

掺钕磷酸盐异形内包层结构光纤激光的输出

黄 义^{1,2} 李文涛^{1,2} 张 磊^{1*} 陈丹平¹ 陈 伟¹ 胡丽丽¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 采用堆叠法制作了纤芯直径为 20 μm 的 Nd^{3+} 离子掺杂磷酸盐玻璃 D 形双包层光纤, 采用 793 nm 半导体激光作为抽运源, 测定并分析其光纤激光性能和斜率效率, 光纤的最大输出功率为 2.52 W, 斜率效率为 41.5%。采用同样的办法进一步制作了六角形、偏心形和圆形内包层结构的光纤, 对比研究了内包层结构对光纤输出性能的影响。结果显示相比于其他内包层结构的光纤, D 形内包层结构光纤对抽运光的吸收效率更高, 有助于光纤激光性能的提高。

关键词 光纤光学; 掺钕磷酸盐玻璃; D 形双包层光纤; 光纤激光; 堆叠法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1006001

Fiber Laser Output from Neodymium-Doped Phosphate Glass Fibers with Shaped Inner Claddings

Huang Yi^{1,2} Li Wentao^{1,2} Zhang Lei¹ Chen Danping¹ Chen Wei¹ Hu Lili¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract D-shaped double cladding (DC) Nd^{3+} -doped phosphate glass fiber with the core diameter of 20 μm is fabricated by the stacking technique and pumped by a commercial 793 nm laser diode. The maximum output power of 2.52 W at 1053 nm is generated, with the slope efficiency of 41.5% respects to the absorbed pump power. To investigate the effect of inner cladding on fiber laser performance, hexagonal, eccentric and circular DC fibers are fabricated and analyzed with the same procedure as the D-shaped fiber. The results show that among all the DC fibers with different inner claddings, the D-shaped fiber has the highest pumping power absorption, which is beneficial to improve the fiber laser performance.

Key words fiber optics; neodymium-doped phosphate glass; D-shape double cladding fiber; fiber laser; stacking technique

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2310; 060.2400; 060.3510

1 引 言

稀土掺杂光纤激光器由于其紧凑稳定的结构, 尤其是良好的散热性能、优异的模式性能和较高的能量转换效率^[1], 被认为是极具潜力的大功率高亮度激光器增益介质而受到广泛关注。近年来, 稀土掺杂的单根单模石英光纤已经获得万瓦级的连续激光输出, 能够在较长的长度内实现有效的抽运吸收^[2]。相比于

石英基质, 磷酸盐玻璃尽管损耗相对较大, 但是具备声子能量适中、受激发射截面大、非线性系数低、激光振荡阈值低, 无光致暗化问题等优点^[3], 尤其是稀土离子溶解度高并且均匀性好, 可以有效地弥补其损耗相对较大的缺点。包层抽运条件下, 稀土掺杂磷酸盐玻璃光纤激光器在 1.0~1.1 μm 和 1.5 μm 波段都获得了较好的瓦级连续激光输出^[4-7], 采用光纤布拉格

收稿日期: 2014-04-01; 收到修改稿日期: 2014-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(61177083)

作者简介: 黄 义(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事异形光纤的制备与特性等方面的研究。E-mail: hysiom@126.com

导师简介: 陈 伟(1968—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光玻璃、光谱、缺陷、激光性质及相互作用等方面的研究。E-mail: weichen@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: juventusmilan@sina.com

光栅作为窄带反射器,磷酸盐玻璃光纤在 $1.5 \mu\text{m}$ 处也获得了增益光纤长度仅为 2 cm 左右的单纵模运行^[8-9]。掺钕磷酸盐玻璃作为激光惯性约束聚变(ICF)驱动器的增益介质,具有损耗低、增益大、大块玻璃制备工艺成熟等特点,是制备磷酸盐玻璃光纤的理想材料;且 Nd^{3+} 作为典型的四能级结构稀土离子,具备优良的受激辐射跃迁性能,因而很适合于低阈值高能光纤激光的产生^[10]。

内包层的形状对双包层光纤抽运光纤吸收效率有很大影响^[11-12]。对于掺钕磷酸盐光纤,为便于光纤的制备,传统研究通常采用圆形或六角形的内包层结构,对称性结构的存在使得抽运光在传输过程中存在大量螺旋光无法耦合进入纤芯被吸收,这在很大程度上限制了光纤的吸收效率和激光功率的输出^[13]。非对称结构的内包层能有效地减少螺旋光,提高抽运光的吸收效率。理论计算表明采用 D 形内包层结构光纤,最终有 87% 的抽运光耦合至纤芯,远高于六角形的 63%、偏心形光纤的 50% 和圆形光纤的 10%^[14]。由于光束在非对称结构的光纤中经过多次来回反射,几乎不存在局域模,因而可以达到相当高的抽运吸收效率,从而使得在相同的抽运功率下,所用光纤变短,有利于高功率光纤激光和放大器中非线性效应的降低^[14]。因此,实验研究不同光纤结构对光纤输出性能的影响,能够为后续拉

制光纤,优化包层结构,提高抽运光吸收效率和激光输出功率提供很好的指导。

本文采用掺钕磷酸盐激光玻璃制作了 D 形内包层结构的光纤,并通过实验分析了光纤激光的输出性能,然后采用相同的办法制作了同样尺寸的六角形、偏心形和圆形内包层结构的光纤,研究了光纤的内包层结构对光纤激光输出性能的影响。

2 实 验

选用 N31 磷酸盐激光玻璃作为纤芯,非掺杂的磷酸盐基质玻璃作为内包层和外包层,采用堆叠法拉丝制备磷酸盐双包层(DC)光纤,对不同内包层结构的磷酸盐双包层光纤进行了分析和研究。相比于石英光纤中广泛采用的高分子树脂聚合物涂层层作为外包层,采用玻璃材料作为外包层,可以提高光纤的损伤阈值和散热能力。实验使用的磷酸盐基质玻璃组分为 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3\text{-KH}_2\text{PO}_4\text{-Ba}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-P}_2\text{O}_5$,适当调整基质玻璃的成分以获得双包层光纤的内外包层材料。纤芯则采用 N31 激光钕玻璃,其 Nd^{3+} 离子的掺杂离子浓度为 $3.5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$,受激发射截面为 $4.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。纤芯和内外包层玻璃参数如表 1 所示。根据材料的折射率可知,制作的磷酸盐玻璃光纤的纤芯数值孔径为 0.163,内包层的数值孔径为 0.292。

表 1 纤芯和内外包层玻璃参数

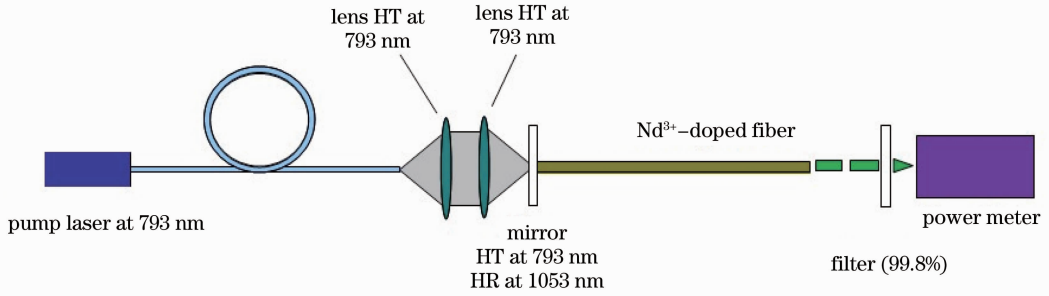
Table 1 Parameters of fiber core and claddings

	Transition temperature / °C	Drawing temperature / °C	Thermal expansion coefficient / K^{-1}	Refractive index n_{1053}	Rod loss / (dB/m)	Doped fiber core absorption coefficient / (dB/m)
Fiber core	440	560	10.7×10^{-6}	1.5344	0.47	146
Inner cladding	440	560	12.3×10^{-6}	1.5257	3.51	—
Outer cladding	445	~575	13.7×10^{-6}	1.4975	4.60	—

实验采用堆叠法制作磷酸盐玻璃光纤,此方法不仅非常适合制备各种形状的光纤,而且成本低,周期短。采用纤芯、内外包层玻璃材料圆棒拉制直径为 1 mm 的磷酸盐毛细棒,截断法测得纤芯毛细棒传输损耗为 0.47 dB/m ,内包层毛细棒损耗为 3.51 dB/m ,外包层细棒损耗为 4.60 dB/m 。纤芯和包层玻璃损耗差别主要是因为纤芯采用的是成熟连熔工艺的产品,而包层玻璃则是根据磷酸盐玻璃的熔化工艺自行熔制的。设计统一变量多形对比方式研究结构对光纤激光输出性能的影响。采用堆叠法将控制好的磷酸盐毛细棒按照设计好的光纤结构和参数在模具中排列,然后在马弗炉中以 $520 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的温度烧结退火 $25 \sim 30 \text{ h}$ 获得稳固结实的 D 形、六角形、偏心

形、圆形光纤预制棒,其中直径 Φ 及六角形对角线为 18 mm ,D 形内包层结构光纤的缺口对应的圆心角为 120° 。光纤预制棒拉丝获得的各形双包层光纤直径约为 $300 \mu\text{m}$,纤芯约为 $20 \mu\text{m}$ 。

磷酸盐玻璃光纤的激光实验示意图如图 1 所示。采用 793 nm 半导体激光器作为抽运源,数值孔径(NA)为 0.3,非球面镜将抽运光耦合进入磷酸盐玻璃光纤的内包层,实验测得聚焦光斑尺寸约为 $150 \mu\text{m}$,与内包层匹配较好。谐振腔为 F-P 腔,一端由垂直射入时在 $1020 \sim 1090 \text{ nm}$ 波段高反(HR),抽运光附近高透(HT)的双色片紧贴光纤入射端组成,另一端为增益光纤菲涅尔反射组成。进行激光光谱和功率测量时,用滤光片把抽运光滤除。

图 1 掺 Nd^{3+} 磷酸盐玻璃光纤 1053 nm 激光实验示意图Fig. 1 Schematic of Nd^{3+} -doped phosphate glass fiber laser at 1053 nm

滤光片在抽运光波长附近的透射率小于 0.2%，有效保证了进入功率计和光谱仪的激光都是 1053 nm 激光。

3 实验结果与分析讨论

3.1 D 形双包层光纤的抽运光吸收系数

采用截断法测量 D 形双包层光纤抽运光吸收系数，多次测量求平均值算出其平均吸收系数。由于光纤采用的是堆叠法制作，光纤的包层传输损耗相对较大，故在评估双包层光纤对抽运光的吸收系数时，需扣除传输损耗的影响。采用截断法测量了光纤包层的传输损耗，测量光纤的传输损耗选用抽运波长附近且稀土离子无吸收的波长，实验采用 980 nm 半导体激光器作为抽运源。在抽运源输出功率固定不变的条件下，D 形双包层光纤每次被截断 9~13 cm 不等，多次测量得到光纤包层传输的平均损耗约为 8.58 dB/m，然后采用 793 nm 半导体抽运源，同样的办法测量了光纤在 793 nm 处的传输吸收损耗系数约为 21.8 dB/m，扣除测得的传输损耗系数，则可得 D 形双包层光纤对抽运光的吸收系数约为 13.22 dB/m。

3.2 D 形双包层光纤激光输出性能

图 2 为 D 形双包层光纤激光输出功率随吸收抽运功率的变化，光纤长度为 23 cm。抽运源发射功率增加到 2.47 W 时，达到阈值，最大输出功率为 2.52 W，进一步提升抽运功率，光纤会发生熔化。光纤激光的斜率效率为 41.5%，可以看到，输出最大功率时激光器并没有出现饱和现象，光纤的最大输出功率主要受光纤材料本身的影响，磷酸盐玻璃本身熔点较低，而较大的传输损耗导致光纤在强抽运光条件下耦合端温度迅速上升，使光纤发生软化，限制了激光输出功率的进一步提高。

图 3 给出了输出激光功率为 500 mW 时的激光

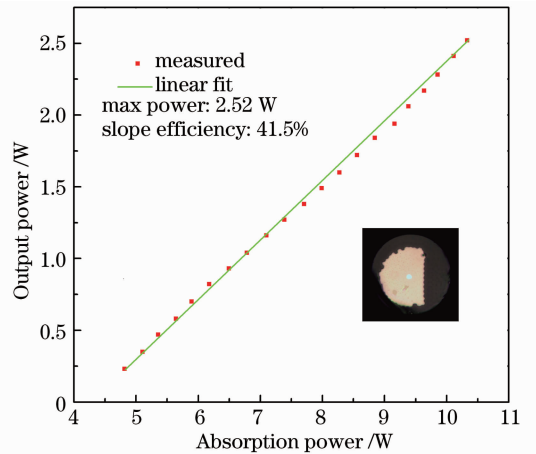


图 2 D 形双包层光纤激光的功率输出及斜率效率

Fig. 2 Laser output power of D-shaped DC fiber as a function of absorbed pump power

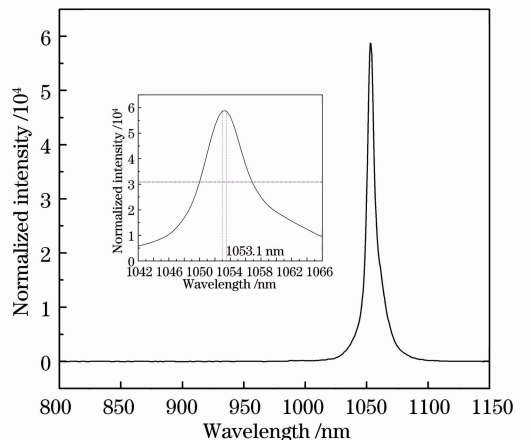


图 3 掺钕磷酸盐 D 形光纤 500 mW 输出激光光谱

Fig. 3 Laser spectrum of D-shaped Nd^{3+} -doped phosphate optical fiber with output of 500 mW

光谱和中心波长附近的光谱图。激光输出的中心波长为 1053.1 nm，此激光光谱的吸收抽运光功率为 5.3 W。实际测试表明随着抽运功率的逐步升高，输出激光的中心波长逐渐漂移到 1053.5 nm，原因主要在于光纤激光的 F-P 谐振腔以双色镜和磷酸

盐玻璃光纤垂直切割的自由端面构成,为宽带反射;另外,光纤包层存在较大的传输损耗,随着抽运功率的增加,光纤温度升高,激光下能级带宽向上偏移,从而出现激光波长变长的现象。如采用窄带反射元件如布拉格光栅作为反射镜,则可稳定输出激光的中心波长,同时使激光半峰全宽变窄^[15]。

研究了光纤长度对输出激光性能的影响。图4给出了光纤长度分别为13,20,23,26,33,45,62 cm时,输出功率随抽运功率变化的情况。达到最大抽运功率时(约20 W),长度为13,20,23,26,33,45,62 cm的光纤,分别对应的最大功率输出为1.03,1.94,2.52,2.08,1.79,1.45,1.29 W。可以看到光纤长度从13 cm增加至23 cm的过程中,激光输出功率逐渐增大,从23 cm增加至62 cm的过程中,激光输出功率又呈现逐渐下降的趋势。根据激光理论,输出功率是由激光谐振腔的净增益与非线性效应时损耗之间的相互平衡决定的^[15]。增益光纤长度增加,一方面会使抽运光吸收增加导致信号光单个光程的增益增加,另一方面谐振腔的总损耗也会增加,输出功率的变化由二者共同主导。当长度为13~23 cm时,光纤长度增加时,其吸收抽运光所获得的增益要高于损耗,故而输出功率逐渐增长;而长度为23~62 cm时,随着光纤长度的进一步增加,损耗的增加开始占主导地位,故而输出功率呈现下降的趋势。

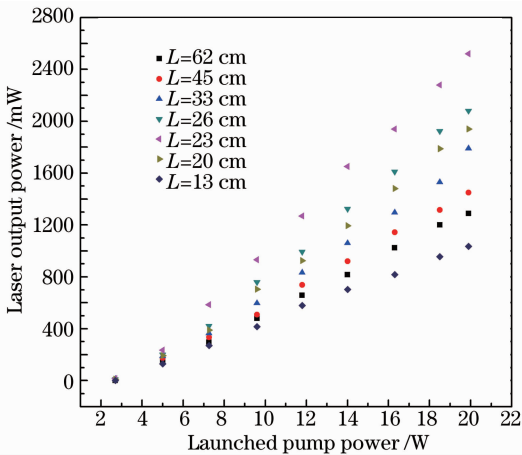


图4 不同长度D形光纤输出功率随发射抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Laser output power of D-shaped DC fiber as a function of launched pump power with different fiber lengths

3.3 不同内包层结构光纤输出性能的对比分析

堆叠法制备了工艺和参数及光纤尺寸规格与D形内包层结构光纤一致的六角形、偏心形及圆形内

包层结构的双包层光纤,并采用D形双包层光纤激光性能研究的办法,对各光纤的激光输出性能进行了评估,以探讨光纤包层结构对其性能的影响。采用截断法测试各光纤的传输损耗系数及纤芯对抽运光的吸收系数,采用和D形内包层结构光纤相同的测试方式。六角形光纤、偏心形光纤和圆形内包层结构光纤的包层传输损耗分别9.7 dB/m,9.76 dB/m,9.85 dB/m,而光纤的纤芯对抽运光的吸收系数则分别为10.5 dB/m,10.2 dB/m和9.65 dB/m。可以看到,包括D形光纤在内,由于各光纤均采用相同的制作流程,光纤的传输损耗吸收基本处于相同的水平,但光纤纤芯对抽运光的吸收系数则是D形内包层结构光纤最高,与理论分析一致。

进一步采用793 nm半导体激光器作抽运源,分析对比了各光纤的激光输出性能。图5为各光纤处于最佳长度时(D形,六角形,偏心形和圆形内包层结构光纤的最佳长度分别为23,25.3,26.7,20 cm),输出激光功率随抽运光吸收功率的变化。在相同的抽运条件下,D形光纤的最大输出功率达到2.52 W,高于六角形、偏心形和圆形结构对应的2.08,1.67,1.22 W。与此同时,对比四者的斜率效率,D形光纤、六角形光纤、偏心形光纤和圆形光纤的斜率效率分别为41.5%、33.56%、27.7%和22.3%。可以看到,不论是最大功率输出还是斜率效率,D形光纤均优于六角形光纤、偏心形光纤和圆形光纤。考虑到各光纤均采用相同的工艺条件制备,且测试表明各光纤具有相近的抽运光传输损耗,可以认为D形光纤较高的输出功率及斜率效率主要来源于光纤对抽运光更高的吸收效率^[16]。同时,实验测得4种不同结构光纤抽运功率均为6.5 W,输出达到1.0 W时,D形光纤长度为12.5 cm,圆形、偏心形及六角形的光纤长度分别达到25.3,19.6,17.2 cm。可以看到在相同抽运功率和光纤结构参数下,输出同样的激光功率,D形内包层结构所需光纤长度最短,这进一步表明D形内包层结构条件下,纤芯对抽运光的吸收效率更高,与光纤纤芯对抽运光吸收系数的测试结果一致。

可以看到虽然测试结果表明不同包层结构光纤纤芯对抽运光的吸收系数有较明显的差别,但D形光纤、六角形光纤、偏心形光纤和圆形光纤的最大输出功率和斜率效率在数值上相差却不太大,与理论数值存在一定的出入。一方面原因是文中引用文献的数据是在理想的光纤条件下(各光纤包层均为理想形状,呈理想摆放状态且不考虑光纤的损耗等),

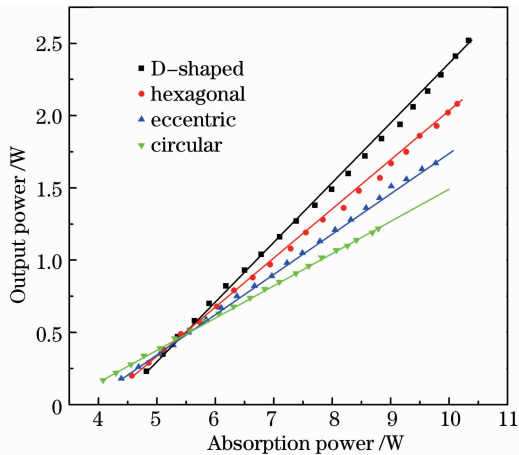


图5 不同结构光纤激光的输出及斜率效率对比

Fig. 5 Laser output power as a function of absorbed pump power with fibers of different inner claddings

经过足够长的距离传输后获得的理论数据。而实际实验过程中会存在很多不确定因素，譬如拉制的圆形内包层并不符合理想标准导致偏心，光纤采用堆叠法制作存在预制棒烧结不完全及烧结与拉制过程中可能出现的光纤变形等偶然因素。另一方面是由于光纤包层的传输损耗较大。光纤包层的损耗主要来自于两个方面：1)包层是自行熔制的磷酸盐玻璃材料，与连熔工艺制备的纤芯相比本征损耗较大；2)光纤采用堆叠法制作，在预制棒的制作过程中，毛细棒的排列及烧结过程中引入的污染进一步造成光纤包层传输损耗的增加。包层较大的传输损耗产生的热效应在很大程度上限制了激光的输出功率及斜率效率，因而使得异形光纤激光实验与理论相差较大。因此，在未来的实验中，需进一步降低光纤的传输损耗以提高光纤的激光性能。

4 结 论

堆叠法制作并研究了异形内包层结构的掺钕磷酸盐玻璃光纤的激光输出性能。在 23 cm 长的 D 形内包层结构光纤中实现了 1053 nm 波长激光输出，其最大功率达到 2.52 W，斜率效率为 41.5%。对比研究了相同制备条件下 D 形、六角形、偏心形和圆形内包层结构光纤的输出功率和斜率效率。在各光纤激光输出最佳长度时，六角形、偏心形及圆形内包层结构光纤的最大输出功率和斜率效率分别为 2.08, 1.67, 1.22 W 和 33.56%, 27.7%, 22.3%，均低于 D 形内包层结构光纤的最大输出功率和斜率效率，表明 D 形内包层结构相比于其他结构更有利于提高光纤对抽运光的吸收效率。

参 考 文 献

- Zhang Guang. Fabrication and Lasing Performance of Phosphate Glass Microstructured Fiber [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2012.
- 张光. 磷酸盐玻璃微结构光纤制备及激光性能研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- D Richardson, J Nilsson, W Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- J Campbell, T Suratwala. Nd-doped phosphate glasses for high-energy/high-peak-power lasers [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2000, 263-264: 318-341.
- Y W Lee, S Sinha, M J F Digonnet, *et al.*. 20 W single-mode Yb³⁺-doped phosphate fiber laser [J]. Opt Lett, 2006, 31(22): 3255-3257.
- Y W Lee, M J F Digonnet, S Sinha, *et al.*. High-power Yb³⁺-doped phosphate fiber amplifier [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(1): 93-102.
- T Qiu, L Li, A Schülzgen, *et al.*. Generation of 9.3-W multimode and 4-W single-mode output from 7-cm short fiber lasers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(12): 2592-2594.
- L Li, M Morrell, T Qiu, *et al.*. Short cladding-pumped Er/Yb phosphate fiber laser with 1.5 W output power [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(14): 2721-2723.
- A Schülzgen, L Li, V L Temyanko, *et al.*. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal phosphate glass fiber [J]. Opt Express, 2006, 14(16): 7087-7092.
- A Poynkin, P Polynkin, M Mansuripur, *et al.*. Single-frequency fiber ring laser with 1 W output power at 1.5 μm [J]. Opt Express, 2005, 13(8): 3179-3184.
- Hu Lili, Jiang Zhonghong. Research progress of phosphate laser glass [J]. Bulletin of Chinese Ceramic Society, 2005, (5): 125-129.
- 胡丽丽, 姜中宏. 磷酸盐激光玻璃进展 [J]. 硅酸盐通报, 2005, (5): 125-129.
- A Liu, K Ueda. Absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers [J]. Opt Commun, 1996, 132(5-6): 511-518.
- M H Muendel. Optimal inner cladding shapes for double-clad fiber lasers [C]. IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 1996. 209.
- W N Li, M Lu, Z Yang, *et al.*. Fabrication and characterization of Yb³⁺-doped gain-guided index-antiguide fiber with D-shaped inner cladding [J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(6): 1498-1501.
- Lou Qihong. High-Power Fiber Laser and Its Applications [M]. Hefei: University of Science and Technology Press, 2010. 10-11.
- 楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. 10-11.
- G Zhang, M Wang, C L Yu, *et al.*. Efficient generation of watt-level output from short-length Nd-doped phosphate fiber lasers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(6): 350-352.
- D Kouznetsov, J Moloney. Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers. II. Broken circular symmetry [J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(6): 1259-1263.

栏目编辑: 张浩佳