

# 高功率高效率平面波导激光振荡器实验研究

陈月健<sup>1,2</sup>, 姜 豪<sup>1,2,3</sup>, 王君涛<sup>1,2\*</sup>, 周唐建<sup>1,2</sup>, 童立新<sup>1,2</sup>,  
吴振海<sup>1,2</sup>, 徐 浏<sup>1,2</sup>, 汪 丹<sup>1,2</sup>, 高清松<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>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;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

**摘要** 研究了一种准连续工作下二极管抽运的高功率高效率 Nd:YAG 平面波导激光振荡器。实验采用尺寸为 1 mm×10 mm×60 mm 的平面波导作为增益介质, 搭建平平腔实验装置, 研究了平面波导激光器在不同输出镜透射率和不同重复频率下的激光输出特性。实验结果表明, 当输出腔镜透射率为 79% 时, 在重复频率为 500 Hz、工作电流为 200 A 下, 获得 1064 nm 激光的平均输出功率为 441 W; 在 5 种不同重复频率下获得最大单脉冲能量为 928 mJ, 此时有效光光效率为 53.2%。输出激光脉冲波形与抽运光脉冲波形完全一致, 脉冲宽度都是 240 μs。通过系统优化改进, 该激光器输出功率有能力进一步提升。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 平面波导; 谐振腔; Nd:YAG

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0401001

## Planar Waveguide Oscillator with High Output Power and High Efficiency

Chen Yuejian<sup>1,2</sup>, Jiang Hao<sup>1,2,3</sup>, Wang Juntao<sup>1,2</sup>, Zhou Tangjian<sup>1,2</sup>, Tong Lixin<sup>1,2</sup>,  
Wu Zhenhai<sup>1,2</sup>, Xu Liu<sup>1,2</sup>, Wang Dan<sup>1,2</sup>, Gao Qingsong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

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

<sup>3</sup>Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** A diode pump high power and high efficiency Nd:YAG planar waveguide oscillator at quasi-continuous mode is reported. The 1 mm×10 mm×60 mm planer waveguide is selected as gain medium. The plane-plane cavity is built, and the output properties of the planar waveguide laser under different output mirror transmissions and different pulse repetition rates are studied. Experimental results show that when the output coupler transmission is 79%, an average output power of 441 W for the 1064 nm laser is achieved under the pulse repetition rate of 500 Hz and the drive current of 200 A. Under five different repetition rates, the maximum single pulse energy is 928 mJ, and the effective optical to optical efficiency is 53.2%. The pulse waveform of output laser is consistent with that of the pump laser, and both have a pulse width of 240 μs. The output power of the oscillator can be increased after the system optimization.

**Key words** lasers; solid-state laser; planar waveguide; resonator; Nd:YAG

**OCIS codes** 140.3410; 140.3480; 140.3538; 140.3580

收稿日期: 2016-11-07; 收到修改稿日期: 2016-12-19

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 2014-03)

作者简介: 陈月健(1980—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事高功率二极管抽运固体激光技术方面的研究。

E-mail: chen Yue369@126.com

\* 通信联系人。E-mail: wangjuntao@caep.cn

## 1 引 言

平面波导激光器具有实现高功率高效率激光输出的潜力<sup>[1-2]</sup>,从而获得科研人员的深入研究。平面波导增益介质构型介于板条<sup>[3-5]</sup>和光纤<sup>[6-8]</sup>之间,结合了两者在构型上的优势而避免其劣势,使之具有光束质量好、激光效率高、抽运耦合易行以及高效散热等优点。平面波导结构多样,包括双包层结构<sup>[9]</sup>、相位锁定结构<sup>[10]</sup>和自成像结构<sup>[11]</sup>等;并且激光波段涵盖范围广,在激光输出的 $0.6\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 波段都有不错的表现。再者,材料选择灵活,目前主要有激光晶体材料和激光陶瓷材料两大类,分别可用热键合和真空烧结来制备。各种有机材料、氧化物和钨酸盐等<sup>[12]</sup>也用于平面波导构型中。以平面波导作为增益介质的激光振荡器具有结构紧凑、激光增益高、阈值低的特点。近年来关于平面波导激光振荡器腔的构型、材料的制备、高效率高功率激光输出等方面都出现了相关的研究报道<sup>[13-16]</sup>。

2008年,Xiao等<sup>[17]</sup>使用一块非对称包层Nd:YAG平面波导进行了实验研究,增益介质尺寸为 $1\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 58\ \text{mm}$ 。采用平平腔输出,在重复频率为 $1000\ \text{Hz}$ 准连续抽运下,其输出平均功率为 $310\ \text{W}$ ,斜效率为 $42\%$ 。从实验结果来看,激光输出平均功率较高,但光光效率不高。同年,Kang等<sup>[18]</sup>采用热键合技术制备了外观尺寸为 $1\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}\times 12\ \text{mm}$ 的Nd:YAG平面波导增益介质,其芯层厚度为 $400\ \mu\text{m}$ 的Nd:YAG,上下包层厚度为 $300\ \mu\text{m}$ 的非掺杂YAG。采用光纤耦合输出的抽运源,输出腔镜贴近增益介质的短腔结构,在抽运功率为 $5\ \text{W}$ 时获得了 $2.9\ \text{W}$ 激光输出,光光效率为 $58\%$ 。此次实验得到了较高的光光效率,但激光输出的功率值偏低。国内外近年来在平面波导振荡器方面的研究,都无法同时得到高功率和高效率的激光输出。本文以对称的Nd:YAG平面波导为激光增益介质,采用平平腔结构得到平均功率为 $441\ \text{W}$ 的激光输出,有效光光效率达到 $53.2\%$ 。

## 2 实验装置

高质量平面波导增益介质是高效率、高功率平面波导激光器的核心元件。优化平面波导增益介质构型设计,提高激光输出性能,一直是关注和研究的主要方向。通过建立平面波导激光介质的热效应模型<sup>[2]</sup>,进行模拟分析和理论计算,发现在芯层厚度一定时,波导越薄,最大容许承载的热负载和抽运功率越高。激光在YAG/Nd:YAG/YAG平面波导芯层内传播时,实现单模传输的条件是芯层的厚度不大于 $8.9\ \mu\text{m}$ 。考虑到加工工艺难度和实际激光器系统需求,芯层厚度控制在 $100\ \mu\text{m}$ ,整个波导的外观尺寸为 $1\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$ ,如图1所示。图1(a)为平面波导的侧面图,图1(b)为芯层内平行于大面的剖面图。长度为 $50\ \text{mm}$ 的芯层为掺杂原子数分数为 $1.5\%$ 的Nd:YAG晶体,上下包层均为非掺杂YAG晶体,通过芯层和包层的微小折射率差,把激光约束在芯层内传输。为减小热效应,两端各键合 $5\ \text{mm}$ 长的非掺杂YAG。波导的两个端面镀 $1064$ 和 $808\ \text{nm}$ 的高透膜,两个大面镀 $\text{SiO}_2$ 倏逝膜。

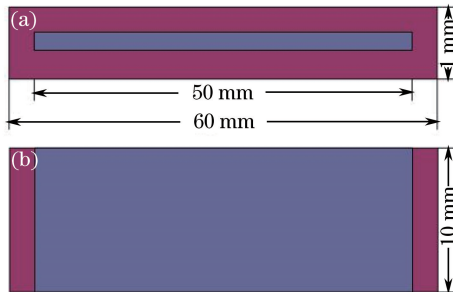


图1 平面波导结构示意图

Fig. 1 Schematic of planar waveguide configuration

图2为实验中搭建的平面波导谐振腔光路示意图。谐振腔左右对称,其中柱透镜曲率半径 $R = 135\ \text{mm}$ ,并且腔镜和波导端面都处在柱透镜的前后焦面上。后腔镜和输出镜分别采用 $1064\ \text{nm}$ 高反射率平面镜( $R \geq 99.95\%$ )和高透射率平面镜,平面波导的两端各放置一个柱透镜对导波方向的光线进行准直聚焦。抽运源采用2列10 bar空间叠加结构的二极管激光器(DLA),出射光斑大小为 $10\ \text{mm}$ (慢轴) $\times 18.9\ \text{mm}$ (快轴),两个方向的发散角分别为 $4^\circ$ 和 $0.2^\circ$ 。慢轴方向用 $R_y = 35\ \text{mm}$ 和 $R_y = 30\ \text{mm}$ 柱透镜缩束

成像,快轴方向用  $R_x = 35 \text{ mm}$  的柱透镜对光斑聚焦。DLA 的慢轴方向和快轴方向分别对应平面波导的宽度方向和厚度方向,抽运光斑由慢轴收缩和快轴会聚后以一定的倾斜角度从波导端面进入增益介质内部。为了避免未吸收的抽运光进入另一端的抽运源对其造成损害,两端的抽运源选用不同的倾斜角度。表 1 为在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  水温、脉冲宽度为  $240 \text{ }\mu\text{s}$  时的单脉冲抽运能量随加载电流的变化关系。

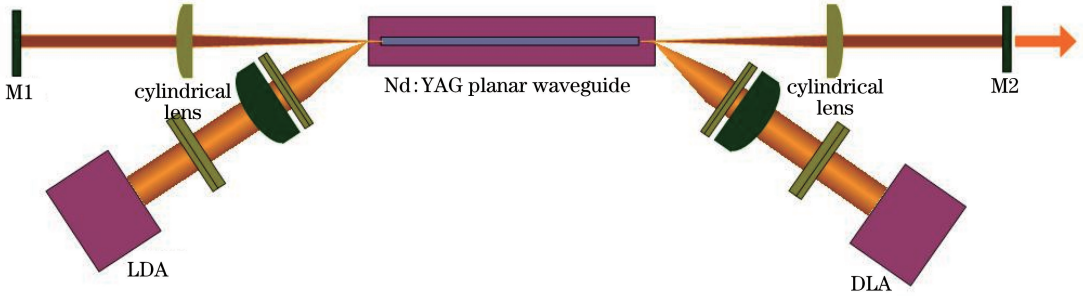


图 2 平面波导谐振腔光学示意图

Fig. 2 Schematic of planar waveguide cavity

表 1 不同加载电流下抽运单脉冲能量

Table 1 Single pump energy at different driver currents

Current / A	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Energy / mJ	122	326	539	753	973	1189	1410	1627	1837

### 3 实验结果与分析

输出腔镜的透射率对激光振荡器的输出功率有重要影响,在平面波导这种高增益的谐振腔中研究不同透射率时的激光输出性能。实验中分别采用透射率为  $30\%$ ,  $50\%$ ,  $69\%$  和  $79\%$  的 4 种输出镜,在重复频率为  $100 \text{ Hz}$ 、抽运脉宽为  $240 \text{ }\mu\text{s}$  时,输出激光功率随抽运光功率的变化关系如图 3 所示。从图 3 可以看出,对每一种透射率的腔镜,输出功率与抽运功率均基本呈线性增加关系,抽运功率加载到  $119 \text{ W}$  时没有任何饱和现象,也没有出现饱和的趋势。4 种不同的输出镜下,抽运功率在  $1\sim 2.5 \text{ W}$  之间就能得到激光输出,说明谐振腔内的增益高、阈值低。激光输出性能最好的是透射率  $T = 79\%$  的输出镜,得到激光最大输出功率为  $59 \text{ W}$ ,对应光光效率为  $50\%$ 。因此,在后面实验中采用透射率为  $79\%$  的平面镜作为输出腔镜。

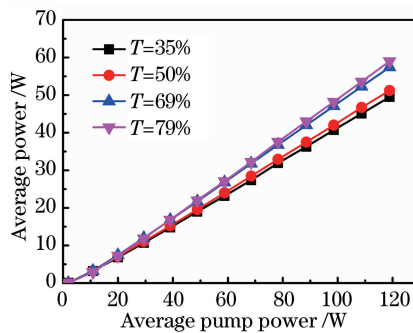


图 3 不同输出腔镜下的输出平均功率

Fig. 3 Average output power at different output couplers

改变激光器工作重复频率,从  $100 \text{ Hz}$  逐渐提高到  $500 \text{ Hz}$ ,对不同脉冲重复频率下的激光输出特性进行研究。图 4 给出了不同脉冲重复频率下输出功率随单脉冲抽运能量的关系。可以看出,在这 5 种重复频率下,输出功率都随着电流呈线性增加关系,并且都未出现饱和现象和趋势。在工作电流为  $200 \text{ A}$  时,5 种重复频率下激光输出的平均功率依次为  $92.8, 182, 273, 358$  和  $441 \text{ W}$ 。

图 5 给出了不同脉冲重复频率下的单脉冲能量和重复频率为  $100 \text{ Hz}$  下的光光效率。低电流时 5 种重复频率下的单脉冲能量基本重合,电流逐渐提高后单脉冲能量随重复频率增加而略有下降。在重复频率为  $100 \text{ Hz}$ 、工作电流为  $200 \text{ A}$  时,得到最大单脉冲能量为  $928 \text{ mJ}$ ,光光效率为  $50.5\%$ ,考虑到抽运光的吸收率

为 95%，实际上有效的光光效率达到了 53.2%。在重复频率为 100 Hz 时，光光效率随工作电流整体上呈不断增长的趋势。在抽运工作电流为 40 A 时，光光效率为 33%，随着电流的增大，光光效率的增长速度逐渐减慢，在 200 A 时，光光效率仍然保持着不断提高的趋势，如果继续提高抽运峰值功率，光光效率仍会有所提高。采用示波器和光电探测管记录下了激光输出的脉冲波形，输出激光脉冲宽度为 240  $\mu\text{s}$ ，对应的最大峰值功率为 3.9 kW。200 A 时的脉冲波形如图 6 所示，a 曲线为抽运源的驱动电流信号，脉宽为 240  $\mu\text{s}$ ，b 曲线为输出激光信号。可以看出，在抽运电流加载上升期间，就出现了弛豫振荡，脉冲建立时间从电流上升起点算起只有约 8  $\mu\text{s}$ 。当抽运功率恒定输出后，激光器输出强度稳定。棒状 Nd:YAG 在自由振荡器中的脉冲建立时间远大于平面波导 Nd:YAG 振荡器。这是因为，在同样的抽运功率下，平面波导 Nd:YAG 中的小信号增益系数比棒状 Nd:YAG 高 1~2 个数量级，增益越高脉冲建立时间越短。平面波导振荡器中，在抽运工作期间，振荡输出激光的瞬时功率随时间有很高稳定性，如图 6 所示。极短的脉冲建立时间和较高的瞬时功率稳定性是自由振荡平面波导谐振腔区别于其他构型增益介质自由振荡谐振腔的主要特点。

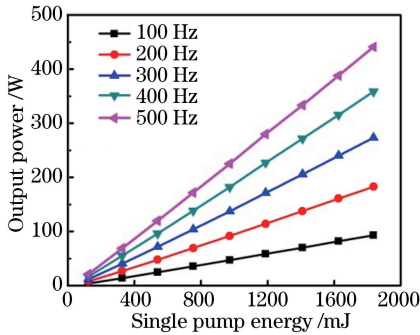


图 4 不同激光重复频率下的输出平均功率

Fig. 4 Average output power at different repetition rates

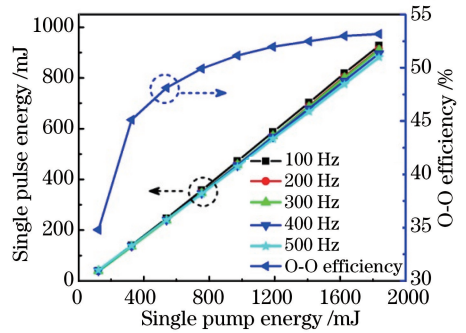


图 5 单脉冲能量和光光效率

Fig. 5 Single pulse energy and optical to optical efficiency

激光重复频率为 100 Hz 下的最大输出能量时，使用  $M^2$  仪 ( $M^2$ -200, Spricon, 美国) 对光束质量进行测量。导波方向的光束质量为  $M_x^2 = 9.8$ ，测试拟合曲线和远光光斑强度分布如图 7 所示。后面将对谐振腔的结构进行优化改进，在不影响激光输出功率和效率的前提下提高光束质量，实现高亮度的激光输出。

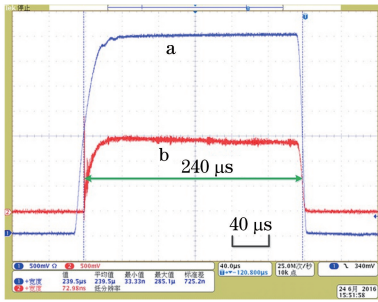


图 6 输出激光的脉冲波形

Fig. 6 Pulse waveform of output laser

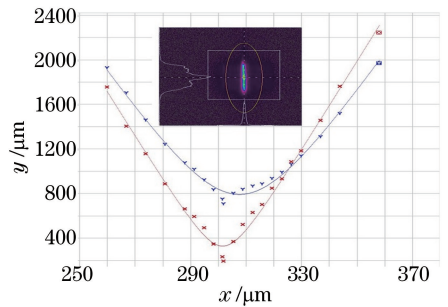


图 7 重复频率为 100 Hz、工作电流为 200 A 时的光束质量

Fig. 7 Beam quality at repetition rate of 100 Hz and current of 200 A

## 4 结 论

对激光准连续输出的 1064 nm Nd:YAG 平面波导激光振荡器进行了实验研究，分析了在不同输出镜和不同重复频率等条件下激光的输出特性。在最佳的透射率腔镜、500 Hz 脉冲重复频率下获得了自由振荡的最高激光平均输出功率为 441 W。100 Hz 下最大单脉冲能量为 928 mJ，有效光光效率达到 53.2%，脉冲宽度为 240  $\mu\text{s}$ ，峰值功率为 3.9 kW。激光器系统经过优化改进后，激光输出功率将有能力进一步提高。

## 参 考 文 献

[1] Filgas D, Rockwell D, Spariosu K. Next-generation lasers for advanced active EO systems[J]. Raytheon Technol



- Today, 2008, 1: 9-13.
- [2] Wang Juntao, Wang Xiaojun, Zhou Tangjian, *et al.* Design of end-pumped double cladding Nd:YAG planar waveguide laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102009.  
王君涛, 王小军, 周唐建, 等. 端面抽运双包层 Nd:YAG 平面波导激光放大器设计[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102009.
- [3] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 357-397.  
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 357-397.
- [4] 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.
- [5] Wang Dan, Zhou Tangjian, Wang Juntao, *et al.* Hundreds watts Na:YAG slab laser amplifier with high beam quality [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002001.  
汪丹, 周唐建, 王君涛, 等. 百瓦级高光束质量 Nd:YAG 板条激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002001.
- [6] Wang Yanshan, Sun Yinhong, Ma Yi, *et al.* Experimental study on high brightness 1018 nm ytterbium doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102007.  
王岩山, 孙殷宏, 马毅, 等. 高亮度 1018 nm 光纤激光实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102007.
- [7] Zhang Xiujuan, Duan Yunfeng, Zhao Shui, *et al.* Experimental study on high efficient all-fiber lasers at 1018 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0414002.  
张秀娟, 段云峰, 赵水, 等. 高效率 1018 nm 全光纤激光器实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0414002.
- [8] Hu Zhitao, He Bing, Zhou Jun, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080002.  
胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080002.
- [9] Bonner C L, Bhutta T, Shepherd D P, *et al.* Double-clad structures and proximity coupling for diode-bar-pumped planar waveguide laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 236-242.
- [10] Hettrick S J, Mackenzie J I, Harris R D, *et al.* Ion-exchanged tapered-waveguide laser in neodymium-doped BK7 glass [J]. Optics Letters, 2000, 25(19): 1433-1435.
- [11] Xu J. Quasi-self-imaging planar waveguide lasers with high-power single-mode output[J]. Optics Communications, 2006, 259(1): 251-255.
- [12] Jelinek M. Functional planar thin film optical waveguide lasers[J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(2): 91-99.
- [13] Tan Y, Akhmalidze S, Zhou S, *et al.* Guided continuous-wave and graphene-based Q-switched lasers in carbon ion irradiated Nd:YAG ceramic channel waveguide[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3572-3577.
- [14] Florent S, Western B, Alain B, *et al.* Red and orange Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> planar waveguide laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 455-457.
- [15] Wang J, Xu L, Chen Y, *et al.* 944 mJ Nd:YAG planar waveguide laser amplifier with the optical to optical efficiency of 52% [J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22661-22669.
- [16] Lin H, Tang F, Chen W, *et al.* Diode-pumped tape casting planar waveguide YAG/Nd:YAG/YAG ceramic laser[J]. Optics Letters, 2015, 23(6): 8104-8112.
- [17] Xiao L, Cheng X, Xu J. High-power Nd:YAG planar waveguide laser with YAG and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> claddings[J]. Optics Communications, 2008, 281(14): 3781-3785.
- [18] Kang H X, Zhang H, Yan P, *et al.* An end-pumped Nd:YAG planar waveguide laser with an optical to conversion efficiency of 58% [J]. Laser Phys Lett, 2008, 5(12): 879-881.