality factor $\beta$	SRS threshold /kW	Photon darkening
Experimental sample	2.1	3 243	81.1%	1.7	>3.2	No
Imported fiber	2.2	3 290	82.7%	1.35	>3.2	No

## 4 结论

文中采用 MCVD 结合溶液掺杂法成功制备 Yb/Al/P 共掺双包层光纤。光纤纤芯直径为  $25.4\ \mu\text{m}$ , 内包层(边-边)直径为  $401.2\ \mu\text{m}$ 。光纤在 976 nm 波长

处的吸收系数为 2.1 dB/m。当种子光功率为 235 W, 抽运光总功率为 3 706 W, 实现了 3.2 kW 以上的功率输出, 放大级提取效率达到 81.1%, 中心波长为 1 080.1 nm, 未出现受激拉曼散射现象。激光器工作在 3.2 kW 时, 测量光束质量因子  $\beta$  为 1.7。高功率下, 光纤激光器持续工作一小时, 输出功率未见明显变化, 这说明 Al、P 共掺对掺镱光纤的光子暗化效应抑制效果良好。同时, 将光纤的技术指标(吸收系数, 输出功率, 斜率效率, 光束质量, 受激拉曼散射阈值, 光子暗化效应)与同型号进口光纤进行全面对比, 目前笔者单位制备的光纤性能已接近进口光纤, 这对推动激光光纤国产化, 打破国外垄断市场, 具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Lin Honghuan, Guo Chao, Zhao Pengfei, et al. Design and experiment of 10 kW class monolithic fiber pump coupling device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S206003. (in Chinese)
- [2] Shi Wei, Fang Qiang, Li Jinhui, et al. High-performance fiber lasers for LIDARs[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0802001. (in Chinese)
- [3] Liu Liang, Cui Junwei, Li Wenjing, et al.  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad quasi-continuous wave fiber laser pumped by laser diode[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 664-670. (in Chinese)
- [4] Shen Zhaoguo, Zhang Ping. A neodymium-doped fiber laser and frequency doubling numerical simulation [J]. *Chinese Optics*, 2008, 1(1): 105-111. (in Chinese)
- [5] Hanna D C, Percival R W, Perry I R, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode ytterbium-doped fiber laser [J]. *Electron Lett*, 1988, 24(17): 1111-1113.
- [6] Jeong Y E, Sahu J, Payne D, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [7] Lei Chengmin, Gu Yanran, Chen Zilun, et al. Developments of high power all-fiber side-pumping combiner [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1561-1567. (in Chinese)
- [8] Liu Chaoping, Liao Lei, Li Jinyan. Research progress on photodarkening of Yb-doped fiber lasers [J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070002. (in Chinese)
- [9] Wang Zhiyong, Zhang Jing, Ge Tingwu, et al. Highly coupling efficient mode-field adaptors for high power fiber

- lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 319–324. (in Chinese)
- [10] Wang Zehui, Xiao Qirong, Wang Xuejiao, et al. 3 000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber [J]. *Acta Phys Sin*, 2018, 67(2): 124–130. (in Chinese)
- [11] Zheng Jinkun, Zhao Wei, Zhao Baoyin, et al. 4.62 kW excellent beam quality laser output with a low-loss Yb/Ce co-doped fiber fabricated by chelate gas phase deposition technique [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1259–1266. (in Chinese)
- [12] Maitreyee Saha, Sourav Das Chowdhury, Nishant Kumar Shekhar, et al. Yb-doped pedestal silica fiber through vapor phase doping for pulsed laser applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 1022–1025.
- [13] Koponen J J, Petit L, Kokki T, et al. Progress in direct nanoparticle deposition for the development of the next generation fiber lasers [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 111605.