

Nd:YAG 平面波导激光放大器效率的影响因素

王君涛^{1,2}, 汪丹^{1,2}, 苏华^{2,3}, 周唐建^{1,2}, 徐浏^{1,2}, 吴振海^{1,2},
雷军^{1,2}, 吕文强^{1,2}, 陈月健^{1,2}, 童立新^{1,2}, 胡浩^{1,2}, 高清松^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

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 621900;

³北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

摘要 以 Nd:YAG 平面波导为激光放大器增益介质,研究了 1064 nm 激光在放大过程中光光效率的影响因素;采用基于棒状 Nd:YAG 的 1064 nm 自由运转振荡器为种子源,放大器抽运源为 808 nm 半导体激光器阵列,抽运光脉宽与种子光脉宽相同且同步输出;Nd:YAG 平面波导的尺寸为 60 mm×10 mm×1 mm,芯层厚度为 100 μm。对比研究了种子光能量、抽运能量和抽运方向对激光放大效率的影响。结果表明,当注入种子光能量为 10 mJ 时,实现了 100 Hz 脉冲重复频率下最大能量为 713 mJ 的准连续激光输出,此时的抽运能量为 1478 mJ,对应的光光效率为 47.6%。

关键词 激光器;激光放大器;平面波导;放大效率;端面抽运

中图分类号 T248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1201005

Influence Factors on Efficiency of Nd:YAG Planar Waveguide Laser Amplifier

Wang Juntao^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Su Hua^{2,3}, Zhou Tangjian^{1,2}, Xu Liu^{1,2},
Wu Zhenhai^{1,2}, Lei Jun^{1,2}, Lü Wenqiang^{1,2}, Chen Yuejian^{1,2}, Tong Lixin^{1,2},
Hu Hao^{1,2}, Gao Qingsong^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

Abstract Taking Nd:YAG planar waveguide as gain medium of a laser amplifier, we study the factors affecting optical-optical efficiency of laser with wavelength of 1064 nm during amplification. A free operational Nd:YAG rod oscillator with wavelength of 1064 nm is used as seed source, and a diode laser array with wavelength of 808 nm is used as the pump source. The pulse width of pump beam is equal to that of seed, and the output of pump beam and seed is synchronous. The size of the Nd:YAG planar waveguide is 60 mm×10 mm×1 mm, and the core thickness is 100 μm. The effects of seed energy, pump energy, and pump direction on the laser amplification efficiency are studied. The results show that when the input seed energy is 10 mJ, the quasi-continued laser with maximum energy of 713 mJ is obtained at the pulse repetition frequency of 100 Hz, the pump pulse energy is 1478 mJ, and the corresponding optical-optical efficiency is 47.6%.

Key words lasers; laser amplifier; planar waveguide; amplification efficiency; end pumping

OCIS codes 140.3280; 140.3580; 230.7390

收稿日期: 2017-06-30; 收到修改稿日期: 2017-08-03

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(HEL-2015-02)

作者简介: 王君涛(1984—),男,博士,副研究员,主要从事二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: wjt_caep@126.com

1 引 言

全固态激光器具有效率高、结构紧凑和性能稳定等诸多优点,在工业、医疗、军事和科研等方面具有广泛应用。随着各种应用需求的不断提高,对全固态激光器效率和功率的要求也越来越高。平面波导激光结合了板条激光^[1-3]和光纤激光^[4-6]的优势,是一种很有潜力的可以实现高效率、高功率输出的激光技术。

平面波导结构的激光增益介质是光纤激光增益介质和板条激光增益介质的中间状态,其宽度方向上为常规尺寸,厚度方向上为波导结构。波导结构的芯层为掺杂区,包层为折射率较小的非掺杂区域。到目前为止,已制备出的平面波导结构材料包括氧化物、氟化物和钨化物等^[7]。氧化物平面波导主要有 YAG、GGG、GdVO₄ 和 YVO₄ 等,其中 YAG 材料具有良好的物理化学性能和光学性能,因此 YAG 平面波导是最常用的平面波导结构激光增益介质^[8-12]。

Xiao 等^[13]报道了非对称包层的 Nd:YAG 波导谐振腔 1064 nm 激光器,平面波导的几何尺寸为 58 mm×10 mm×1 mm(长度×宽度×厚度),抽运光从侧面注入,在轴向形成正支非稳腔;抽运源在重复频率为 1 kHz、占空比为 20% 的准连续模式下工作,在非稳腔中获得功率为 280 W 的激光输出,斜率效率为 38%。Kang 等^[14]报道了高效率的端面抽运 Nd:YAG 平面波导激光器,平面波导的几何尺寸为 12 mm×5 mm×1 mm(长度×宽度×厚度),Nd:YAG 增益区掺杂的原子数分数为 1%,上下包层都是厚度为 0.3 mm 的纯 YAG;波导的一个端面作为后腔镜,镀有 1064 nm 高反膜和 808 nm 高透膜,另一个端面镀有 1064 nm 和 808 nm 高透膜,输出镜用平面镜;使用 2.0% 的耦合输出镜时,获得了最大功率为 2.90 W 的激光输出,光光效率为 58%。陈月健等^[15]研究了准连续 Nd:YAG 平面波导谐振腔,当脉冲重复频率为 500 Hz 时,1064 nm 激光的平均输出功率为 441 W;当脉冲重复频率 100 Hz 时,最大单脉冲输出能量为 928 mJ,对应的光光效率为 50.5%。

为了实现高光束质量、高功率激光的输出,主振荡功率放大(MOPA)是一种非常有效的途径。Wagner 等^[16]研究了基于 Nd:YAG 自成像平面波导的 1064 nm MOPA 激光器,采用基于 Nd:YAG 棒的被动调 Q 振荡器为种子源,经过三级平面波导放大后,获得了脉冲重复频率为 20 kHz、平均功率为 375 W 的激光输出,光光效率接近 40%。

上述研究工作主要集中在平面波导振荡器和 MOPA 的性能上,虽然实现了准连续条件下大平均功率的激光输出,但没有对平面波导激光放大器效率的影响因素进行分析。本文采用主振荡功率放大结构,以 Nd:YAG 平面波导为激光放大器,在准连续长脉冲工作模式下,研究种子光能量、抽运方向和抽运能量等参数对 1064 nm 激光放大效率的影响;采用 10 mJ 种子光实现了 100 Hz 脉冲重复频率下最大能量为 713 mJ 的准连续激光输出,光光效率为 47.6%。

2 实 验

为了研究 Nd:YAG 平面波导激光放大器效率的影响因素,设计了具有主振荡功率放大结构的 1064 nm 激光器,如图 1 所示,其中, F_x 为抽运光快轴方向的会聚透镜, F_{y1} 和 F_{y2} 为抽运光慢轴方向的成像透镜, FR 为法拉第旋光器, PBS 为偏振片, OC 为谐振腔输出腔镜, HR 为谐振腔高反镜, HWP 为半波片。种子源由 Nd:YAG 晶体棒、PBS、HR 和 OC 组成,在脉冲重复频率为 100 Hz 的条件下,实现了能量为 10 mJ、波长为

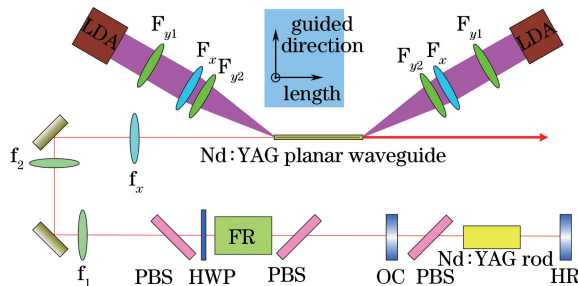


图 1 主振荡功率放大激光器光学系统示意图

Fig. 1 Diagram of master oscillator power amplifier laser system

1064 nm 的长脉冲激光输出,脉冲宽度 192 μs 。直径为 3 mm 的 Nd:YAG 晶体棒与侧向抽运的半导体激光器阵列封装于激光头内。隔离器由法拉第旋光器、半波片(HWP)和 2 个偏振片组成,保护振荡器免受后向回光的影响。球透镜 f_1 和 f_2 组成扩束系统,柱透镜 f_x 的会聚方向与平面波导的波导方向一致。2 个半导体激光器阵列(LDA)的 808 nm 抽运激光经过慢轴缩束和快轴会聚后,分别以不同的角度从 2 个端面进入平面波导内部。抽运光与种子光的脉宽相同,且同步输出,种子光单通放大实现高效率激光放大输出。

Nd:YAG 平面波导的尺寸为 60 mm(L) \times 10 mm(W) \times 1 mm(T),如图 2 所示,中间 50 mm \times 10 mm \times 100 μm (长度 \times 宽度 \times 厚度)的区域为增益区,掺杂的原子数分数为 1.5%。2 个尺寸为 50 mm \times 10 mm \times 450 μm (长度 \times 宽度 \times 厚度)的非掺杂 YAG 分别从上下键合到增益区的大面上,形成内包层,外包层是厚度为 3 μm 的 SiO₂ 倏逝膜。为了减小热效应,在波导的两端分别键合长度为 5 mm 的非掺杂 YAG。抽运源为具有 2 列 \times 10 bar 空间叠加结构的半导体激光器阵列,经快轴会聚后形成的线光斑全口径约为 600 μm ,可以完全耦合进入厚度为 1 mm 的平面波导,实现高效率的抽运耦合。平面波导的 2 个端面镀 808,1084 nm 高透膜。

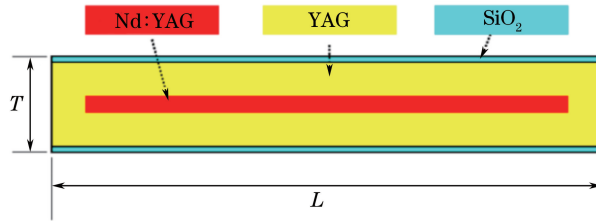


图 2 Nd:YAG 平面波导结构示意图

Fig. 2 Diagram of Nd:YAG planar waveguide structure

3 结果与分析

首先采用单端抽运结构,比较前端抽运和后端抽运时 Nd:YAG 平面波导激光放大输出的性能差别。采用后端抽运方式,最大抽运能量为 726 mJ,在 1,2,5,10 mJ 4 种不同注入种子光信号时测试输出能量,结果如图 3 所示。由图 3 可知,所有曲线中输出能量基本都随抽运能量的增大而线性增大,当注入种子光信号分别为 1,2,5,10 mJ 时,在最大抽运能量条件下的输出能量分别为 284,296,313,328 mJ。可见,种子光能量越大,输出能量越大,放大过程中的光光效率越大。图 4 所示为注入不同种子光信号时所有测试点的光光效率。由图 4 可知,当抽运能量较小时,光光效率随着抽运能量的增大而快速增大,之后缓慢增大,在最大抽运能量时光光效率达到最大。当注入种子光信号分别为 1,2,5,10 mJ 时,抽运能量为 726 mJ 条件下的放大光光效率分别为 39.0%,40.6%,42.5%,43.8%;由此可知,如果进一步增大抽运峰值功率,放大光光效率和输出能量都会进一步增大。

前端抽运放大采用另一个相同结构的抽运源,最大能量为 752 mJ。图 5 所示为 4 种不同注入种子光信

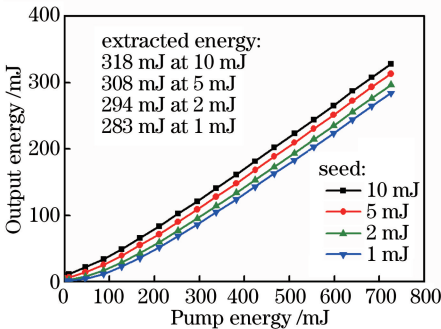


图 3 后端抽运时的放大输出能量

Fig. 3 Output energy as function of pump energy at backward pumping

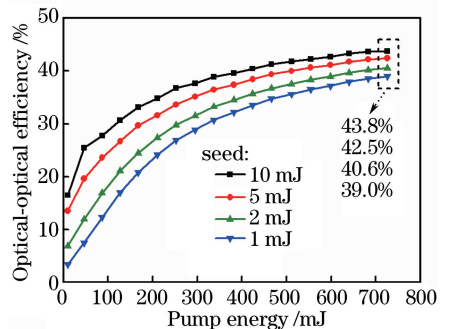


图 4 后端抽运时的光光效率

Fig. 4 Optical-optical efficiency as function of pump energy at backward pumping

号时的输出能量曲线。由图 5 可知,当注入种子光的能量较小时,抽运光能量增大到一定程度后,输出能量曲线的斜率减小。图 6 所示为不同注入种子光信号时所有测试点的光光效率。由图 6 可知:当抽运光能量小于 350 mJ 时,不同注入种子光的放大光光效率都随着抽运能量的增大而快速增大;随着抽运能量进一步增大,10 mJ 种子光的光光效率先缓慢增大再保持稳定,1 mJ 种子光的光光效率先稳定再缓慢减小;在最大抽运能量为 752 mJ 的条件下,1,2,5,10 mJ 注入种子光信号时的放大光光效率分别为 28.0%、33.0%、38.1%和 41.7%,均小于后端抽运时对应的光光效率。

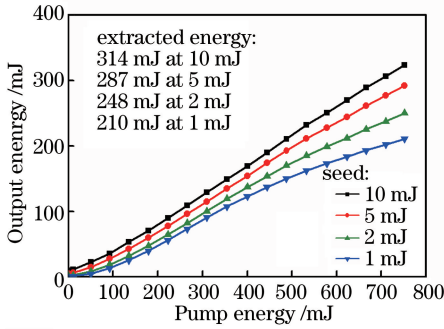


图 5 前端抽运时的输出能量

Fig. 5 Output energy as function of pump energy at forward pumping

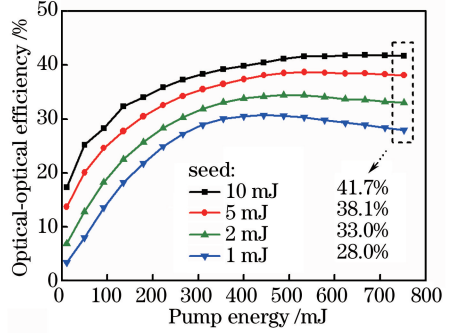


图 6 前端抽运时的光光效率

Fig. 6 Optical-optical efficiency as function of pump energy at forward pumping

为了对比平面波导激光器前端抽运和后端抽运的放大效率,将同一种子光的 2 个抽运方向的数据曲线置于一个图中,如图 7 所示。由图 7 可知,即使 2 个抽运源具有完全相同的结构,但由于 bar 条的个体差异,在相同的电流条件下,前端抽运源功率略大于后端抽运源功率。对于每一个种子光信号,在一定的抽运能量 E_c 以内,前端放大与后端放大的效果完全一致;超过 E_c 后,前端抽运与后端抽运的差异就会表现出来,后端抽运的光光效率缓慢增大,而前端抽运的光光效率逐渐减小,并且抽运能量越大,两者的区别越明显。随着种子光信号能量不断减小,抽运能量 E_c 也不断减小。原因是前端抽运时增益主要集中在材料的前半部分,后端抽运时增益主要集中在材料的后半部分。前端抽运时,种子光入口附近高增益区域内的激光功率较小,放大效率较小,未提取的储能较多,放大的自发辐射放大(ASE)严重;而后端抽运时,后端增益区内的激光功率很大,能够实现高效率的放大提取。此外,根据图 7 中的数据曲线可以推断,当种子光能量继续增大

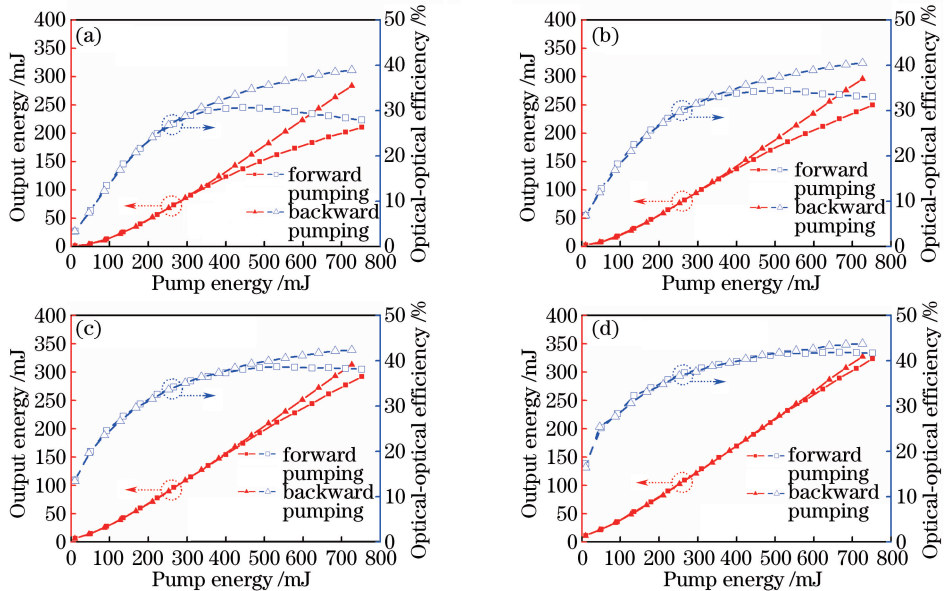


图 7 不同注入种子光信号时前端抽运和后端抽运的输出能量与光光效率。(a) 1 mJ,(b) 2 mJ,(c) 5 mJ,(d) 10 mJ

Fig. 7 Output energy or optical-optical efficiency versus pump energy at forward pumping or backward pumping with different seed signals. (a) 1 mJ, (b) 2 mJ, (c) 5 mJ, (d) 10 mJ

到一定程度时,在目前的抽运源能力下,前端抽运和后端抽运的放大效果趋于相同。

为了实现大能量的激光放大输出,采用 2 个抽运源在前后端同时工作,以增大总抽运功率。使用单脉冲能量为 10 mJ 的种子光实现了最大单脉冲能量为 713 mJ 的激光输出,双端抽运放大输出结果如图 8 所示。由图 8 可知:放大输出能量与抽运能量基本上呈线性关系;随着抽运能量增大,光光效率的增大逐渐减缓,最后光光效率稳定在 47.6%,此时的抽运能量为 1478 J。脉冲宽度为 192 μs ,因此峰值功率为 3.7 kW。最大输出时,水平方向和垂直方向的光束质量因子 M^2 分别为 3.4 和 3.9。借助半波片和布儒斯特角偏振片测得偏振度为 98%。在最大抽运能量下,当注入种子光能量分别为 5, 2, 1 mJ 时,平面波导激光放大器的输出能量分别为 685, 623, 580 mJ,相应的激光放大光光效率分别为 46%, 42%, 39%。

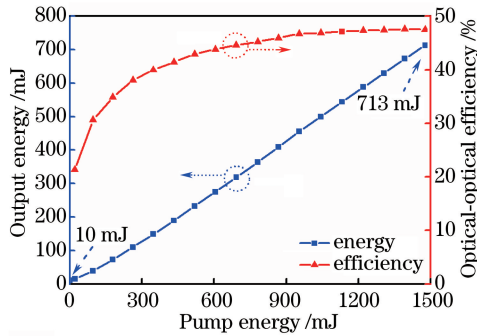


图 8 双端抽运时的输出能量与光光效率

Fig. 8 Output energy and optical-optical efficiency versus pump energy at dual end pumping

由于棒状 Nd:YAG 在大平均功率时存在严重的热效应,种子源无法在调节脉冲重复频率的同时仍保持输出激光性能,所以未在更大脉冲重复频率的条件下测试平面波导激光放大器的输出性能;但根据已有的平面波导激光振荡器实验结果^[13,15]和平面波导强大的散热能力可以推知,平面波导激光放大器可以在脉冲重复频率为 500 Hz 甚至 1000 Hz 时仍保持相近的单脉冲激光输出能量和光束质量。

4 结 论

以 Nd:YAG 平面波导为激光放大器增益介质,研究了波长为 1064 nm 的激光在放大过程中光光效率的影响因素,得到了激光放大效率与种子光能量、抽运能量、抽运方向之间的关系。光光效率随着种子光功率的增大而增大,当抽运能量较小时,前端抽运和后端抽运的放大效果一致;当抽运能量较大时,后端抽运效率大于前端抽运效率。在双端抽运方式下,当注入种子光能量为 10 mJ 时,实现了 100 Hz 脉冲重复频率下最大能量为 713 mJ 的准连续激光输出,此时抽运能量为 1478 mJ,对应的光光效率为 47.6%。实现了 71.3 倍的激光放大,输出激光峰值功率为 3.7 kW。该实验结果对 Nd:YAG 平面波导的 1319 nm 激光放大性能和其他平面波导材料的激光放大性能研究都具有很好的借鉴和参考作用。

参 考 文 献

- [1] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 357-397.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 357-397.
- [2] Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, *et al.* Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202001.
高清松, 胡浩, 裴正平, 等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202001.
- [3] Yin Liang, Ma Xiuhua, Lu Tingting, *et al.* Conductively-cooled and bounce-pumped all-solid-state double-stage slab laser amplifier[J]. Chinese J 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.
- [4] Snitzer E, Po H, Hakimi F, *et al.* Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. Conference on Optical Fiber Sensors, 1988: PD5.
- [5] Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.* Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J].

- Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502003.
- 代守军, 何兵, 周军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502003.
- [6] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, *et al.* Tm-based fiber-laser system with more than 200 MW peak power[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 9-12.
- [7] Jelinek M. Functional planar thin film optical waveguide lasers[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(2): 91-99.
- [8] Chandler P J, Field S J, Hanna D C, *et al.* Ion-implanted Nd:YAG planar waveguide laser[J]. Electronics Letters, 1989, 25(15): 985-986.
- [9] Filgas D, Rockwell D, Spariosu K. Next-generation lasers for advanced active EO systems[J]. Raytheon Technology Today, 2008, 1: 9-13.
- [10] van der Ziel J P, Bonner W A, Kopf L, *et al.* Laser oscillation from Ho^{3+} and Nd^{3+} ions in epitaxially grown thin aluminum garnet films[J]. Applied Physics Letters, 1973, 22(12): 656-657.
- [11] Brown C T A, Bonner C L, Warburton T J, *et al.* Thermally bonded planar waveguide lasers[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(9): 1139-1141.
- [12] Thomson I J, Baker H J, Wlodarczyk K, *et al.* 400 W Yb:YAG planar waveguide laser using novel unstable resonators [C]. SPIE, 2010, 7578: 75780K.
- [13] Xiao L, Cheng X J, Xu J Q. High-power Nd:YAG planar waveguide laser with YAG and Al_2O_3 claddings[J]. Optics Communications, 2008, 281(14): 3781-3785.
- [14] Kang H X, Zhang H, Yan P, *et al.* An end-pumped Nd:YAG planar waveguide laser with an optical to optical conversion efficiency of 58% [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(12): 879-881.
- [15] Chen Yuejian, Jiang Hao, Wang Juntao, *et al.* Planar waveguide oscillator with high output power and high efficiency [J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(4): 0401001.
陈月健, 姜豪, 王君涛, 等. 高功率高效率平面波导激光振荡器实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0401001.
- [16] Wagner G J, Callicoatt B E, Bennett G T, *et al.* 375 W, 20 kHz, 1.5 ns Nd:YAG planar waveguide MOPA [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2011: PDPB1.