

doi:10.3788/gzxb20144309.0906001

# 基于 MOPA 结构的 1 120 nm 掺 Yb 光纤放大器

刘晓娟,付圣贵,郭立萍,韩克祯,周柏君

(山东理工大学 理学院,山东 淄博,255049)

**摘 要:**基于主振荡功率放大器,采用 1120 nm 光纤激光器作为种子激光,将其注入 20 m 大模场面积单模双包层掺 Yb 光纤放大器,并用 976 nm 半导体激光器泵浦实现了 1 120 nm 信号光输出.实验中注入种子激光功率预设为 10 mW,当半导体激光器泵浦功率增大至 1.5 W 时,放大器系统开始输出 1 120 nm 信号光.当泵浦功率低于 3.4 W 时,信号光功率随泵浦功率缓慢增长,系统斜率效率较低;而当泵浦功率高于 3.4 W 时,信号光功率随泵浦功率线性增长,斜率效率明显增大,达到 48.5%.限于最大注入泵浦功率为 6.8 W,放大器输出最高 1 120 nm 信号光功率为 1.97 W,总的光-光转化效率为 29%.输出信号光中心波长为 1 120.89 nm,线宽为 0.02 nm,极好地保持了种子激光的特性.结合实验情况,利用双包层光纤放大器的稳态理论模型,采用有限差分方法模拟了放大器输出信号光功率随泵浦功率的变化曲线,结果显示理论模拟所得变化趋势与实验结果吻合良好,系统将在泵浦功率达到 200 W 左右时达到饱和状态,说明目前光纤放大器系统具有很大的功率提升空间.

**关键词:** 光纤放大器;掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤;主振荡功率放大器;稳态理论模型;1120 nm 激光;窄线宽

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0906001-5

## MOPA Structured 1 120 nm Yb-doped All Fiber Amplifier

LIU Xiao-juan, FU Sheng-gui, GUO Li-ping, HAN Ke-zhen, ZHOU Bo-jun

(Shandong University of Technology, School of Science, Zibo Shandong 255049, China)

**Abstract:** Based on master oscillator power amplifier regime, a 976 nm laser diode pumped 20-m-long single-mode double-clad large-mode-area ytterbium-doped fiber amplifier at 1 120 nm was experimentally demonstrated. In the experiment, the injected power of the fiber seed laser was set to be 10 mW. When the diode laser pump power is increased to 1.5 W, the amplifier system begins to emit signal laser at 1 120 nm. The experimental results reveal that the signal output power increases slowly under low pump power level, however, when the pump power is beyond 3.4 W, the slope efficiency increases fleetly to 48.5%. Limited to the available launched pump power of 6.8 W, a maximum output power of 1.97 W is achieved. The total optical-to-optical conversion efficiency of the system is 29%. The measured center wavelength of the output signal laser is 1120.89 nm with a linewidth as narrow as 0.02 nm, which well preserves the characteristics of the seed laser. According to the parameters of the optical devices in the experiment, based on the steady-state-model of the double-cladding fiber amplifier and finite-difference-method, the relationship of the output signal power versus the diode laser pump power is theoretically calculated. The comparison between the experimental results and the theoretical results displays that the growth trend of the output signal laser power kisses well with the theoretical model. The system will be saturated when the pump power beyond 200 W, which reveals that the amplifier has a large space of

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 11304184, 11104165),山东省自然科学基金(No. ZR2010FQ024)和山东省高等学校科技计划项目(No. J13LN28)资助

**第一作者:**刘晓娟(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为全固态激光器,光纤激光器,光纤放大器. Email: liuxiaojuan@163.com

**收稿日期:**2013-11-21; **录用日期:**2014-04-25

<http://www.photon.ac.cn>

power scaling up.

**Key words:** Fiber amplifier; Ytterbium-doped fiber; Maser oscillator power amplifier; Steady-state-model; 1120 nm laser; Narrow linewidth

**OCIS Codes:** 060.2320; 060.2390; 140.4480; 140.3280; 140.3615

## 0 引言

光纤激光器因具有体积小、免维护、易冷却、高功率和光束质量好等优点而成为诸多领域所用激光光源的重要选择<sup>[1-3]</sup>. 得益于掺 Yb<sup>3+</sup> 增益光纤的设计和工艺的进步, 近年掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器在高功率输出方面获得了极大进展, 并得到重要应用<sup>[4-6]</sup>. 为了获得高输出功率, 目前绝大部分掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器输出波长集中于掺镱光纤的高增益区, 即 1 064~1 080 nm 附近. 而由于掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器的发射带宽覆盖 1~1.2 μm 非常宽的波段范围<sup>[7-9]</sup>, 实际上, 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器在拓展激光输出波长覆盖范围方面大有潜力. 例如, 波长为 1 120 nm 的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器可以作为 1 178 nm 拉曼光纤激光器的泵浦源, 而后者可以通过倍频获得 589 nm 黄光激光, 在生物医学、医疗美容、食品药品检测、信息存储、通讯、军工、大气遥感等方面有广泛应用. 另外高功率黄光可以作为激光导引星(Laser Guide Star, LGS)光源应用于地基大型望远镜的自适应光学系统中, 使望远镜产生近衍射极限的高分辨率图像, 因此, 1 120 nm 光纤激光器在最近几年得到人们的广泛关注<sup>[10-11]</sup>. 现有的实现 1 120 nm 光纤激光器的实验中, 使用最多的方法是基于受激拉曼散射原理将 1 070 nm 激光频移至 1 120 nm. 2010 年, Cristophe A. Codemard 等研制出一种包层泵浦 1120 nm 多模拉曼光纤激光器, 获得最高 100 W 连续激光输出<sup>[9]</sup>. 2009 年, Y Feng 等报道了一种连续波 1 120 nm 拉曼光纤激光器, 输出功率高达 153 W<sup>[10]</sup>. 另外, 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器可直接实现在 1 120 nm 谱线的振荡从而输出 1 120 nm 激光, 较之于拉曼频移法, 该方法不仅显示出更高的综合转换效率, 还具有相对较低的泵浦阈值功率, 且结构简单、输出稳定<sup>[7,11]</sup>. 2012 年, 王建华等报道了输出功率 100 W, 偏振消光比为 15 dB 的 1 120 nm 全光纤掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器<sup>[7]</sup>. 2013 年, 刘晓娟等报道

了线宽为 0.02 nm 的窄线宽 1 120 nm 掺 Yb<sup>3+</sup> 全光纤激光器<sup>[11]</sup>.

除以上方法外, 主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)技术能够很好地保持种子光的光束质量和激光特性, 是实现高功率、高偏振度、单模单频窄线宽激光的重要途径, 可在提升信号光输出功率的同时, 极大地抑制信号光的谱线增宽<sup>[12-14]</sup>. 将自制 1120 nm 窄线宽单模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤种子激光器注入大模场面积单模双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器, 使用 976 nm 半导体激光器(Laser Diode, LD)泵浦, 实现了窄线宽 1 120 nm 信号光的功率提升.

## 1 基于 MOPA 结构的光纤放大器实验装置

实验所用 MOPA 结构的掺 Yb<sup>3+</sup> 全光纤放大器的光路如图 1. 系统由光纤种子激光器和光纤放大器两部分组成. 其中光纤种子激光器的泵浦光源为一个单模尾纤耦合输出的半导体激光器, 最大输出功率为 400 mW, 中心波长为 974.35 nm, 通过一个波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)实现对掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤的泵浦. 激光器谐振腔由一段掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤和一对光纤布拉格光栅组成. 其中掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤对泵浦光的吸收系数为 20~30 dB/m, 长度为 1 m, 纤芯和包层的直径分别为 6 μm 和 125 μm. 光纤光栅 1 用作输入镜, 一端与 WDM 熔接, 另一端与增益光纤熔接, 谐振波长为 1 120.98 nm, 3 dB 带宽为 0.89 nm. 光纤光栅 2 用作耦合输出镜, 一端与增益光纤熔接, 另一端作为 1 120 nm 激光的输出端进行谱线宽度和激光功率的测量. 光纤光栅 2 谐振波长为 1120.91 nm, 3 dB 带宽为 0.82 nm, 反射率为 5 dB. 光纤种子激光器输出 1 120 nm 激光的最高功率为 21.6 mW, 中心波长为 1 120.89 nm, 线宽为 0.02 nm<sup>[10]</sup>.

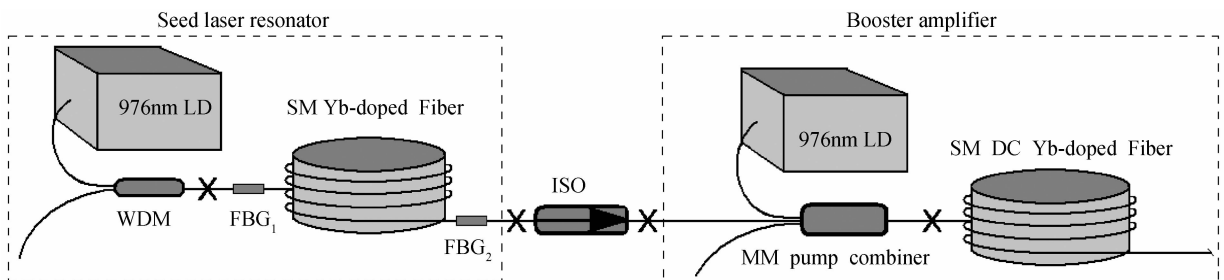


图 1 基于 MOPA 结构的 1 120 nm 光纤放大器

Fig. 1 The setup of the 1 120 nm MOPA structure Yb-doped fiber amplifier

光纤放大器用大模场面积单模双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤为增益介质,其纤芯和内包层直径分别为 10 μm 和 130 μm, 976 nm 波长的吸收系数为 3.9 dB/m. Yb<sup>3+</sup> 光纤在 1 070 nm 的增益远远大于其在 1 120 nm 波段的增益,而相对较长的光纤可在一定程度上抑制短波长(1 030~1 080 nm)放大的自发辐射效应(Amplified Spontaneous Emission, ASE),从而增益介质在 1 120 nm 波长的增益将被提高.因此实验中掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤的长度选择为 20 m. 光纤放大器由一个波长为 976 nm、光纤耦合输出的半导体激光器泵浦,输出最大功率为 9 W,通过一个(2+1)×1 多模泵浦合束器将泵浦光注入光纤放大器增益介质.为保护半导体泵浦源,在半导体泵浦源与多模泵浦合束器之间熔接一个高功率光纤泵浦保护器.在光纤种子激光器和光纤放大器之间熔接一个高功率光隔离器(Isolator, ISO)可避免反向传输的光对光纤种子激光器造成损伤.另外,一段 8°切割的无芯光纤与增益光纤输出端熔接,一方面抑制短波长的放大自发辐射效应,另一方面可降低不必要的光反射回光纤放大器.各光纤器件之间的熔接处理保证了激光器的全光纤化结构.

## 2 实验结果及分析

实验初始阶段,首先调整光纤种子激光器的输出功率,使其经过隔离器和多模泵浦合束器后注入光纤放大器的功率约为 10 mW. 然后进行光纤放大器部分的实验,测得光纤放大器的阈值泵浦功率约为 1.5 W,光纤放大器输出功率与 976 nm LD 泵浦功率之间的关系如图 2. 从图 2 中可看出,当泵浦功率小于 3.4 W 时,信号光的输出功率随泵浦功率的增加而缓慢增大,然而,当 LD 泵浦功率超过 3.4 W 时,信号光的输出功率随泵浦功率的增加速率明显增大,呈线性趋势.当泵浦功率达到 6.8 W 时,光纤放大器输出信号光功率达到 1.97 W. 系统的光-光转换效率为 29%,当泵浦功率大于 3.4 W 时, MOPA 系统最大的斜率效率达到 48.5%.

在实验分析中可以发现,根据 LD 泵浦源特点,在温度比较低的情况下, LD 泵浦源的输出波长比 976 nm

要短,意味着泵浦源的中心波长与光纤放大器增益介质中激活离子 Yb<sup>3+</sup> 的吸收波长不能很好交叠,这就是当 LD 泵浦功率小于 3.4 W 时,信号光功率增长缓慢和光转化效率低的原因.当 LD 泵浦功率增大时,系统斜率效率明显增加,表明 LD 泵浦源的热调谐增进了泵浦波长和激活离子吸收波长的交叠,提高了系统的光-光转换效率.从图 2 中还可以看出,光纤放大器输出功率的增长没有出现饱和趋势,若换更高功率半导体泵浦源,系统信号光输出功率将有很大的提升空间.

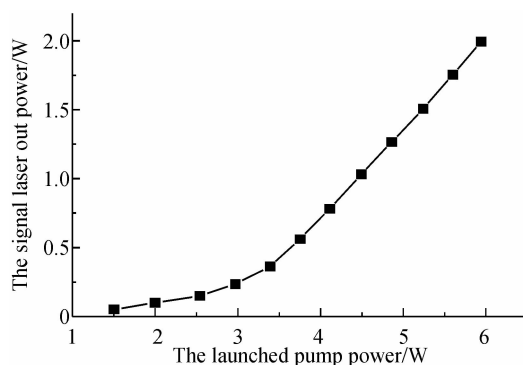


图 2 1 120 nm 信号光输出功率与注入泵浦功率关系曲线  
Fig. 2 The 1 120 nm laser output power vs. launched pump power

对于窄线宽连续信号光放大而言,放大器最大输出功率主要受限于受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS),而大模场面积光纤由于其纤芯较粗,降低了光纤纤芯内的光功率密度,极大地提高了发生非线性效应所需要的阈值功率.在一定条件下,相同掺杂浓度的大模场面积双包层光纤中发生 SBS 的阈值功率比小模场面积光纤内发生 SBS 的阈值功率高 10 倍以上,达到数百瓦量级<sup>[15]</sup>,因此,大模场面积双包层光纤可获得更高的信号光输出功率.本文所用光纤为双包层大模场面积掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤,所得信号光功率仅为瓦量级,结合实验中其他的结果可以证明,纤芯中没有发生 SBS 现象及其他非线性效应.因此,在只考虑放大自发辐射而不考虑非线性效应的前提下,双包层光纤放大器的稳态理论模型为<sup>[15]</sup>

$$N = N_1(z) + N_2(z) \quad (1)$$

$$N_2(z) = N \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{sp}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \sum_{k=1}^K \frac{[P_s^+(z, \lambda_k) + P_s^-(z, \lambda_k)]\sigma_{ss}(\lambda_k)\Gamma_s}{h\nu_k A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{sp} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \sum_{k=1}^K \frac{[P_s^+(z, \lambda_k) + P_s^-(z, \lambda_k)](\sigma_{ss}(\lambda_k) + \sigma_{es}(\lambda_k)\Gamma_s)}{h\nu_k A} + \frac{1}{\tau}} \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm}{dz} = \Gamma_p [(\sigma_{sp} + \sigma_{ep})N_2(z) - \sigma_{sp}N(z)]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{ss} + \sigma_{es})N_2(z) - \sigma_{ss}N(z)]P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z) \quad (4)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm}{dz} = \pm \sin^2(\theta_0/2) \left\{ \frac{v_k^1 \sigma_{e,k}(\lambda_k)}{\sum_k v_k^1 \sigma_{e,k}(\lambda_k)} \right\} \frac{h\nu_k A}{\tau} N_2(z) \quad (5)$$

由于放大自发辐射光谱轮廓随波长起伏较大,所以求解方程时需要将 ASE 谱划分成  $K$  个频带,每个频带对应中心波长  $\lambda_k$ (对应频率  $\nu_k$ ),  $k=1, \dots, K$ ;  $N, N_1(z), N_2(z)$  分别为沿光纤方向  $z$  处  $\text{Yb}^{3+}$  的总粒子数密度及上、下能级粒子数密度;  $P_p^+(z), P_s^+(z, \lambda_k)$  分别为  $z$  处沿光纤正向和反向传输的泵浦光功率和信号光功率;  $\sigma_{ap}, \sigma_{ep}$  分别为泵浦光的吸收、发射截面;  $\sigma_{as}, \sigma_{es}$  分别为信号光的吸收、发射截面;  $\Gamma_p, \Gamma_s$  分别为泵浦光、信号光的功率填充因子;  $A=1/\tau$  为上能级自发辐射系数;  $\alpha_p, \alpha_s$  分别为泵浦光和信号光的吸收系数;  $\theta_0$  为截止角. 考虑正向泵浦, 稳态情况下, 式(1)~(5)的边界条件为

$$\begin{aligned} p_p^+(0) &= p_1, p_p^-(L) = 0, \\ p^+(0, \lambda_k) &= 0, p^-(L, \lambda_k) = 0, k=1, \dots, K, k \neq s, \\ p^+(0, \lambda_s) &= p_{s,0}, p^-(L, \lambda_s) = 0, \end{aligned}$$

其中  $p_1, p_{s,0}$  分别为注入的泵浦光和种子光功率. 采用有限差分法进行理论模拟计算, 沿光纤多次来回迭代积分得到输出信号光功率与注入泵浦光功率之间的模拟关系曲线, 如图 3, 插入小图为泵浦功率在  $0 \sim 10$  W 范围内, 模拟所得信号光输出功率随泵浦光功率的变化关系. 模拟结果显示, 不同泵浦功率水平下, 信号光增长速率有明显差异, 当泵浦光功率小于 100 W 时, 信号光功率随泵浦功率呈线性增长, 当泵浦功率超过 100 W 时, 信号光输出功率增长变缓, 特别是泵浦光功率超过 200 W 时, 信号光的增长速率更趋缓慢, 显示激光放大器系统将趋于饱和. 当泵浦光功率为 6.8 W 时, 信号光输出功率为 2.7 W, 模拟所得信号光功率随泵浦光功率的变化趋势与实验结果吻合良好, 差别在于相同泵浦功率下, 模拟所得信号光功率高于实验所得信号光功率, 分析原因在于: 1) 理论模拟所得功率为放大自发辐射光功率和信号光功率的总和, 比 1120 nm 信号光功率大; 2) 实验中, 光纤与光纤之间的熔接损耗也会影响实际泵浦光的注入功率, 而泵浦光这部分额外损耗在模拟中并没有被考虑, 这也是导致模拟结果高于实验结果的原因.

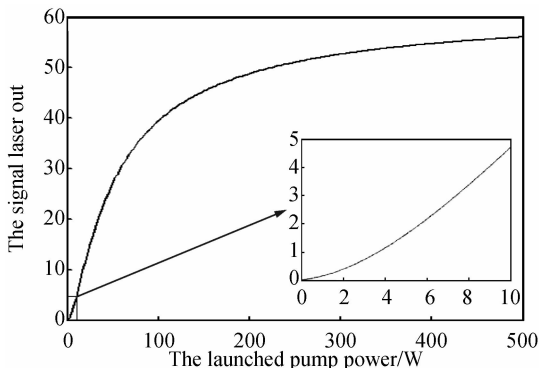


图3 理论模拟信号光输出功率与注入泵浦功率关系曲线  
Fig. 3 Laser output power as a function of launched pump power

实验中对光纤放大器输出 1120 nm 信号光的光谱进行了测量(AQ6370B Yokagawa Corp.), 结果如图 4. 测量结果显示光纤放大器输出中心波长为 1120.89 nm, 该光谱的 3 dB 谱线宽度为 0.02 nm. 对比光纤种子激光器的研究工作<sup>[11]</sup>可以发现, 光纤放大器输出波长和光谱线宽度均很好地保持了 1120 nm 光纤种子激光器的特性. 实验结果进一步印证了采用 MOPA 技术可以提升高光束质量种子激光功率.

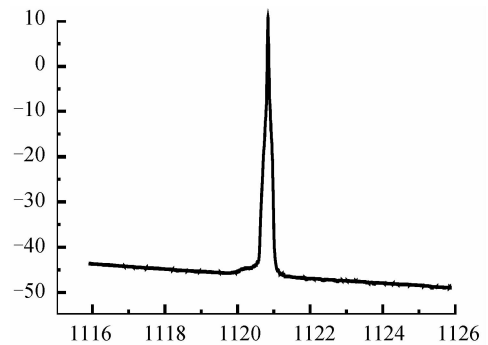


图4 光纤放大器输出 1120 nm 信号光光谱  
Fig. 4 The spectrum of the 1120 nm signal laser

为检测泵浦光吸收情况以及光纤放大器 ASE 光谱的整体情况, 实验中对光纤放大器的全光谱进行了测量. 如图 5, 泵浦光已被完全吸收, 1120 nm 信号光强度超出短波长(1030~1080 nm) ASE 谱 50 dB 以上. 该实验方案中, 选择光纤放大器增益介质长度为 20 m, 在确保泵浦光被完全吸收的同时, 一定程度上抑制短波长的 ASE 效应, 通过模式竞争, 进而可以提高长波长 1120 nm 信号光的增益.

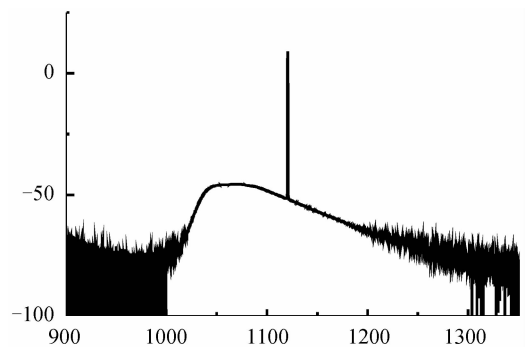


图5 光纤放大器输出的全光谱  
Fig. 5 The overall spectrum of the 1120 nm amplifier

### 3 结论

利用 1120 nm 掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器作为种子, 单模双包层掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤为增益介质, 通过 976 nm LD 泵浦, 实现了窄线宽 1120 nm 全光纤放大器. 当泵浦功率为 6.8 W 时, 放大器输出功率为 1.97 W, 光-光转化效率为 29%, 最大斜率效率为 48.5%, 中心波长为 1120.89 nm, 谱线宽度为 0.02 nm. 利用双包层光纤放大器的稳态理论模型, 采用有限差分法模拟了信号光

输出功率随泵浦功率的变化曲线. 模拟结果结合实验结果显示,放大器系统远未饱和,改用更高功率 LD 泵浦源,1120 nm 信号光功率将有很大提升空间.

#### 参考文献

- [1] LIU C H, QI Y F, DING T Q, *et al.* All-fiber, high power single-frequency linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*. 2011, **9**(3):031402.
- [2] YANG Y F, HU M, HE B, *et al.* Passive coherent beam combining of four Yb-doped fiber amplifier chains with injection-locked seed source[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(6): 854-856.
- [3] TAYLOR L R, FENG Y, CALIA D B. 50W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Optics Express*. 2010, **18**(8):8540-8555.
- [4] FENG Gao-feng, YANG Jun-yong, LU Wei-min, *et al.* Fabrication and laser performance of Yn/P/Al codoped double-clad fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2013, **42**(5):526-530.  
冯高峰,杨军勇,卢卫民,等. Yn/P/Al 共掺双包层光纤的制备与激光性能[J]. *光子学报*, 2013, **42**(5):526-530.
- [5] YU Chen-hui, MA Hai-xia. Divisional area inner-clad structure of double-clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2013, **40**: 77-80.  
虞晨辉,马海霞. 分区域式内包层结构的双包层光纤激光器[J]. *光子学报*, 2011, **40**:77-80.
- [6] SUN Hong, WEI Kai-hua, QIAN Kai, *et al.* Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2013, **42**(1):43-47.  
孙宏,魏凯华,钱凯,等. 一种基于增益调制技术的全光纤化脉冲 Yb 光纤激光器[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1):43-47.
- [7] LIU Wei, XIAO Hu, WANG Xiao-lin, *et al.* Study on output spectral characteristic of Yb-doped fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(9):0902006.  
刘伟,肖虎,王小林,等. 掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性研究[J]. *中国激光*, 2013, **40**(9):0902006.
- [8] WANG J H, HU J M, ZHANG L, *et al.* A 100 W all-fiber linearly-polarized Yb-doped single-mode fiber laser at 1120 nm[J]. *Optics Express*. 2012, **20**(27):28373-28378.
- [9] FENG Y, TAYLOR L R, CALIA D B. 150 W highly-efficient Raman fiber laser[J]. *Optics Express*. 2009, **17**(26): 23678-23683.
- [10] CODEMARD C A, JI J H, SAHU J K, *et al.* 100 W CW cladding pumped Raman fiber laser at 1120 nm[C]. SPIE, 2010, **7580**,75801N.
- [11] LIU X J, FU SH G, GUO L P, *et al.* Narrow linewidth Yb-doped fiber laser at 1120 nm[J]. *Applied Optics*. 2013, **52**(9):1829-1831.
- [12] YIN S P, YAN P, GONG M L. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser with master oscillator multi-stage power amplifiers configuration [J]. *Optics Express*. 2008, **16**(22):17864-17869.
- [13] WANG Fei, SHEN De-yuan, LONG Jing-yu, *et al.* High-power widely-tunable Tm: fiber master oscillator power amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(6): 0602009.  
汪飞,沈德元,龙井宇,等. 高功率、宽调谐掺 Tm 光纤主振荡功率放大器[J]. *中国激光*, 2013, **40**(6):0602009.
- [14] WANG Xiong, ZHOU Pu, WANG Xiao-lin, *et al.* 100-W-level monolithic single frequency Tm-doped fiber MOPA[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(2):120101.  
王雄,周朴,王小林,等. 百瓦级全光纤结构单频掺铥主振荡功率放大器[J]. *强激光与粒子束*, 2014, **26**(2):120101.
- [15] CHANG Li-ping, FAN Wei, WANG Li, *et al.* Amplification performance of large- and small-mode-area Ytterbium-doped double-clad fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2007, **34**(11):1492-1497.  
常丽萍,范薇,王利,等. 掺铥双包层光纤放大器的放大特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1492-1497.