

## 高重复频率高功率窄线宽激光放大器

颜凡江<sup>1,2,3</sup>, 杨 策<sup>4</sup>, 陈 檬<sup>4</sup>, 桑思晗<sup>1,2,3</sup>, 李梦龙<sup>1,2,3</sup>, 蒙裴贝<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 北京市航空智能遥感装备工程技术研究中心, 北京 100094; 3. 中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室, 北京 100094; 4. 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;)

**摘要:** 高重复频率、高功率、窄线宽的激光在激光雷达领域具有重要的应用价值。在对高重复频率窄线宽激光进行放大时, 为了同时实现高放大倍率与高光束质量激光输出, 在高重复频率、窄线宽被动调 Q 激光器作为种子源的前提下, 设计了利用 888 nm 半导体激光端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 块状晶体实现高增益的一级放大, 808 nm 半导体激光侧面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条晶体实现低热透镜效应的二级放大的方案。在重复频率 10 kHz 时, 获得了峰值功率 5 MW, 线宽 154 pm, 脉冲宽度 0.6 ns, 平均功率 31.5 W, 光束质量  $M^2$  为 1.98 的激光输出。从而验证了将高放大倍率与高光束质量分别控制的放大器设计思路。

**关键词:** 放大器; 高重复频率; 高功率; 窄线宽; 端面泵浦

中图分类号: TN124 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0206002

## High repetition, high peak power and narrow line-width laser amplifier

Yan Fanjiang<sup>1,2,3</sup>, Yang Ce<sup>4</sup>, Chen Meng<sup>4</sup>, Sang Sihan<sup>1,2,3</sup>, Li Menglong<sup>1,2,3</sup>, Meng Peibei<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;  
2. Beijing Engineering Technology Research Center of Aerial Intelligent Remote Sensing Equipment's, Beijing 100094, China;  
3. Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology of CAST, Beijing 100094, China;  
4. Institute of Laser Engineering of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China )

**Abstract:** The laser with high repetition rate, high peak power and narrow line width has important application value in the field of laser radar. In the amplification of high repetition frequency and narrow line width laser, in order to achieve both high magnification and high beam quality laser output at high repetition rate, narrow line width of passively Q-switched laser used to be the seed source, high gain amplifier using 888 nm diode laser end pumped Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, side pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab crystal thermal lens effect of two stage amplification scheme were designed. At the repetition rate of 10 kHz, the average power of 31.5 W, and the laser beam quality of  $M^2$  1.98 were obtained. The peak power was 5 MW, the line width was 154 pm and the pulse width was 0.6 ns. Thus, the design idea of amplifier with high magnification ratio and high beam quality control individually was verified.

**Key words:** amplifier; high repetition rate; high peak power; narrow line-width; end pump

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

作者简介: 颜凡江(1983-)男, 高级工程师, 硕士, 主要从事空间应用激光器方面的研究。Email: yanfj508@163.com

## 0 引言

高重复频率、高峰值功率、窄线宽的激光在激光雷达领域具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。高峰值功率可以保证探测距离,高重复频率可以探测更多的距离信息点,而窄线宽可以为激光雷达带来更高的接收信噪比。

近年来,针对高重复频率、高峰值功率的多通板条放大器有了很多研究<sup>[2-3]</sup>。例如,Agnesi 等人采用亚纳秒脉宽、10 kHz 的半导体激光器作为种子源, Nd:YVO<sub>4</sub> 梯形板条双通放大结构,实现了平均功率 5.45 W、重复频率 10 kHz、脉宽 0.577 ns 的激光输出<sup>[4]</sup>;Shidong Zhuang 等报道了在 Nd:GdYVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器中获得重复频率 7.86 kHz、脉宽 1.17 ns、单脉冲能量 39.5 μJ 的稳定脉冲输出<sup>[5]</sup>。孙哲等报道了一种 Nd:YVO<sub>4</sub> 的板条激光放大器,实现重复频率 20 Hz、平均功率 6.3 W、脉冲宽度 2.52 ns<sup>[6]</sup>。

然而针对高重复频率、高峰值功率,同时也能满足窄线宽的激光放大器报道较少,文中为了在高重复、窄脉宽、窄线宽激光放大过程中,同时实现高增益与高光束质量,采取了将高增益与高光束质量分别控制的思路,报道了一种采用被动调 Q 微片激光器作为主振荡器,单端泵浦块状晶体作为一级放大实现高增益、侧面泵浦板条晶体作为二级放大实现高光束质量控制的方案,从而获得了高重复频率、高峰值功率、窄线宽的激光输出,激光重复频率 10 kHz,峰值功率 5 MW,线宽 154 pm,平均功率 31.5 W,  $M^2$  小于 1.98。

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主振荡器采用 Nd:YAG/Cr:YAG 被动调 Q 激光器,输出重复频率 10 kHz,单脉冲能量 100 μJ,脉冲宽度 0.62 ns,线宽 87 pm,光束质量  $M^2$  因子 1.2。主振荡器激光经过准直后进入放大级,一级放大增益介质选择发射截面大的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。晶体沿  $\alpha$  轴切割,掺杂浓度 0.8%,尺寸为 4 mm×4 mm×25 mm,两端面镀有 888 nm 和 1 064 nm 双波长增透膜,泵浦源采用 100 W、888 nm 光纤耦合激光器,通过耦合聚焦镜头汇聚在晶体内部,连续泵浦。分别通过耦合器与全反镜 1( $R=80$  mm),准直镜组 1 与全反镜 2( $R=80$  mm)构建泵浦光与激

光的 4f 相传递系统,使其达到最佳模式匹配。二级放大选择掺杂浓度 0.8% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条作为增益介质。晶体板条沿  $\alpha$  轴切割,尺寸为 14 mm×4 mm×3 mm,板条为平行四边形,两侧切角 12°,并镀 1 064 nm 增透膜,上下两个大面采用钢焊,焊接在紫铜热沉上。半导体泵浦源为两个 100 W 模块、波长为 808 nm 的半导体激光器,泵浦偏振方向沿 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体  $c$  轴方向,连续泵浦。泵浦光通过微柱透镜整形,匀化后入射激光晶体。

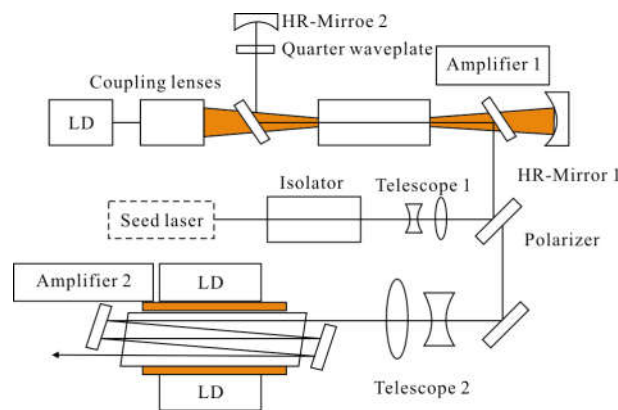


图 1 激光放大器光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical path of laser amplifier

## 2 计算与分析

为了控制二级放大板条晶体中的热分布,对二级放大泵浦光在晶体内的吸收进行了仿真,图 2 为沿晶体厚度中心的吸收泵浦光二维剖面分布。可以看到,双端泵浦使得在泵浦光传输方向的吸收分布较为平坦,而另一个方向的吸收分布由于 LD 慢轴方向发光尺寸较大实现了近平顶,有利于缓解热效应引起的光束质量恶化。

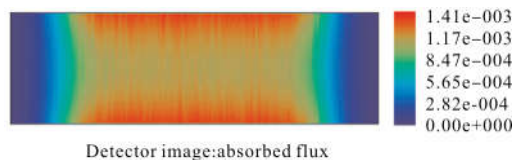


图 2 板条晶体中泵浦光的二维分布

Fig.2 Two dimensional distribution of pump light in slab crystal

按照 P.V. Avizonis, R.L. Grotbeck 等人提出的理论<sup>[7]</sup>,双程放大的输出能量可表示为:

$$E_1 = E_s \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_1}{E_s} \right) - 1 \right] \exp(g'_0 l) \right\} \quad (1)$$

式中： $E_1$  即等效于单程放大器的输出能量； $E_s$  为四能级下的饱和能量密度， $E_s = hc/\sigma$ ； $g'_0$  为反向的小信号增益，可表示为：

$$g'_0 = (1 - \eta_1) g_0 \quad (2)$$

式中： $\eta_1$  为单程提取效率； $g_0$  为小信号增益系数。

$$g_0 = \frac{\eta_q \eta_s \eta_b \eta_{st} E_{abs}}{E_s V} \quad (3)$$

式中： $h$  为普朗克常量； $\nu$  是激光频率； $\eta_q$  为量子效率； $\eta_s$  为斯托克斯系数； $\eta_b$  为泵浦模式和激光模式之间的重叠效率，一级放大为 1，二级放大为 0.83； $\eta_{st}$  为储能效率； $V$  为泵浦区的体积，一级放大为  $4.2 \text{ mm}^3$ ，二级放大为  $72 \text{ mm}^3$ ； $E_{abs}$  为板条晶体吸收的泵浦能量，一级放大最大为 10 mJ，二级放大最大为 20 mJ。

求解上述微分方程，得到一级单程放大的泵浦功率与输出能量的关系如图 3 中黑色曲线所示，红色曲线为实验数据。

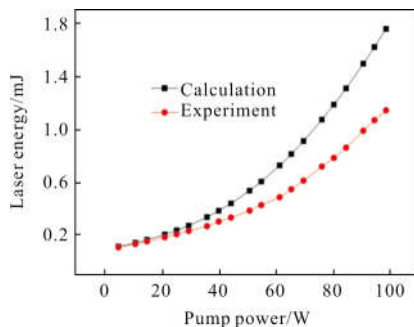


图 3 一级放大单通实验数据与计算值对比

Fig.3 Comparison between the experimental data and the calculated value of a single pass in first amplified

一级双程放大的泵浦功率与输出能量的关系如图 4 中黑色曲线所示，红色曲线为实验数据。

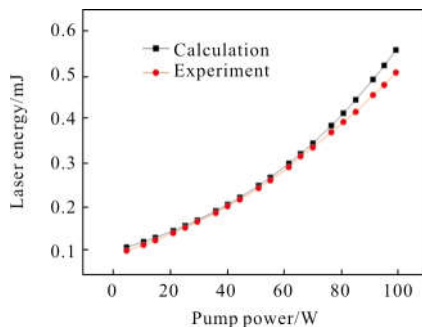


图 4 一级放大双通实验数据与计算值对比

Fig.4 Comparison between the experimental data and the calculated value of double pass in first amplified

二级放大的泵浦功率与输出能量的关系如图 5 中黑色曲线所示，红色曲线为实验数据。

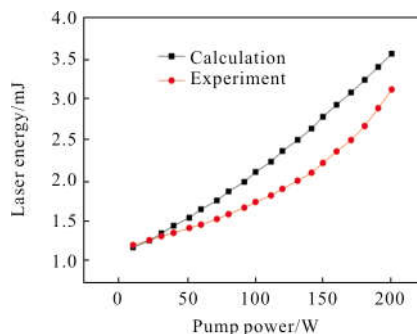


图 5 二级放大实验数据与计算值对比

Fig.5 Comparison between the experimental data and the calculated value of second amplified

### 3 实验结果与分析

实验中，一级放大采用平均功率 100 W、芯径 400  $\mu\text{m}$  的 888 nm 光纤耦合 LD，通过 1:1 光学耦合器，将泵浦光耦合进增益介质。实验测得泵浦光束腰直径 460  $\mu\text{m}$ ，种子光束腰直径 500  $\mu\text{m}$ 。实验测得一级单程放大输出功率为 5.05 W，双程放大输出功率为 11.46 W。二级放大采用两个平均功率为 100 W 的半导体激光阵列分别经过整形柱透镜相对泵浦，实验测得，泵浦光宽度约为 1.8 mm。激光光束直径约为 1.5 mm。二级放大输出功率为 31.5 W，脉宽 0.6 ns，线宽 154 pm，光束质量  $M^2$  因子在 X、Y 两方向上分别为 1.98 和 1.90。测试结果如图 6~9 所示。

总体来看，输出激光的光束质量得到了较好的保证<sup>[8-9]</sup>，但放大提取效率偏低( $\sim 10\%$ )<sup>[10]</sup>，分析主要原因是实验中第一级的第二程以及第二级放大的光斑匹配受试验条件所限，没有调整到最佳，一定程度上影响了提取效率。

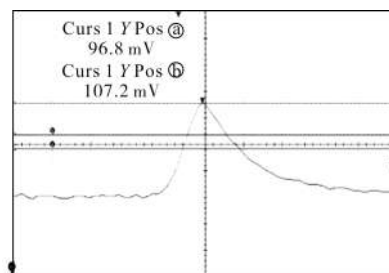


图 6 输出激光脉宽

Fig.6 Pulse width of output laser

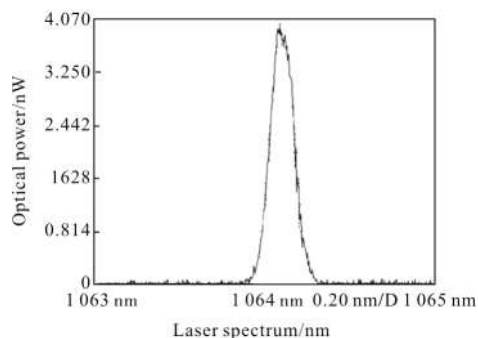


图 7 输出激光线宽

Fig.7 Line width of output laser

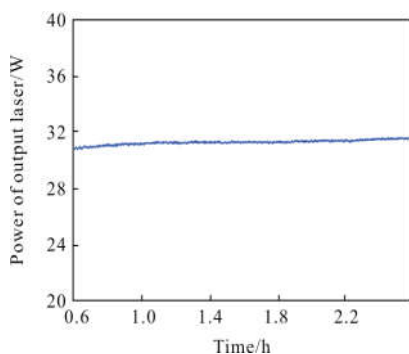


图 8 输出激光功率

Fig.8 Power of output laser

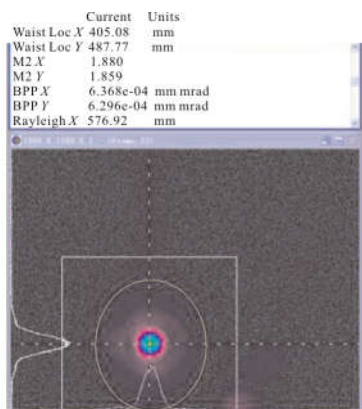


图 9 输出激光光束质量

Fig.9 Beam quality of output laser

另外,激光经过两级放大后,与种子源指标相比,脉宽基本保持不变,但线宽展宽了近 1 倍。对比放大前后的光谱(如图 10 所示),发现放大前后中心波长基本保持一致,但谱线发生了展宽,分析认为主要原因是种子激光的边模旁瓣较为明显(边模抑制比较低),边模被放大从而使激光线宽展宽。

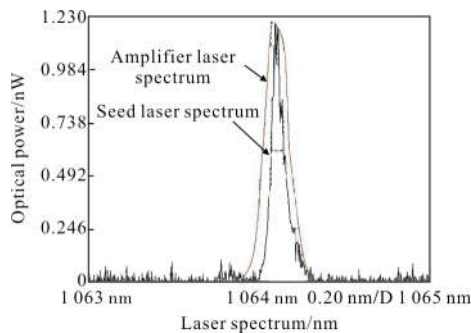


图 10 激光放大前后光谱对比

Fig.10 Spectral comparison between amplified laser and seed laser

### 4 结论

报道了一种紧凑的高重频、窄脉宽、窄线宽激光的放大器设计构型。该放大器由两级放大组成,一级放大采用 888 nm 半导体激光带内端面泵浦块状 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的双通放大,实现了重复频率 10 kHz、单脉冲能量 1.1 mJ、脉宽 0.6 ns、线宽 120 pm 的激光输出;第二级放大采用 808 nm 半导体激光侧面泵浦板条 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,实现了重复频率 10 kHz、单脉冲能量 3.1 mJ、脉宽 0.6 ns、线宽 154 pm 的激光输出。该两级放大设计较好地平衡了高放大倍率及高热量积累的矛盾,是一种具有潜力的放大器设计思路。

### 参考文献:

- [1] Xu Chunxiao, Zhou Feng. Development and applications of space-borne laser remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 4(30): 26-31. (in Chinese)  
许春晓,周峰. 星载激光遥感技术的发展及应用 [J]. 航天返回与遥感,2009, 4(30): 26-31.
- [2] Zhang Deping, Wu Chao, Zhang Rongzhu, et al. Study on thermal effect of LD end-pumped separated amplifier structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2250-2255. (in Chinese)  
张德平,吴超,张蓉竹,等. LD 端面泵浦分离式放大器结构的热效应研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2250-2255.
- [3] Shen Lifeng, Jiang Hongbo, Zhao Zhigang, et al. Experimental study of picoseconds laser amplifier based on grazing incidence Nd:YVO<sub>4</sub> slab geometry [J].

- Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (11): 1101004. (in Chinese)
- 沈利丰, 姜洪波, 赵志刚, 等. 掠入射 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条结构皮秒激光放大器的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101004.
- [4] Agnesi A, Dallochio P, Pirzio F, et al. Sub-nanosecond single-frequency 10-kHz diode-pumped MOPA laser [J]. *Applied Physics B*, 2010, 98 (4): 737-741.
- [5] Zhuang Shidong, Yu Haohai, Wang Zhengping, et al. Passively Q-switched Nd:Gd<sub>0.63</sub>Y<sub>0.37</sub>VO<sub>4</sub>/Cr<sup>3+</sup>:YAG microchip laser[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 318(1): 691-694.
- [6] Sun Zhe, Chen Xin, Jiang Menghua, et al. Compact side pumped double pass Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser amplifier [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(11): 2111-2115. (in Chinese)
- 孙哲, 陈欣, 姜孟华, 等. 半导体泵浦双通 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光放大器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(11): 2111-2115.
- [7] Petras V Avizons, Ronald L Grotbeck. Experimental and theoretical ruby laser amplifier dynamics [J]. *J Applphy*, 1966, 37(2): 687-690.
- [8] Nie Yumei. LD side-pumped Nd:YAG laser amplifier[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2017, 31(3): 128-131. (in Chinese)
- 聂喻梅. 激光二极管侧面泵浦的 Nd:YAG 激光放大器[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(3): 128-131.
- [9] Qi Gang, Xiong Shuidong, Liang Xun, et al. High-performance and narrow line-width nanosecond pulse laser amplifier for weak signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3234-3237. (in Chinese)
- 戚刚, 熊水东, 梁迅, 等. 用于微弱信号放大的高性能窄线宽纳秒脉冲光纤放大器 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (11): 3234-3237
- [10] Zou Yan, Jiang Menghua, Hui Yongling, et al. 425 mJ high beam quality specific orientation Nd:YAG laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 27-33. (in Chinese)
- 邹岩, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 425 mJ 高光束质量特殊取向 Nd:YAG 激光放大器[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 27-33.