

基于掺杂粉末直拉棒工艺掺镱光子晶体 光纤激光特性

夏长明^{1,2} 田洪春^{1,2} 侯峙云^{1,2} 刘建涛^{1,2} 张 飒^{1,2} 张 卫^{1,2} 付 建^{1,2} 吴嘉乐^{1,2} 周桂耀^{1,2*}

¹华南师范大学信息光电子科技学院 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006

²广东高校特种功能光纤工程技术研究中心, 广东 广州 510006

摘要 采用掺杂粉末直拉棒工艺制备了一种小芯径的掺镱光子晶体光纤。以此光纤为增益介质, 抽运波长为 976 nm, 实现了波长为 1045 nm 激光连续输出。并研究了抽运功率与光纤长度对激光性能的影响。受限于光纤的小芯径尺寸, 该光纤激光器系统激光输出功率最大仅为 0.42 W, 激光斜率效率仅为 33%。实验结果表明, 利用掺杂石英粉末直拉棒工艺制备的掺镱光子晶体光纤有望应用于高功率光纤激光器的研制。

关键词 光纤光学; 掺镱光子晶体光纤; 光纤激光器; 非化学气相沉积法; 掺杂粉末直拉棒工艺

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0205001

Laser Performance of Yb³⁺-Doped Photonic Crystal Fiber Using the Powder Sinter Direction Drawn Rod Technology

Xia Changming^{1,2} Tian Hongchun^{1,2} Hou Zhiyun^{1,2} Liu Jiantao^{1,2} Zhang Sa^{1,2}
Zhang Wei^{1,2} Fu Jian^{1,2} Wu Jiale^{1,2} Zhou Guiyao^{1,2}

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

²Specially Functional Fiber Engineering Technology Research Center of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract A kind of Yb³⁺-doped photonic crystal fiber with small core fabricated using the powder sinter direction drawn rod technology is reported. Using the Yb³⁺-doped photonic crystal fiber as the laser gain medium, a fiber laser with the central wavelength of 1045 nm is obtained with the excitation of 976 nm by using the laser diode. In addition, the influence of the fiber length on the laser properties of fiber laser is experimentally investigated. The maximum output power is limited to 0.42 W by available small fiber core. The slope efficiency is 33%. The results show that the Yb³⁺-doped photonic crystal fiber fabricated in the powder sinter direction drawn rod technology can be used as the potential optical material for the high power fiber laser.

Key words fiber optics; Yb³⁺-doped photonic crystal fiber; fiber laser; non-chemical vapor deposition method; powder sinter direction drawn rod technology

OCIS codes 140.3540; 140.3380; 300.6360

1 引 言

高功率光纤激光器因具有高的光束质量、高的转换效率、好的稳定性、结构简单等优点越来越受到人们

收稿日期: 2015-07-22; 收到修改稿日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(2010CB327604)、广东省自然科学基金项目(S2013040015665)、高等学校博士学科点专项科研基金(20134407120014)

作者简介: 夏长明(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事特种光纤制备及应用方面的研究。E-mail: xiaccmm@126.com

*通信联系人。E-mail: zguyao@163.com

的普遍关注^[1-2],尤其是高功率光子晶体光纤(PCF)激光器^[3-6]。由于光子晶体光纤激光器所使用的PCF具有传统光纤所不具有的一些特性,如无限单模特性、色散可调以及超大模场面积等特性,从而使PCF激光器具有更加广阔的发展前景。目前普通掺镱光纤激光器输出功率已达百千瓦量级^[7-8],掺镱PCF激光器的输出功率也已达千瓦量级^[9]。2009年,IPG公司的Stiles^[10]报道了单模输出功率高达10 kW量级的掺镱双包层光纤激光器。2013年IPG公司将掺镱双包层光纤激光器激光输出功率提高到百千瓦量级^[7]。2014年10月,德国耶拿大学Otto等^[9]利用镱离子掺杂PCF作为主放大介质,实现平均功率为2 kW的皮秒脉冲输出。目前国内已有许多掺镱PCF激光器的报道,但实验中所用的增益介质——掺镱PCF,大多采用改进化学气相沉积与溶液掺杂工艺相结合制备而成^[11-12],而利用其他工艺制备的掺镱PCF报道很少^[13-17]。2013年9月中国科学院上海光学精密机械研究所王世凯等^[18]报道了一种利用溶胶凝胶法制备的大模面积掺镱PCF搭建的PCF激光器,该激光器中心波长为1040 nm,输出激光功率为34.6 W,斜率效率为62%。2015年1月,华南师范大学特种光纤研究中心利用激光烧结制备与溶液法相结合制备的大模面积掺镱PCF搭建的PCF激光器,实现了中心波长为1040 nm,功率为5.03 W的激光输出,斜率效率高达70.6%^[19],同年7月,采用等离子体非化学气相沉积法制备的掺镱PCF,以其为激光增益介质实现了2.16 W激光输出,斜率效率达到了58.4%^[20]。

本文在前期特种光纤制备工艺研究基础上^[21-25],利用掺杂石英粉末直拉棒工艺制备了一种小芯径掺镱PCF,并对其进行了光学性能的实验研究。受限于光纤的小芯径尺寸,以该光纤为增益介质的PCF激光器获得的连续激光输出功率为0.42 W,斜率效率为33%,激光的中心波长为1045 nm。此外,实验研究了光纤长度对光纤激光器输出特性的影响。实验结果表明,利用掺杂石英粉末直拉棒工艺制备的掺镱PCF有望用于发展高功率光纤激光器的研制。

2 掺镱PCF制备

掺镱PCF的制备过程分为掺镱石英棒制备、掺镱PCF预制棒制备和掺镱PCF制备3个过程。掺镱石英棒制备采用的是掺杂粉末直接拉棒工艺,该方法与溶液掺杂和溶胶凝胶法^[16]相比,具有制备工艺简单、成本相对较低的特点。其具体过程如下:1)根据玻璃组分的配方称取相应的原料,混合均匀形成掺杂石英粉末;2)放入球磨机中研磨到适合大小;3)将研磨后的粉末装入高纯的石英管中置于高温炉(800 ℃)内进行排空烧结;4)将装满掺杂粉末的石英玻璃管移植固定在拉丝塔的送棒系统上;5)在2000 ℃左右的高温下将其拉制成所需的掺镱石英棒。值得注意的是:为了消除石英玻璃棒的气泡,拉制过程中,要保持玻璃管内为真空状态,真空度为 10^{-4} 。实验中制备的掺镱石英棒如图1所示,其组分为 $0.2\text{Yb}_2\text{O}_3-1.5\text{Al}_2\text{O}_3-98.3\text{SiO}_2$ (0.2、1.5、98.3分别指对应组分所占的摩尔分数),其中原材料纯度分别为99.99%、99.99%、99.9999%^[15]。共掺 Al^{3+} 的目的是提高纤芯稀土掺杂浓度,此外掺入 Al^{3+} 也可有效改善光纤的激光特性,因为 Al^{3+} 可以增大斯塔克能级分裂值,使稀土离子的吸收和荧光光谱展宽,从而增加抽运波长的带宽,增大输出激光的可调谐范围^[16]。PCF预制棒的制备采用的是堆积石英玻璃管的方法,预制棒中心部分的石英管用掺镱石英棒替代,从而制备出掺镱PCF预制棒。其后将掺镱PCF预制棒固定特种光纤拉丝塔送棒系统上,在2000 ℃左右的高温下,拉制出所需规格的掺镱PCF。制备的掺镱PCF结构如图2所示,该光纤包层有8层空气孔组成,其具体结构参数如表1所示,表中HT和HR表示高透和高反。



图1 掺镱石英棒

Fig.1 Yb^{3+} -doped silica rod

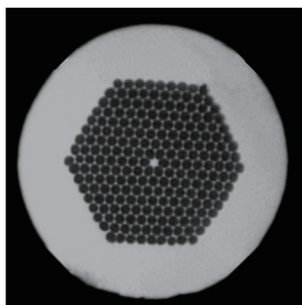


图2 掺镱 PCF 端面图

Fig.2 Cross-section of the Yb³⁺-doped PCF

表1 光纤结构参数及实验装置参数一览表

Table 1 Parameters of fiber structure and various components used in the experiment

Component	Parameter	Value
PCF preform	Diameter	30 mm
	Air holes diameter	1 mm
	Core diameter	1 mm
	Absorption	7.3 dB/m at 976 nm
	Length	1.25 m
Yb ³⁺ -doped PCF	Fiber diameter	341 μm
	Air diameter	10.7 μm
	Pitch	12.04 μm
	Core/cladding diameter	(10.7/190) μm
	Core refractive index	1.463 at 589 nm
	Numerical aperture	0.38 at 793 nm
Dichroic mirror	HT	HT >85% at 520~980 nm; 45° angle of incidence
	HR	HR >90% at 1020 ~1550 nm;
	Lens1, lens2	10 mm and 6 mm of focal length; 6 mm of diameter
Laser diode	Power	22 W at 976 nm

3 实验结果与分析

3.1 吸收和荧光特性

掺镱 PCF 的吸收光谱如图 3 所示。从图 3 中可以看出,掺镱 PCF 在 800~1100 nm 波长范围内具有较宽的吸收光谱,出现 2 个强的吸收带,强而窄的主吸收峰中心波长为 975 nm,弱而宽的次吸收峰中心波长在 916 nm,其对应的是 Yb³⁺ 离子基态能级 ²F_{7/2} 到激发态能级的 ²F_{5/2} 跃迁^[26]。图 4 为掺镱 PCF 的荧光光谱图,在 976 nm 波长抽运作用,该光纤的荧光峰中心波长位于 1037 nm,荧光半峰全宽为 27 nm。

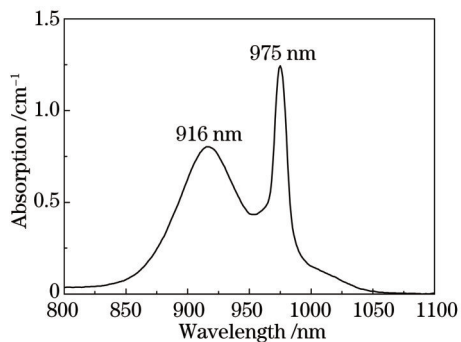


图3 掺镱 PCF 的吸收光谱

Fig.3 Absorption spectrum of the Yb³⁺-doped PCF

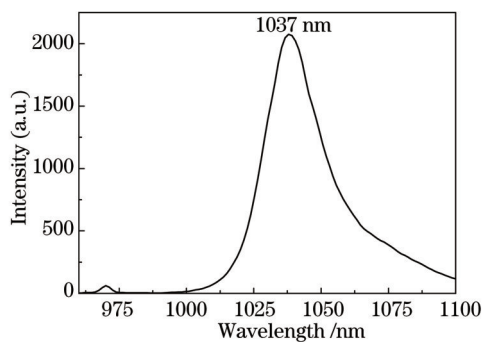


图4 掺镱 PCF 的荧光光谱图

Fig.4 Fluorescence spectrum of the Yb³⁺-doped PCF

3.2 光纤激光性能

为了测试光纤激光性能,搭建了如图5所示的掺镱 PCF 激光器,抽运光源为 976 nm 半导体激光器,DM1 和 DM2 为 45° 二向色镜(980 nm 处高透,1030 nm 处高反),光纤端面(端面存在 4% 的非涅耳反射)与全反镜组成激光器的简易法布里-珀罗(F-P)腔。抽运光首先通过由 lens1 和 lens2 扩束聚焦系统后聚焦耦合进入掺镱 PCF,产生的激光经二向色镜 DM1 反射输出。二向色镜 DM2 与滤光片的作用是滤除多余的抽运光。实验装置的具体参数如表 1 所示,实验中所用光纤长度为 1.25 m。利用该光纤搭建的激光器,激光中心波长为 1045 nm,激光光谱的半峰全宽为 6 nm(实验中所用光谱仪为 Ocean Optics Maya 2000 Pro,分辨率为 1.85 nm)。图 6 为不同抽运功率条件下输出的光谱图。从图 6 中可以看出,当抽运功率低于光纤激光器阈值时,仅产生了放大的自发辐射(ASE)光谱,随着抽运功率的增加,抽运功率超过激光器的阈值条件,光纤激光器的输出 ASE 光谱开始压缩,光纤激光器输出窄而高的激光光谱。图 7 为激光器输出功率随抽运光功率的变化曲线,其中图 7 的右下方插图即为激光器抽运功率为 0.4 W 时,激光器的输出光谱。此外,图 7 中还展示了光纤激光器的模场图,如图 7 左上图所示。从图中可以看出,模场分布呈高斯型模场分布,说明该光纤激光器运行模式为单模。受限于光纤的小芯径尺寸,该光纤激光器最大输出功率为 0.42 W,斜率效率为 33%。实验分析认为由于所制备的光纤为小芯非双包层微结构光纤,因而耦合效率受到一定的限制,这导致了纤芯的耦合功率较低,进而限制了光纤激光器最大输出功率。目前,掺杂粉末直拉棒工艺能够制备直径在 1~10 mm 掺镱石英基玻璃棒,完全具备制备大模场面积光子晶体光纤能力,因此通过设计结构合理的 PCF,如大模场双包层掺镱 PCF^[27-30],可以有效地增加光纤激光器的输出功率及斜率效率。因此,利用此工艺控制的大模场双包层掺镱 PCF 有望应用于高功率光纤激光器的开发。

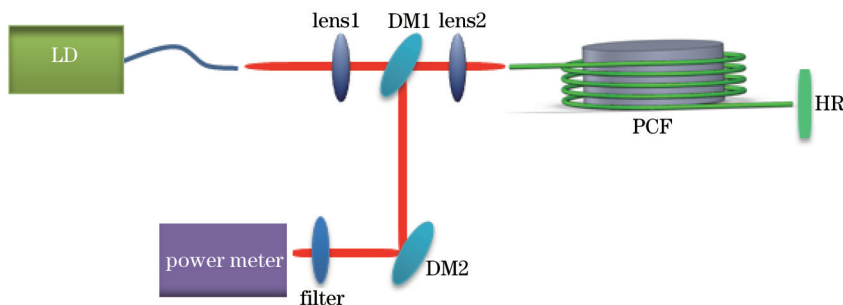


图5 PCF 激光器装置图

Fig.5 Schematic of photonic crystal fiber laser experiment

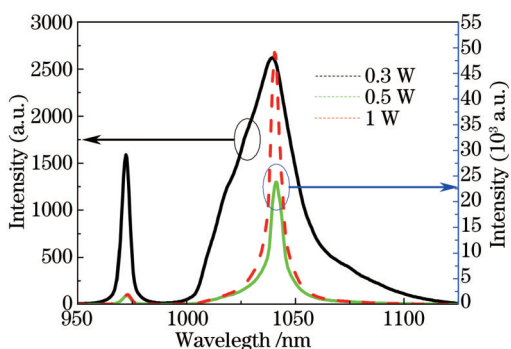


图6 激光器光谱随抽运功率变化

Fig.6 Laser output spectra under the different absorbed pump powers

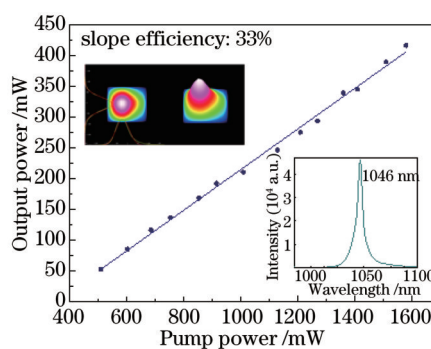


图7 激光输出功率随抽运光功率的变化。上插图: 光纤激光器模场分布图; 下插图: 抽运功率为 0.4 W 的输出光谱
Fig.7 Measured laser output power plotted under the different absorbed pump powers. Up inset: beam quality profile of the output laser; down inset: laser output spectrum when the pump power is 0.4 W

3.3 光纤长度对激光性能的影响

实验研究了光纤长度对激光性能的影响,不同增益光纤长度条件下,激光器的输出光谱如图8所示。从

图 8(a)可以看出,当实验中所用增益光纤长度为 5 m 时,在 1075 nm 波长处出现了 1 个窄而高的激光峰,该激光器实现了波长为 1075 nm 连续激光输出;光纤长度为 3.5 m 时,该激光器出现了 2 个窄而高的激光峰,中心波长分别为 1045 nm 和 1075 nm,如图 8(b)所示,此即说明激光器可以在 1045 nm 和 1075 nm 波长处可以同时满足自激振荡条件,实现双波长连续激光输出。当进一步减小光纤长度时,如图 8(c)所示,在 1045 nm 波长处出现了 1 个窄而高的激光峰,这就表明此时激光器仅在波长 1045 nm 处产生激光,1075 nm 波长处的激光得到了有效抑制。根据实验分析可知,产生该现象的原因如下:对所制备的小芯径掺镱 PCF 来说,其发射带在 1000~1100 nm 的波长范围,发射主峰位于 1037 nm 左右(由荧光光谱图 4 可知),且 Yb^{3+} 在 1045 nm 波段的吸收截面要远远大于 1075 nm。当光纤长度过长,由于稀土镱离子本身的重吸收的影响,该激光器会在波长 1075 nm 产生激光。当光纤长度减少,稀土镱离子本身的重吸收能力减弱,因而可以产生 1045 nm 和 1075 nm 激光输出共存的现象。当增益光纤长度进一步减少,由于稀土镱离子重吸收的能力进一步减弱,仅产生 1045 nm 波长激光。由以上实验结果可知,利用掺杂粉末直拉棒工艺制备的小芯径掺镱 PCF,通过适当调整激光器增益介质掺镱 PCF 长度可以获得中心波长为 1045 nm 或 1075 nm 的掺镱 PCF 单波长激光输出,也可获得 1045 nm 和 1075 nm 的双波长激光输出。

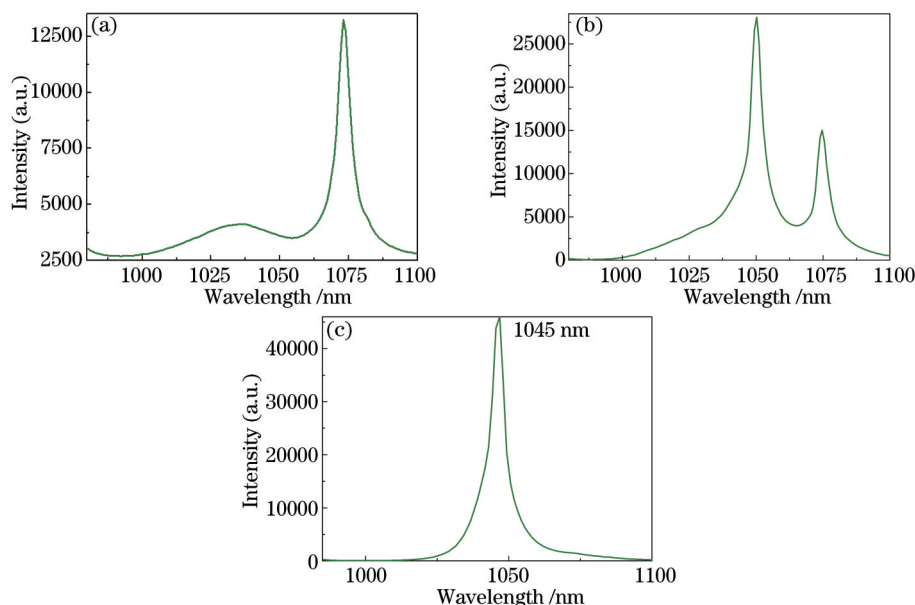


图 8 不同光纤长度条件下,激光器输出光谱。(a) 5 m; (b) 3.5 m; (c) 2.5 m

Fig.8 Fiber laser spectra under the different PCF lengths. (a) 5 m; (b) 3.5 m; (c) 2.5 m

4 结 论

以掺杂粉末直拉棒工艺制备的小芯径掺镱 PCF 为增益介质的光纤激光器,获得 0.42 W 的连续激光输出,斜率效率仅为 33%,中心波长为 1045 nm,实验中所用光纤长度为 1.25 m。实验发现利用掺杂粉末直拉棒工艺制备的掺镱 PCF,通过适当调整激光器用的光纤 PCF 长度,可以获得中心波长为 1045 nm 或 1075 nm 的单波长激光输出,也可获得 1045 nm 和 1075 nm 的双波长激光输出。实验结果证明,利用掺杂粉末直拉工艺制备的掺镱 PCF 具有良好的激光特性,适用于光纤激光器的研究。通过优化掺镱 PCF 结构,如设计成大模场双包层掺镱 PCF,可以将其应用于大功率光纤激光器与放大器上的研究。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: Current status and future perspectives (invited paper) [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 2 V Fomin, M Abramov, A Ferin, *et al.*. 10 kW single mode fiber laser[C]. SyTu-1.3, Symposium on High-Power Fiber Lasers, 14th International Conference, Laser Optics, 2010.
- 3 X Fang, M Hu, C Xie, *et al.*. High pulse energy mode-locked multicore photonic crystal fiber laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(6):

- 1005–1007.
- 4 P G Yan, G L Zhang, H F Wei, *et al.*. Double cladding seven-core photonic crystal fibers with different GVD properties and fundamental supermode output[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(23): 3658–3662.
- 5 H F Wei, H W Chen, S P Chen, *et al.*. A compact seven-core photonic crystal fiber supercontinuum source with 42.3 W output power[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(4): 045101.
- 6 X H Fang, M L Hu, B W Liu, *et al.*. Generation of 150 MW, 110 fs pulses by phase-locked amplification in multicore photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(14): 2326–2328.
- 7 E Shcherbakov, V Fomin, A Abramov, *et al.*. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]. *Advanced Solid-State Lasers Congress*, 2013: ATh4A.2.
- 8 Zhang Hanwei, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Power limit of different single-frequency Yb³⁺-doped fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114003.
张汉伟, 周 朴, 王小林, 等. 不同基质掺 Yb³⁺ 光纤的单频极限输出功率[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114003.
- 9 H J Otto, F Stutzki, N Modsching, *et al.*. 2 kW average power from a pulsed Yb-doped rod-type fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(22): 6446–6448.
- 10 E Stiles. New developments in IPG fiber laser technology[C]. *Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Laser*, 2009, 1: 1–20.
- 11 Li Pingxue, Zhao Ziqiang, Zhang Guangju, *et al.*. Large-mode-area double cladding Yb-doped photonic crystal fiber Q-switched mode-locked laser with graphene-based saturable absorber mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0402001.
李平雪, 赵自强, 张光举, 等. 大模场双包层掺镱光子晶体光纤发射式石墨烯被动调 Q 锁模激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0402001.
- 12 Li Pingxue, Yang Chun, Zhao Ziqiang, *et al.*. 1027 nm large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber mode-locked laser based on SESAM[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0502007.
李平雪, 杨 春, 赵自强, 等. 1027 nm 大模场双包层光子晶体光纤半导体可饱和吸收镜锁模激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502007.
- 13 J J Koponen, L Petit, T Kokki, *et al.*. Progress in direct nanoparticle deposition for the development of the next generation fiber lasers[J]. *Opt Eng*, 2011, 50(11): 111605.
- 14 A Langner, M Such, G Schötz, *et al.*. Multi-kW single fiber laser based on an extra large mode area fiber design[C]. *SPIE*, 2012, 8237: 82370F.
- 15 M Devautour, P Roy, S Février, *et al.*. Nonchemical-vapor-deposition process for fabrication of highly efficient Yb-doped large core fiber[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(31): G139–G142.
- 16 M Leich, F Just, A Langner, *et al.*. Highly efficient Yb-doped silica fibers prepared by powder sinter technology[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1557–1559.
- 17 S Liu, M Wang, Q Zhou, *et al.*. Ytterbium-doped silica photonic crystal fiber laser fabricated by the nanoporous glass sintering technique[J]. *Laser Phys*, 2014, 24(6): 065801.
- 18 S K Wang, S Y Feng, M Wang, *et al.*. Optical and laser properties of Yb³⁺-doped Al₂O₃-P₂O₅-SiO₂ large-mode-area photonic crystal fiber prepared by the sol-gel method[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(11): 115802.
- 19 J L Wu, W Zhang, G Y Zhou, *et al.*. Design and fabrication of ytterbium-doped photonic crystal fiber with low non-linearity [J]. *Laser Phys*, 2015, 25(5): 055105.
- 20 C M Xia, G Y Zhou, W Zhang, *et al.*. Fabrication and laser performance of Yb³⁺/Al³⁺ co-doped photonic crystal fiber synthesized by plasma nonchemical vapor deposition method[J]. *Opt Fiber Technol*, 2015, 25: 20–24.
- 21 C M Xia, G Y Zhou, W Zhang, *et al.*. Optical properties of Tm³⁺-doped photonic crystal fiber fabricated by non-chemical vapor deposition method[J]. *Optoelectronics and Advanced Materials–Rapid Communications*, 2015, 9: 619–622.
- 22 C M Xia, G Y Zhou, W Zhang, *et al.*. Optical properties of Yb³⁺/Ho³⁺ co-doped air cladding silica-based fiber fabricated with plasma non-chemical vapor deposition method[J]. *Appl Phys A*, 2015, 118(2): 523–529.
- 23 C M Xia, G Y Zhou, W Zhang, *et al.*. Blue and near-infrared up-conversion in double-air-cladding Tm³⁺-doped silica fiber under 1064 nm excitation[J]. *Opt Quant Electron*, 2015, 47(11): 3435–3444.
- 24 Liu Jiantao, Zhou Guiyao, Xia Changming. Fabrication of Yb³⁺/Al³⁺ co-doped large-mode-area photonic crystal fiber based on powder sintering technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 552–554.

- 刘建涛, 周桂耀, 夏长明. 基于粉末烧结技术制备镱铝共掺大模场光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2013, 42(5): 552-554.
- 25 C Wang, G Y Zhou, C M Xia, *et al.*. Influence of the melting atmosphere on Yb³⁺/Al³⁺ co-doped silica glass with powder melting technology[J]. Opt Fiber Technol, 2014, 20(2): 106.
- 26 P G Yan, J Shu, S C Ruan, *et al.*. Polarization dependent visible supercontinuum generation in the nanoweb fiber[J]. Opt Express, 2011, 6(4): 4985-4990.
- 27 J Limpert, T Schreiber, S Nolte. High power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. Opt Express, 2003, 11(7): 818-823.
- 28 Huang Shisheng, Zhang Gelin, Wei Huifeng, *et al.*. Supercontinuum generation and mode analysis for double cladding seven-core photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105002.
黄诗盛, 张格霖, 韦会峰, 等. 双包层七芯光子晶体光纤超连续谱的产生及模式分析[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1105002.
- 29 Zhou Dechun, Bai Xuemei, Zhou Hang. Preparation of the large-mode-area ytterbium-doped microstructure fibre and laser performance[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205006.
周德春, 白雪梅, 周 航. 大模场面积掺镱微结构光纤的制备与激光性能[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205006.
- 30 Tao Rumao, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.*. Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020001.
陶汝茂, 周 朴, 肖 虎, 等. 高功率光纤激光中模式不稳定性现象研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020001.

栏目编辑: 王晓琰