

激光与光电子学进展

7.13 kW、2 倍衍射极限输出的
Yb 板条激光放大器王亚楠^{1,2}, 周唐建^{1,2}, 尚建力^{1,2}, 李密^{1,2}, 王君涛^{1,2}, 鄢映臣^{1,2,3}, 石勇^{1,2}, 何平^{1,2}, 高清松^{1,2}, 汪丹^{1,2,3*}¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999;³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 计算了 Yb:YAG 板条选通角并优化设计了放大链路构型。对比分析了反射式像传递系统优势并计算了像传递系统的球差, 结果表明, 反射式像传递系统可大幅减小系统球差, 有利于提升放大激光光束质量。室温下搭建了基于单个 Yb 板条的三通主振荡器功率放大系统, 通过采用反射式像传递放大链路设计, 同时优化泵浦激光与种子激光的近场强度匹配, 在无主动光学校正系统下, 功率 7.13 kW、光束质量优于 2 倍衍射极限的激光输出。

关键词 激光器; Yb:YAG; 板条激光放大器; 光束质量; 像传递系统

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1114007

Yb Slab Laser Amplifier with a Laser Output of 7.13 kW, 2 Times
Diffraction LimitWang Yanan^{1,2}, Zhou Tangjian^{1,2}, Shang Jianli^{1,2}, Li Mi^{1,2}, Wang Juntao^{1,2}, Wu Yingcheng^{1,2,3},
Shi Yong^{1,2}, He Ping^{1,2}, Gao Qingsong^{1,2}, Wang Dan^{1,2,3*}¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;³Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract The injection angles of Yb:YAG slab are calculated and the configuration of laser amplification is optimized. The advantages of the reflective image transfer system are compared and analyzed, and the spherical aberration of the image transfer system is calculated. The results show that the spherical aberration is significantly decreased by the reflective image transfer system, which improves the beam quality of the amplified laser. Based on single Yb:YAG slab, a three-passes master oscillator power amplifier system is developed at room temperature. By using the reflective image transfer system and matching the near-field intensity between pump laser and seed laser, an output power of 7.13 kW and a beam quality of 2 times diffraction limit are achieved without the active optical correction system.

Key words lasers; Yb:YAG; slab laser amplifier; beam quality; image transfer system

OCIS codes 140.2010; 140.3280; 140.3300

收稿日期: 2020-11-01; 修回日期: 2020-11-17; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61705209)

*E-mail: 20930103@zju.edu.cn

1 引言

二极管抽运的固体激光器(DPL)具有效率高、光束质量好、工作稳定等优点,广泛应用于军事国防、激光医疗、工业加工、科学研究等领域^[1-2]。但随着抽运功率的增加,传统的棒状DPL因热致双折射、热透镜和热应力效应,导致输出功率低,输出光束质量较差。端抽运的之字形(Zig-zag)板条中,激光光束在厚度方向沿“之”字型光路传输,理论上可以完全补偿一阶热效应^[3-4]。二极管抽运的板条激光器因具有高均匀性泵浦、高效率散热,以及可获得高功率、高质量激光输出等特点,成为当前高能固体激光研究热点之一。但随着二极管泵浦的发展,Yb:YAG介质在高功率激光系统中显示出更大的优势^[5-7]。室温下Yb:YAG能级结构为简单的准三能级(无上能级转换等效应),量子亏损和产热比低(仅为Nd的1/3),热负载能力强,具有更高功率输出能力^[8-9]。另外,Yb介质在波长1030 nm处的增益线宽约为Nd的10倍,可大幅降低注入激光光谱要求,有利于离峰放大和光谱合成,实现更高功率激光输出。但因Yb:YAG材料在常温下为准三能级系统,其泵浦饱和光强约为Nd的2.5倍,注入饱和光强约为Nd的4倍,常温下需采用高亮度泵浦和高通量注入来实现高功率、高效率的激光输出。

传导冷却端面泵浦板条(CCEPS)结构能有效减小泵浦口径,实现高亮度泵浦。2001年Goodno等^[10]首次报道了室温Yb:YAG的CCEPS激光器,实现415 W近衍射极限连续激光输出。近年来,中国工程物理研究院应用电子学研究所高能固体激光团队采用多浓度掺杂的Yb:YAG介质,大幅提升CCEPS激光输出功率及性能。2016年Chen等^[11]首次报道了常温下多浓度掺杂Yb:YAG板条激光器,板条口径约10 mm,实现单板条提取功率2.7 kW激光输出,但输出光束质量较差。2017年Li等^[12]在扩大板条口径的基础上,板条口径约30 mm,实现单个板条提取功率7 kW激光输出,虽功率提升近1倍多,但输出光束质量仍然较差,难以进行后续应用。2018年,Xu等^[13]通过两个Yb板条串接放大,实现输出功率11.9 kW,直接输出的光束质量 β 仍然较差(β 仅优于9.8倍衍射极限)。输出激光经主动光学校正(AO)系统校正后光束质量提升至2.8倍衍射极限。但因AO系统的加入,激光器体积和复杂性大幅增加。

本文深入分析并优化了Yb板条放大链路构型

及放大链路像传递系统,搭建了基于单个Yb板条的主振荡功率放大(MOPA)系统,采用角度三通放大结构,在板条口径仅为20 mm条件下,实现7.13 kW激光输出,单位口径输出功率高于文献^[6-7]。同时,通过优化泵浦激光与种子激光的近场强度匹配,采用低像差的反射式像传递的结构,实现在无AO校正下的Yb板条激光输出光束质量 β 优于2倍衍射极限,大幅提升常温Yb板条激光输出性能,为常温Yb激光器小型化、轻量化奠定了基础。

2 激光放大链路设计

激光在板条晶体内部沿“之”字型光路传输(图1)需满足两个条件:板条内部全反射和整数个传播周期。

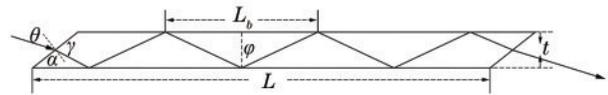


图1 “之”字型光路示意图

Fig. 1 Zig-zag optical path schematic

根据折、反射定律以及传播条件,激光在板条端面的入射角度可由下式计算,

$$L = N \times L_b = N \times 2t \times \tan \varphi, \quad (1)$$

$$\sin \gamma = \sin \theta / n, \quad (2)$$

$$\varphi = \alpha + \gamma, \quad (3)$$

式中: L 为板条长度; N 为激光在板条内的传播周期; L_b 为每个传播周期在板条上的长度; t 为板条厚度; φ 为激光在板条大面的入射角; γ 为激光在板条入射端面的折射角; θ 为激光在板条端面的入射角; n 为Yb:YAG板条晶体折射率; α 为板条端面与大面夹角。当板条尺寸为150 mm×20 mm×2.2 mm(长×宽×厚),端面切角45°时,激光在板条端面入射角计算结果如表1所示。

表1 不同传播周期对应的端面入射角度

Table 1 Incident angle of the end face corresponding to different propagation periods

N	14	15	16	17	18	19	20
$\theta / (^\circ)$	44.55	41.27	38.19	35.27	32.49	29.84	27.31

板条放大通次的选择主要考虑因素在于光光效率、光束质量以及系统复杂度。1)光光效率。目前窄线宽、线偏振的1030 nm光纤种子源输出功率不足1 kW,整形后的有效注入密度小于1.5 kW/cm²,远小于室温Yb的饱和光强,放大提取效率低,板条

内放大自发辐射(ASE)严重、废热量大,激光材料内部和表面温度高,系统工作安全性差。因此需采用多通次放大,增加板条内激光通量,提升光光效率。2)光束质量。因板条晶体加工和焊接等工艺导致内部应力分布不均,板条泵浦热效应导致相位畸变,激光每通过一次板条,这些畸变叠加会导致光束质量恶化。因此,高光束质量激光需求限制了激光通次增加。3)系统复杂度。为增加板条热负载能力,板条厚度一般为 2~3 mm,激光在厚度方向自由传输时,会因衍射效应和波前畸变效应导致光斑扩展和扭曲。当激光自由传输至板条端面时,激光损耗增大。因此,需在每个通次间插入像传递系统,减少光束的自由传输。随着像传递系统的增

加,空间光路复杂性和系统风险也急剧上升。综合上述因素,选择三通提取作为激光器的放大构型,三通放大的角度分别选用 44.55°、38.19°、32.49°。

4f 像传递系统在成像过程中可以实现“物”、“像”旋转 180°,形成“倒像”。利用倒像原理,激光经过成像系统,在板条中双通放大后,可动态补偿因板条晶体在加工、装配和抽运时产生的相位倾斜,提升系统安全性。4f 像传递系统主要分为透射式和反射式两种类型,透射式系统由球透镜和平面反射镜组成,反射式系统由球面反射镜和平面反射镜组成。如图 2(a)所示。相较于透射式系统,反射式系统中高能激光不透过光学镜片,光学透镜被加热等导致的相位畸变显著减少,提升了激光输出稳定性和光束质量。

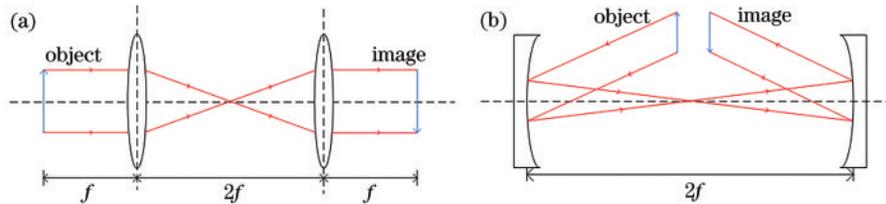


图 2 4f 像传递系统。(a)透射式成像系统光路图;(b)反射式成像系统光路图

Fig. 2 4f image transfer system. (a) Optical path schematic of transmissive image system; (b) optical path schematic of reflective image system

根据板条激光器矩形光束特征,对反射式像传递系统进行了优化设计,如图 2(b)所示。在板条厚度方向采用了旁轴对称像差补偿设计,解决了旁轴像差引起的光束弯曲,可实现板条激光系统多通次低损耗耦合。板条宽度方向像差主要来源于大口径光斑在小曲率镜面上传输带来的球差。相较于透射式 4f 像传递系统,在相同焦距条件下,反射式系统表面曲率仅约为透射式的 4.4 倍(透镜为熔石英基底)。优化光斑宽度与焦距,可显著降低 4f 成像系统产生的球差,提升输出激光光束质量。如图 3 所示,采用

Zemax 计算了光斑宽度 20 mm、中心波长 $\lambda=1030$ nm、焦距 500 mm 的 4f 像传递系统球差。计算结果显示,反射式系统的球差约为透射式系统的 11%。

3 实验装置

搭建了一套 Yb:YAG 板条激光放大系统,图 4 为其结构示意图,主要包含种子源、隔离系统、整形系统和 Yb 板条增益模块和三通放大系统。

种子激光为线偏振窄线宽的光纤激光器,有效注入功率 0.55 kW,中心波长为 1030 nm,线宽为 0.3 nm,线偏振度优于 95%,光束质量 M^2 优于 1.3。

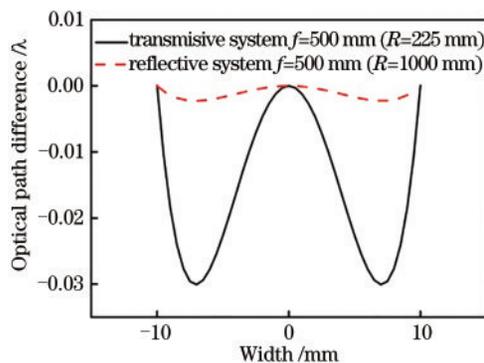


图 3 反射式与透射式系统的球差对比

Fig. 3 Spherical aberration comparison of reflective and transmissive system

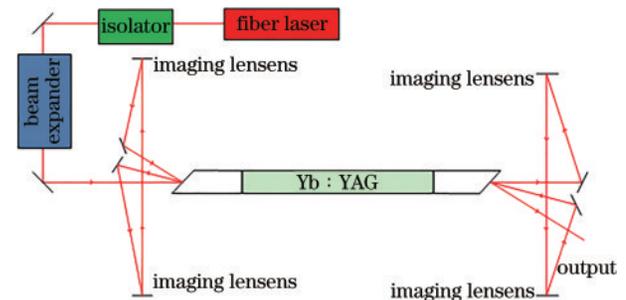


图 4 Yb 板条激光系统光路原理示意图

Fig. 4 Optical path schematic of Yb slab laser system

为了防止系统逆向放大激光损坏光纤激光器,在种子源和增益模块间加入偏振隔离系统。种子源输出为圆光斑,板条入口端面为矩形,为实现与板条光瞳匹配,同时兼顾与泵浦激光近场光强匹配,优化设计球、柱透镜组与光阑整形成像系统,将种子激光整形为 $2.2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的矩形光斑。如图 5 所示,采用角度三通放大结构,放大通次间使用反射式 4f 像传递系统,球面镜焦距为 500 mm (曲率 $R=1000\text{ mm}$)。

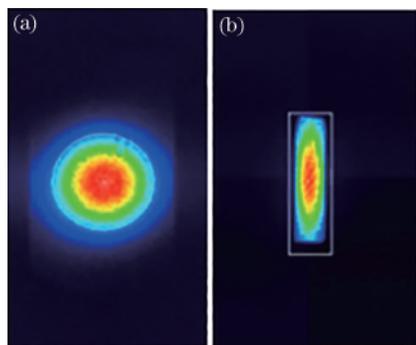


图 5 实验结果。(a)种子源光斑分布;(b)板条入口的光斑分布

Fig. 5 Experimental results. (a) Spot distribution of seed source; (b) spot distribution at the entrance of the slab

图 6 为 Yb 板条增益模块结构示意图。Yb:YAG 板条晶体尺寸为 $150\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2.2\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚),端面切角 45° ,板条中部约 120 mm 为多浓度掺杂区,两端为键合的非掺杂区。板条端面镀 1030 nm 增透膜,大面镀数微米厚光学膜层作为 940 nm 高透膜及 1030 nm 全反射膜。大面膜层通过钢层焊接至微通道铜热沉,采用大面传导水冷方式,及时高效散热。

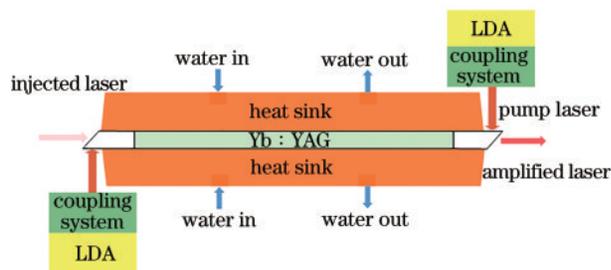


图 6 放大器增益模块示意图

Fig. 6 Schematic of amplifier gain module

抽运源采用自主封装的中心波长为 940 nm 的二极管阵列(LDA),单个抽运源最高抽运功率为 12.5 kW ,抽运源光强分布如图 7(a)所示。抽运激光经抽运耦合系统 0° 入射至板条大面,从 45° 端面内表面全反射进入板条掺杂区被吸收。抽运耦合系

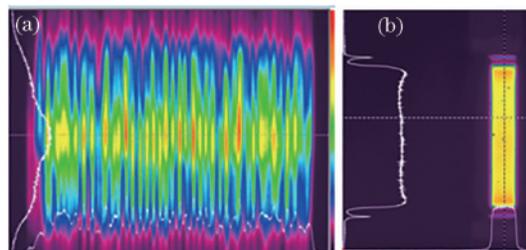


图 7 实验结果。(a)抽运源光强分布;(b)板条内荧光分布
Fig. 7 Experimental results. (a) Intensity distribution of pump source; (b) fluorescence distribution in the slab

统采用低像差整形技术和波导匀化技术,实现对 Yb 板条晶体的高均匀性抽运,图 7(b)为板条通光面的荧光分布,光强均匀性优于 95% 区域。

4 实验结果与分析

在种子激光注入功率为 0.55 kW ,泵浦功率为 25 kW 条件下,输出激光功率为 7.13 kW ,提取功率为 6.58 kW ,考虑到板条口径为 20 mm ,该板条单位口径输出能力为 3.3 kW/cm ,大于文献[6-7]的 2.73 kW/cm 和 2.3 kW/cm 。板条单位口径输出能力的提升除板条表面质量因素外,部分来源于优化设计的高精度低像差像传递系统。放大链路高精度低像差像传递系统降低了板条入口、出口处激光损耗,减小了主激光的加热效应,提升了板条负载能力。图 8 为输出功率和效率随泵浦功率变化而变化的情况。该激光器光光效率仅约 26% ,其部分原因在于注入激光强度不足。采用文献[14-16]的计算模型,当种子光注入功率提高到 1.5 kW 时,光光效率可提升至 32% 。因此通过进一步增加注入通量,光光效率和输出功率可获得进一步提升。

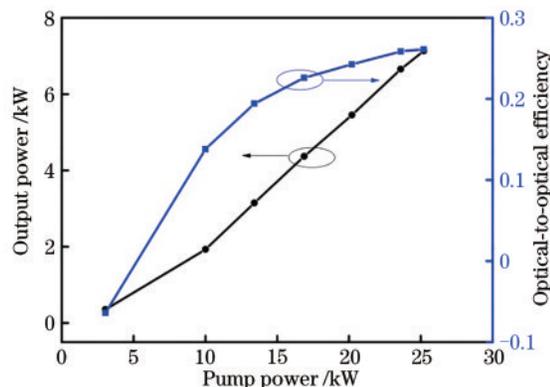


图 8 输出功率与光光效率随抽运功率变化曲线
Fig. 8 Output power and optical-to-optical efficiency variation curves with pump power

输出激光波前畸变由哈特曼波前传感器测得,输出激光光束质量由 β 仪测得。因采用低像差反射式像传递技术和高均匀性泵浦耦合技术,同时优化泵浦激光与种子激光的近场强度匹配,该激光器实现在无 AO 条件下,输出功率 7.13 kW 时光束质量 β 优于 2 倍衍射极限。以往的高功率板条激光器为获得高的光束质量一般需要加入 AO 系统,但因 AO 系统中变形镜分辨率限制和探测反馈机制,需对输出激光进行扩束整形和像面精确匹配,导致激光器体积和复杂性大幅增加。本文 7 kW 级高质量激光器因无 AO 系统,体积重量大幅降低,为高功率板条激光器的直接应用和激光器小型化轻量化奠定了基础。图 9 为 7.13 kW 下输出激光波前畸变的峰谷值(PV)与均方根值(RMS),分别为 0.5 μm 和 0.1 μm ,对应光束质量 β 优于 2 倍衍射极限。图 10 为激光满功率输出 13 s 内,光束质量随时间变化情况,图中两张远场图像分别对应光束质量 1.8 倍衍射极限和 2.18 倍衍射极限。

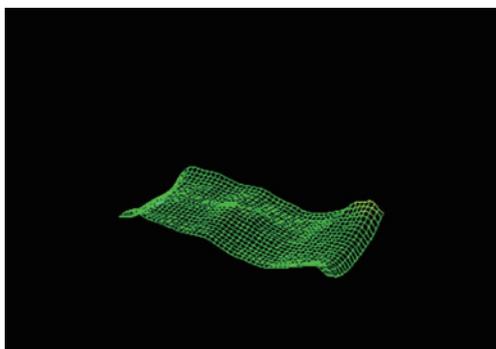


图 9 7.13 kW 输出时的近场波前

Fig. 9 Near-field wavefront when output power is 7.13 kW

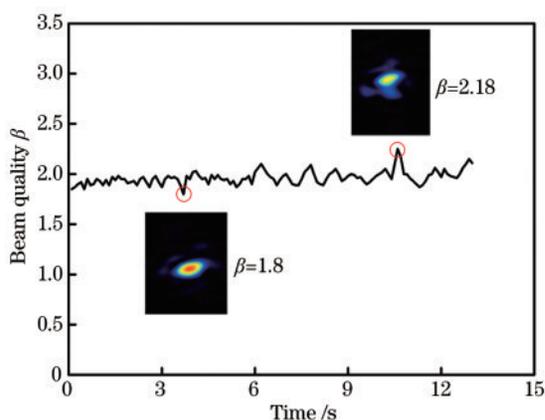


图 10 7.13 kW 输出时的 β 随时间变化曲线

Fig. 10 β changes with time when output power is 7.13 kW

5 结 论

综上所述,本文针对小口径 Yb 板条有效提取和高质量放大问题,深入分析了提取通次和像传递系统对放大效果的影响。理论计算了板条选通角和 4f 像传递系统的球差,计算结果表明反射式 4f 像传递系统产生的球差显著减小,有助于提升输出激光光束质量。搭建了一台室温单 Yb:YAG 板条激光放大器,板条宽度 20 mm,在泵浦功率 25 kW 下,输出激光功率 7.13 kW。采用低像差高精度反射式 4f 成像系统,同时优化泵浦光与种子激光近场强度匹配,实现无 AO 校正下输出光束质量 β 优于 2 倍衍射极限。因不含 AO 系统,激光器体积重量大幅降低,为 Yb 板条激光器小型化、轻量化奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Wang Z M, Xu J Q, Chen W B, et al. Progress of high-power solid-state slab lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(2): 48-53.
王志敏,徐剑秋,陈卫标,等.新一代大功率固体板条激光器的技术进展[J].激光与光电子学进展,2007,44(2):48-53.
- [2] Chen J B, Guo S F. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝,郭少锋.高能固态激光器技术路线分析[J].中国激光,2013,40(6):0602006.
- [3] Zhang L L, Meng J Q, Huang Y, et al. Recent advances in high-power solid-state slab lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 33-36.
张玲玲,孟俊清,黄燕,等.高功率板条激光器的研究进展[J].激光与光电子学进展,2005,42(4):33-36.
- [4] Yin L, Ma X H, Lu T T, et al. Conductively-cooled and bounce-pumped all-solid-state double-stage slab laser amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2340-2345.
尹亮,马秀华,陆婷婷,等.传导冷却反弹抽运结构的板条激光放大器[J].中国激光,2010,37(9):2340-2345.
- [5] Zhang W Q, Liu Y, Chen N J, et al. Laser diode double-pass double-end pumped Yb:YAG slab laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1101007.
张伟桥,刘洋,陈念江,等.激光二极管双端双程抽运 Yb:YAG 板条激光器[J].中国激光,2019,46

- (11): 1101007.
- [6] Li M, Shang J L, Zhou T J, et al. Theoretical research on zero-phonon line pumped Yb:YAG slab amplifier at room-temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0214003.
李密, 尚建力, 周唐建, 等. 室温下零声子线抽运 Yb:YAG 板条放大器的理论研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0214003.
- [7] Shi Y, Xu L, Yu Y, et al. Research on amplification characteristics of spontaneous emission of high-power and large-diameter slab [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 151402.
石月, 徐浏, 于益, 等. 高功率大口径板条自发辐射放大特性的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 151402.
- [8] Sueda K, Takahashi H, Kawato S, et al. High-efficiency laser-diodes-pumped microthickness YbYAG slab laser [EB/OL]. [2020-11-05]. https://www.researchgate.net/publication/235666092_High-efficiency_laser-diodes-pumped_microthickness_YbYAG_slab_laser.
- [9] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(6): 1457-1459.
- [10] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, et al. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1672-1674.
- [11] Chen X M, Xu L, Hu H, et al. High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24517-24523.
- [12] Li M, Zhu T J, Xu L, et al. High power continuous wave Yb:YAG composite crystal zigzag slab amplifier at room temperature[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 1-9.
- [13] Xu L, Wu Y C, Du Y L, et al. High brightness laser based on Yb:YAG MOPA chain and adaptive optics system at room temperature[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14592-14600.
- [14] Bourdet G L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 966-971.
- [15] Bourdet G L. Comparison of pulse amplification performances in longitudinally pumped Ytterbium doped materials[J]. *Optics Communications*, 2001, 200(1/2/3/4/5/6): 331-342.
- [16] Albach D, Chanteloup J C, le Touzé G, et al. Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb³⁺:YAG slabs[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3792-3801.