

doi: 10.3788/gzxb20154410.1014002

掺镱全光纤激光器研究

张雪霞¹, 葛廷武¹, 谭祺瑞¹, 刘琛辰², 王智勇¹

(1 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

(2 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:依据速率方程和边界条件,对高功率多点抽运全光纤激光器进行了研究.通过自制的级联侧面泵浦耦合器搭建全光纤激光器,级联耦合器的单点泵浦效率为 96%,泵浦传输损耗为 10%,信号光损耗分别是 0.18 dB 和 0.87 dB;线性谐振腔结构中:前向抽运的光-光转换效率为 69%,低于后向抽运中 70%的光-光转换效率,与理论分析一致;双向泵浦方式中,在单臂输入 975 nm 泵浦功率为 110 W 的条件下,激光功率输出为 311 W,中心波长为 1 080 nm,光谱宽度为 1.6 nm,光-光转换效率为 70%,光束质量约为 1.3.激光器性能稳定,若增加单臂泵浦功率或级联泵浦耦合器个数,可获得更高功率的激光输出.

关键词:激光器;全光纤激光器;双向抽运;双包层光纤;级联泵浦耦合器;高功率输出

中图分类号:TN245; TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1014002-5

Research of Yb-doped All Fibre Lasers

ZHANG Xue-xia¹, GE Ting-wu¹, TAN Qi-rui¹, LIU Chen-chen², WANG Zhi-yong¹

(1 Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 The 11rd Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to research high-power multi-position-pumped fiber lasers, the theoretical analysis was presented based on the rate equations and boundary conditions of Yb-doped double-clad fiber lasers. All-fiber laser is built with the self-made cascaded couplers. In the experiment, the pump efficiency of a single coupler is 96%, pump transmission loss is 10%, signal loss of the couplers are 0.87 dB and 0.18 dB respectively. In the structure of linear cavity, the optical conversion of forward pump is 69%, lower to the backward pump of 70% optical conversion, consistent with theoretical simulations; in the two-end pump, single input pump power of 975 nm is 110 W, the output power is 311 W with the central wavelength of 1 080 nm, spectral width is 1.6 nm, the optical-optical conversion is 70%, $M^2 \sim 1.3$. The results have shown that the output power of laser will continue to increase with the increase of the pump power or the number of couplers.

Key words: Fiber laser; All-fiber laser; Two-end pump; Double-clad fiber; Cascaded pump-combiners; High power output

OCIS Codes: 140.3615; 140.3510; 140.3325; 060.3510

0 引言

随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺和激光二极管泵浦技术的发展,全光纤激光器得到广泛研究

和迅速发展,单根单模双包层光纤激光器的输出功率也迅速提高^[1-2].2009年,西北大学等院校在实验中实现了掺镱双包层光纤激光器的径向偏振振荡,增益光纤端面进行斜角抛磨,输出激光波长 1 085 nm^[3].2011

基金项目:国家科技重大专项(No.2010ZX04013-052)和国家自然科学基金项目(No.61006040)资助

第一作者:张雪霞(1984-),女,博士研究生,主要研究方向为高功率连续光纤激光器. Email:zhangxuexia13@emails.bjut.edu.cn

导师:王智勇(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为高功率光纤激光器、大功率半导体激光器、大功率半导体激光器关键器件制备与集成、高倍聚光太阳能电池. Email:zywang@bjut.edu.cn

收稿日期:2015-06-03;录用日期:2015-08-14

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

年,中国科学院半导体研究所理论分析并实验研究得出光纤激光器输出波长的变化量与弯曲半径的倒数为线性相关等结论^[4]. 2011年,国防科技大学搭建了1 091 nm主控振荡功率放大激光器,最大输出功率为41.6 W,斜效率为75%^[5]. 2012年,固体激光技术重点实验室采用谐振加一级放大的方式,实现了工作波长为1 080 nm,最大输出功率为1.05 kW的全光纤激光器,光-光转换效率为77%^[6]. 2013年,国防科技大学和中国人民解放军91715部队依据合束器的基本结构,分析了合束器损耗来源,研究了不同情况下某系国产合束器的功率和温度特性^[7]. 2014年,山东理工大学对主控振荡功率放大结构的1 120 nm掺Yb光纤放大器进行了研究^[8]. 2014年,北京工业大学激光院通过全光纤激光器中光纤的盘绕半径,从实验上探究了光纤弯曲半径对输出激光模式及光束质量的影响^[9]. 2015年,上海理工大学等院校对980 nm半导体激光器的输出光谱特性进行了改善^[10]. 2015年,国防科技大学采用激光二极管直接抽运的方式,在主振荡功率放大器结构中,成功实现3.15 kW全光纤激光输出^[11].

随着激光输出功率的提高,对激光器散热的要求也越来越严格,热处理成为高功率输出的突出问题. 分布式抽运可以实现抽运功率的扩展,使热量均匀地分布在整根光纤中,解决增益光纤端面热量集中的问题,是目前发展高功率光纤激光器的主要技术之一.

2003年,麦克马斯特大学等院校理论对比了端面泵浦和分布式泵浦方式中热效应对千瓦级激光器的影响^[12];同年,上海光机所对三点分布的抽运方式进行了数值分析,结论具有普遍意义^[13]. 2004年,清华大学在考虑散射损耗的情况下,对强泵浦光纤激光器进行了理论分析,但是并没有进行实验验证^[14]. 2007年,国防科技大学从理论的角度对多点抽运双包层光纤激光器进行了数值模拟^[15]. 2011年,厦门大学在忽略散射损耗的条件下,优化了掺镱双包层光纤激光器的理论分析^[16]. 2014年,北京工业大学理论仿真并实验验证了熔融侧面泵浦耦合器光纤夹角对耦合效率的影响^[17];2015年,北京交通大学等院校采用打靶的方式对多点抽运方式进行了模拟和分析^[18]. 2015年,南京邮电大学对侧面均匀泵浦增益导引和折射率反导引掺镱光纤激光器的阈值特性进行了分析,并得出光纤参量对泵浦阈值的影响^[19].

本论文从理论和实验两方面对多点抽运光纤激光器进行了研究. 在4路、单臂975 nm泵浦功率最大输入110 W的条件下,获得1 080 nm激光功率输出311 W,光-光转化效率70%,若增加泵浦输入功率或增加级联耦合器个数,可获得更高功率激光输出.

1 理论模拟

线性谐振腔光纤激光器结构简单,稳定性高. 图1

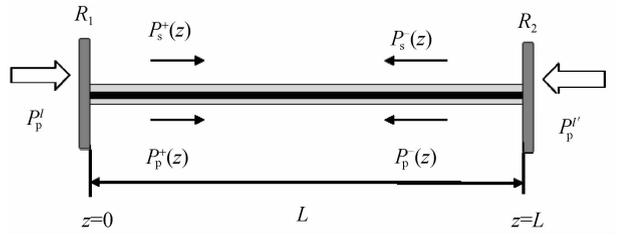


图1 端面抽运光纤激光器原理图

Fig. 1 The principle of end-pumping fiber laser
为端面抽运的掺Yb全光纤激光器的原理,相应的速率方程组为^[20]

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

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

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

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

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

式(1)~(4)描述了光纤不同位置处,抽运光和激光前后向的变化规律. 其中 $P_0 = 2h\nu_s \Delta\nu_s$ 为增益带宽 $\Delta\nu_s$ 内自发辐射对激光功率的贡献,数值很小,可以忽略不计. α_p 和 α_s 分别是双包层光纤对激光和抽运光的散射损耗. 式(5)描述了在不同的光纤位置处,增益介质Yb的上能级粒子浓度 $N_2(z)$ 与前后向抽运光 $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$, 和前后向激光 $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$ 的关系. 其中 N 为掺杂光纤中Yb粒子的浓度, Γ_p 和 Γ_s 分别是增益光纤对抽运光和光纤激光的功率填充因子, A_c 是纤芯横截面积, σ_{as} 、 σ_{sp} 、 σ_{es} 、 σ_{ep} 分别是激光和抽运光的吸收截面和发射截面, τ 是 Yb^{3+} 粒子上能级平均寿命, h 是普朗克常数, ν_s 、 ν_p 分别是激光和抽运光的频率.

线性谐振腔激光器的边界条件^[20]为

$$P_p^+(0) = P_p^L \quad (6)$$

$$P_p^-(L) = P_p^R \quad (7)$$

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \quad (8)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (9)$$

式(1)~(4)与式(6)~(9)构成了位于 $z=0$ 和 $z=L$ 的

两点边值问题,利用 Matlab 提供的处理两点边值问题数值解法,可以方便地解决问题。

在 220 W 抽运功率下,对端面抽运的光纤激光器,分别模拟了前向抽运、后向抽运和双向抽运中上能级

粒子数分布,以及激光和抽运光在增益光纤中的变化。图 2(a)~(f) 分别是双向抽运、前向抽运和后向抽运中抽运功率、激光功率在光纤中的分布,以及相应的上能级粒子数随光纤长度的变化。

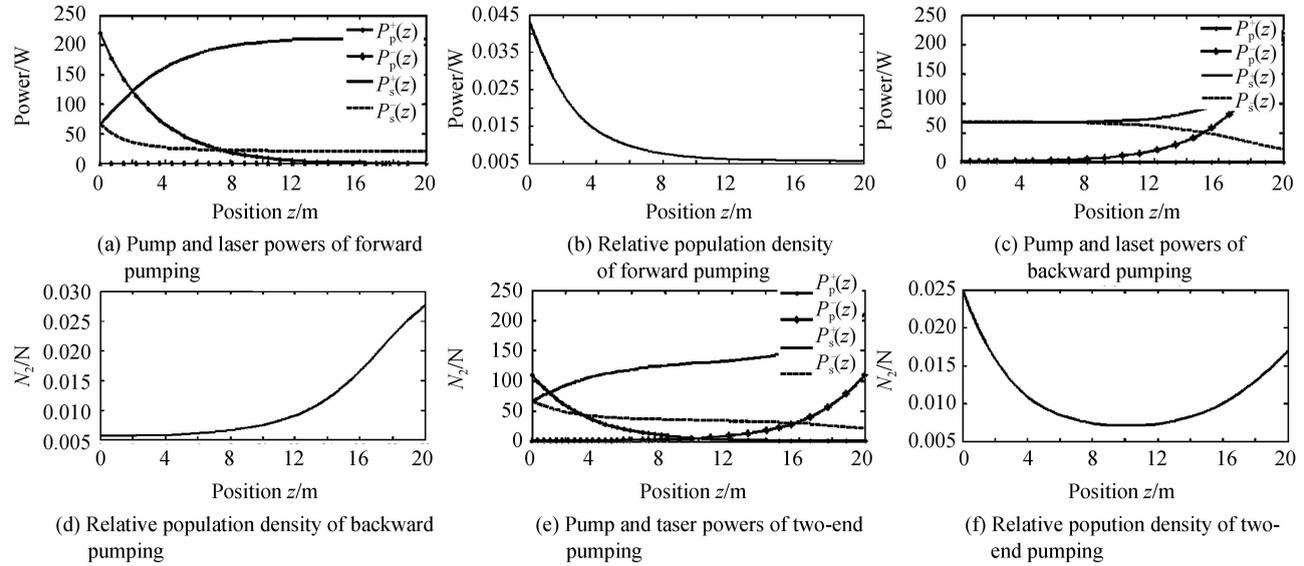


图 2 抽运光 220 W 时激光器特性曲线
Fig. 2 Characteristic curve with 220 W of pumping power

理论模拟显示:双向抽运中,1 080 nm 激光功率输出 190.8 W,光-光转换效率 86.7%;前向抽运中,获得 1 080 nm 激光功率输出 189.8 W,光-光转换效率 86%;后向抽运方式中,激光功率输出 191.3 W,光-光转换效率 87%。双向抽运方式中输出功率和增益介质分布介于前向抽运和后向抽运之间,并且在双向抽运方式中,抽运光功率分布更平坦,在高功率光纤激光器中热负载比较低。

2 实验研究

2.1 耦合器测试

以氢氧焰为热源,采用侧面熔接的方式自主控制泵浦耦合器,结构如图 3,其中,纤芯/包层直径为 105/125,数值孔径值(Numerical Aperture, NA)为 0.22 的光纤贴在 20/400、NA 值为 0.06/0.46 的主光纤上。采用最大输出功率为 60 W,波长为 975 nm 的激光二极管(Laser Diode, LD)测试耦合器泵浦效率。搭建的 1 080 nm 激光种子源测试信号光损耗,如图 4。

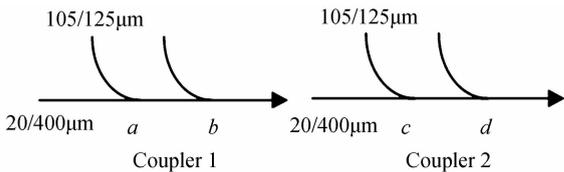


图 3 耦合器结构
Fig. 3 Structure of coupler

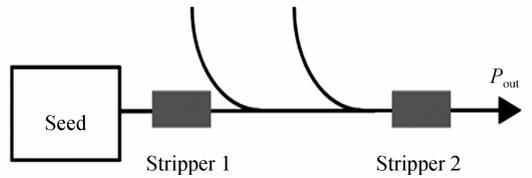


图 4 耦合器插入损耗测试装置
Fig. 4 The testing device of coupler insertion loss

耦合器测试结果表明:耦合器 1、2 前泵浦点(b、d)的泵浦效率为 96%,后泵浦点(a、c)的效率为 86%;耦合器效率减小的原因主要是存在泵浦传输损耗。通过耦合器的信号光损耗分别是 0.18 dB 和 0.87 dB,考虑到激光器光束质量和信号光泄露,耦合器 1 放在激光器腔内。

表 1 耦合器测试参量

Table 1 The parameters of couplers		
Coupler	1	2
Coupling efficiency/%	a:86	c:86
Coupling efficiency/%	b:96	d:96
Signal loss/dB	0.18	0.87

2.2 激光器实验

激光器结构如图 5,以光纤光栅为激光器谐振腔镜,光纤光栅尾纤为 20/400、NA 值 0.06/0.46 的双包层无源光纤,高反射光栅(High Reflection Fiber Bragg Grating, HR FBG)在 1 080 nm 波长激光的反射率为 98%,高透射光栅(High Transmission Fiber Bragg

Grating, HT FBG)在 1 080 nm 波长激光的反射率为 10%。抽运光源选用 4 支中心输出波长为 975 nm、输出尾纤为 105/125、NA 为 0.22、最大输出功率为 110 W 的 LD,通过上述两组级联耦合器注入到增益光纤。增益光纤为纤芯/包层直径 20/400,NA 0.06/0.46 的掺 Yb 双包层光纤,对 975 nm 泵浦光吸收系数为 1.26 dB/m,长度为 20 m。透射光栅和后向耦合器的熔点处添加包层光剥离器(Stripper),剥除光纤包层中的残余泵浦光和高阶模激光。

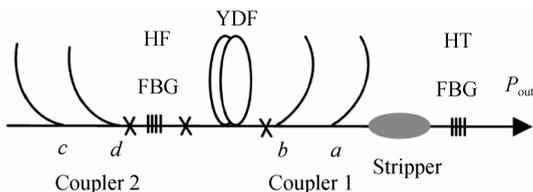
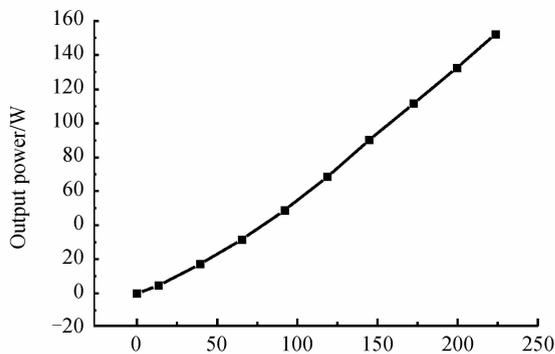


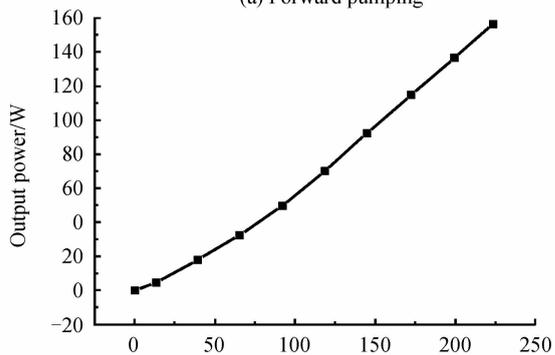
图 5 实验装置

Fig. 5 Setup of experiment

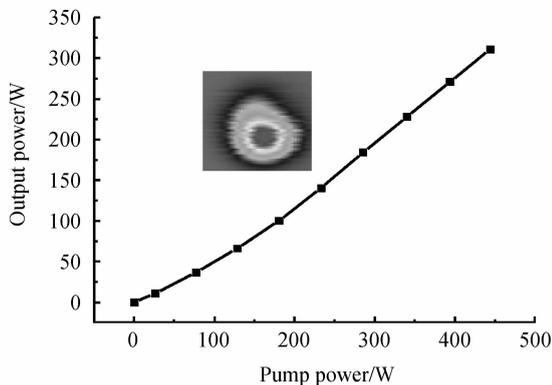
图 6 为实验中三种抽运方式(前向、后向和双向)的功率输出曲线。在前向抽运方式中,抽运光功率为 223.6 W 时,1 080 nm 激光功率输出为 152.2 W,光-光转换效率为 69%;后向抽运方式中,选用同样的 2 个 110 W 激光 LD 进行实验,输入抽运光功率为 223.6 W 时,激光功率输出为 156.5 W,光-光转换效率为 70%。后向泵浦激光器的光-光效率高于前向泵浦,实验结果与理论模拟一致。



(a) Forward pumping



(b) Backward pumping



(c) Two-end pumping

图 6 激光功率输出与抽运光功率曲线关系

Fig. 6 Output powers varies with pump powers

双向抽运实验中,当抽运功率为 444 W 时,1 080 nm 激光功率输出为 311 W,光束质量因子 $M^2 \sim 1.3$,光谱宽度为 1.6 nm(图 7),光-光转换效率为 70%,耦合器的最高温度为 32℃(室温 27℃),耦合器温升很小,激光器可以正常连续工作。图 6(c)是激光输出随着泵浦功率增加的关系曲线。由输出曲线可知,激光器功率未达到饱和状态,若继续增加泵浦抽运功率或者耦合器的个数,将会获得更高激光功率输出。

侧面多点级联泵浦方式可有效改善激光器热分布,通过降低级联耦合器泵浦传输损耗与信号插损,可以实现单纤千瓦、万瓦激光功率的输出。

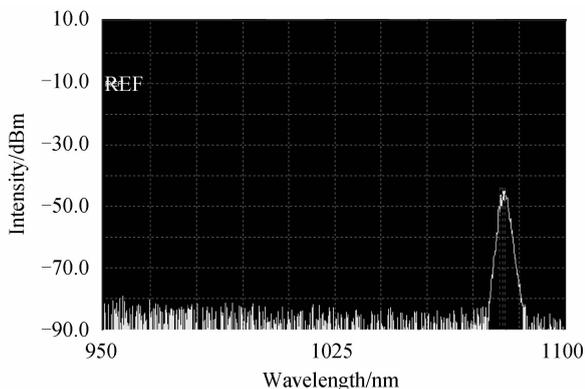


图 7 光谱图

Fig. 7 Spectrum

3 结论

采用自制的级联侧面泵浦耦合器,搭建了全光纤激光器。实验表明:前向抽运的光-光转换效率为 69%,低于后向抽运中 70% 的光转换效率,和理论分析一致。当双向抽运功率为 444 W 时,1 080 nm 激光功率输出为 311 W,光谱宽度为 1.6 nm,光束质量因子 $M^2 \sim 1.3$,光-光转换效率为 70%。耦合器温升较小,激光器输出稳定。若继续增加泵浦功率或耦合器级联个数将获得更高功率激光输出。

参考文献

- [1] LIU De-ming, YAN Chang-ling. Key technologies and applications for high power fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**: 105-109.
刘德明, 阎嫦玲. 高功率光纤激光器的关键技术及应用[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**: 105-109.
- [2] MORES R A, BERDINE R W. Introduction to high power fiber lasers [C]. Directed Energy Professional Society, Albuquerque, 2006.
- [3] ZHONG Lan-xiang, CAO Yan-jun, LI Jian-lang. Radial-polarization on excitation from an ytterbium doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2179-2183.
种兰祥, 曹延军, 李建郎. 掺镱双包层光纤激光器的径向偏振振荡[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 2179-2183
- [4] SONG Xiao-yan, ZHANG Wen-tao, LI Fang, et al. Experimental investigation of bending characteristics of distributed feed back fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 807-810.
宋晓燕, 张文涛, 李芳, 等. 分布反馈光纤激光器弯曲特性的实验研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 807-810.
- [5] XU Jiang-ming, LENG Jin-yong, DONG Xiao-lin, et al. All-fiber high power 1091nm MOPA laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(11): 2143-2146.
许将明, 冷进勇, 董小林, 等. 全光纤高功率 1091nm MOPA 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(11): 2143-2146.
- [6] ZHANG Li-ming, ZHOU Shou-heng, ZHAO Hong, et al. Experiment research of 1kW single mode all fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(11): 2927-2930.
张利明, 周寿恒, 赵鸿, 等. 1kW 单模全光纤激光器实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(11): 2927-2930.
- [7] GONG Zhi-qun, WANG Xiao-lin, CAO Jian-qiu, et al. Characteristics of homemade high power fiber pump combiner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(10): 2658-2662.
龚志群, 王小林, 曹涧秋, 等. 国产高功率光纤泵浦合束器特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(10): 2658-2662.
- [8] LIU Xiao-juan, FU Sheng-gui, GUO Li-ping, et al. MOPA structured 1120nm yb-doped all fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906001.
刘晓娟, 付圣贵, 郭立萍, 等. 基于 MOPA 结构的 1120nm 掺 Yb 光纤放大器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906001.
- [9] DONG Fan-long, ZHAO Fang-zhou, GE Ting-wu, et al. Fiber bending impacts on beam quality of Yb-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(11): 3565-3569.
董繁龙, 赵方舟, 葛廷武, 等. 光纤弯曲对掺镱光纤激光器光束质量的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(11): 3565-3569.
- [10] CHEN Shao-juan, LI Yi, YUAN Wen-rui, et al. Improvement of the spectral characteristics of 980nm semiconductor laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0114003.
陈少娟, 李毅, 袁文瑞, 等. 980nm 半导体激光器输出光谱特性的改善[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1): 0114003.
- [11] WANG Xiao-lin, ZHANG Han-wei, YU Hai-long, et al. 3.15 kW single-mode all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(2): 0219003.
王小林, 张汉伟, 于海龙, 等. 3.15 kW 全光纤单模激光器 [J]. *中国激光*, 2015, **42**(2): 0219003.
- [12] WANG Yong, XU Chang-qing, PO Hong. Pump arrangement for kilowatt fiber lasers [J]. *IEEE*, 2003, MHI: 71-72.
- [13] ZHANG Chun-wei, XIANG Shi-qing, WANG Chang-an. Numerical analysis on spatial three-position pumped Yb³⁺-doped double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 249-254.
张春伟, 向世清, 王常安. 空间多点抽运双包层光纤激光器的数值分析: 典型三点抽运情形 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 249-254.
- [14] XIAO Li-min, YAN Ping, GONG Ma-li, et al. An approximate analytic solution of strongly pumped Yb-doped double-clad fiber lasers without neglecting the scattering loss [J]. *Optics Communications*, 2004, **230**: 401-410.
- [15] ZHU Zhi-wu, FENG Ying, WEI Li-an, et al. Theoretical and numerical analysis of multi-point pumped double-clad fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(2): 159-163.
- [16] LIAO Xiong-yong, HUANG Chao-hong. Optimization of Yb³⁺-doped double-clad fiber lasers using a new approximate analytical solution [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**: 55-61.
- [17] TAN Qi-rui, GE Ting-wu, WANG Zhi-yong. Influence of fused side-pump coupler fiber angle on coupling efficiency [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, **35**(06): 1104-1108.
谭祺瑞, 葛廷武, 王智勇. 熔融侧面泵浦耦合器光纤夹角对耦合效率的影响 [J]. *应用光学*, 2014, **35**(06): 1104-1108.
- [18] HU Xu-dong, NING Ti-gang, PEI Li, et al. Shooting method with excellent initial guess functions for multipoint pumping Yb³⁺-doped fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2015, **336**: 286-294.
朱志武, 冯莹, 魏立安, 等. 多点抽运双包层光纤激光器理论及数值模拟 [J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(2): 159-163.
- [19] SHEN Xiao, ZOU Hui, TANG Hai-tao, et al. Threshold characteristics analysis of a uniformly side-pumped Yb³⁺-doped gain-guided and index-antiguidded fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, **68**: 1-5.
- [20] KELSON I, HARDY A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE Quantum Electron*, 1998, **34**(9): 1570-157.