

文章编号: 1001-3806(2012)05-0639-03

## 二极管端面抽运千赫兹激光器

毛小洁<sup>1</sup> 秘国江<sup>1,2</sup> 杨文是<sup>1,2</sup> 庞庆生<sup>1</sup> 邹 越<sup>1</sup>

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 固体激光技术国家重点实验室, 北京 100015)

**摘要:** 大功率千赫兹激光器作为雷达系统的核心部分之一, 在大气科学的研究中显得极为重要。实现大功率千赫兹激光器的可行方式之一是采用主振荡功率放大器。为了获得窄脉宽、高光束质量的千赫兹主振荡器, 采用二极管端面抽运的千赫兹电光调 $Q$  Nd:YAG 激光器的方法, 进行了理论分析和实验验证, 取得了重复频率 1kHz、脉冲宽度 5ns、单脉冲能量 2.7mJ 的 1064nm 激光输出, 光光转换效率 40%、光束质量  $M^2 = 1.2$ 。结果表明, 该研究为 1kHz 500W, 10ns 绿光主振荡功率放大器提供了合格的种子源。

**关键词:** 激光器; Nd:YAG 激光器; 端面抽运; 窄脉冲宽度

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.016

## Diode end-pumped lasers with 1kHz pulse repetition rate

MAO Xiao-jie<sup>1</sup> MI Guo-jiang<sup>1,2</sup> YANG Wen-shi<sup>1,2</sup> PANG Qing-sheng<sup>1</sup> ZOU Yue<sup>1</sup>

(1. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China; 2. National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)

**Abstract:** As one of the core parts of a radar system, high-power kHz laser is extremely important in the study of atmospheric science. It is one of the feasible ways to achieve high-power kHz laser master oscillator power amplifier. In order to get the narrow pulse width, high beam quality kHz master oscillator laser, a diode end-pumped kHz electro-optic  $Q$ -switched Nd:YAG laser was used in experiments. A laser at 1064nm was obtained with repetition rate of 1kHz, pulse width of 5ns, pulse energy of 2.7mJ, optical-optical efficiency of 40%,  $M^2 = 1.2$ . The results show that this laser provides a qualified seed source for 1kHz, 500W, 10ns green master oscillator power amplifiers.

**Key words:** lasers; Nd:YAG laser; end-pumped; short pulse width

## 引言

高重频、窄脉宽、高光束质量的紧凑型固体激光器在环境监测、激光加工、医疗和通讯等领域具有广阔的应用前景。而千赫兹激光器作为雷达系统的核心部分之一, 在大气科学的研究中显得极为重要<sup>[1-7]</sup>, 激光器指标要求为 1kHz 500W, 10ns 绿光, 通过主振荡功率放大器可实现上述指标。为了得到好的光束质量和稳定输出, 主振荡功率放大器的种子源要求脉宽小于 10ns, 单脉冲能量在毫焦量级, 输出能量稳定性小于 3%, TEM<sub>00</sub> 输出。二极管端面抽运电光调 $Q$  是实现上述要求种子源的有效途径之一。在众多的二极管端面抽运晶体中, 适于本系统要求的工作物质主要有 Nd:YLF 和 Nd:YAG 两种。Nd:YLF 的上能级寿命比 Nd:YAG 大 1 倍, 因此, 在同等抽运功率条件下, 二极

管数量可节省一半。但 Nd:YLF 的吸收带宽太窄, 温控精度要求很高<sup>[8]</sup>。另外, 它的机械强度和热导率都不如 Nd:YAG, 考虑到后面的前置放大和功率放大, 作者采用机械强度和热导率都较好的 Nd:YAG 晶体。

本文中报道了二极管端面抽运的高重频电光调 $Q$  Nd:YAG 激光器。通过理论分析与优化, 获得了重复频率 1kHz、脉冲宽度 5ns、单脉冲能量 2.7mJ 的 1064nm 激光输出, 光光转换效率 40%, 光束质量  $M^2 = 1.2$ , 并对实验结果进行了分析和讨论。

## 1 理论分析和数值模拟

### 1.1 连续激光器理论分析

设在工作物质内部, 抽运光光场分布近似高斯分布, 由四能级系统的速率方程<sup>[9]</sup> 可得抽运阈值功率:

$$P_{\text{th}} = \frac{\pi h \nu_p n \delta (w_{\text{eff}}^2 + w_0^2)}{4 \eta_a \sigma \tau} \quad (1)$$

基模输出功率为:

$$P_{\text{out}} = [1 - \exp(-\alpha_p l)] (P_0 - P_{\text{th}}) \frac{\nu T J}{\nu_p \delta} \quad (2)$$

作者简介: 毛小洁(1981-) ,男, 工程师, 主要从事固体激光技术的研究。

E-mail: maoxiaojie991220@163.com

收稿日期: 2012-02-24; 收到修改稿日期: 2012-03-06

输出镜透过率为:

$$T_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \delta_0 \alpha^2 + \delta_0 \alpha \quad (3)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为激光频率,  $\nu_p$  为抽运光频率,  $\eta_a$  为工作物质对抽运光的吸收效率,  $\sigma$  为受激发射截面,  $\tau$  为工作物质的荧光寿命,  $n$  为工作物质的折射率,  $\delta$  为谐振腔总损耗,  $\delta_0$  为激光谐振腔内的固有损耗,  $T$  为腔镜的输出耦合度,  $w_{\text{eff}}$  和  $w_0$  分别为振荡光和抽运光在工作物质内的光斑尺寸,  $\alpha_p$  为工作物质对抽运光的吸收系数,  $l$  为工作物质的长度,  $P_0$  为入射到工作物质表面的抽运功率,  $J$  为重叠效率因子, 它表征抽运光与振荡光在空间的重叠程度,  $\alpha$  为振荡光与抽运光在工作物质内平均截面积之比。

可以看出, 为了降低抽运阈值, 可采用受激发射截面和荧光寿命乘积值较大的工作物质, 减小腔损耗和压缩抽运光和振荡光的光斑尺寸; 为了提高光光转换效率, 就要增加抽运光和振荡光在空间的重叠程度。

## 1.2 实验装置

激光器实验装置如图 1 所示。

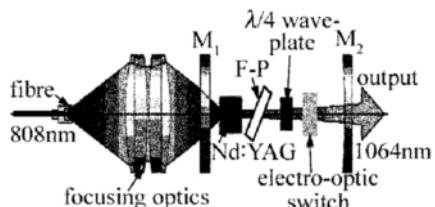


Fig. 1 Experimental setup of laser

抽运源采用 nLight 公司生产的 808nm 光纤耦合输出激光器, 光纤芯径为 400 μm, 数值孔径为 0.22, 最大连续输出功率为 40W。本系统中, 抽运源采用高重频脉冲方式工作, 脉宽为 220 μs 时, 单脉冲最大输出能量 8.8 mJ。抽运光通过焦距为 75mm/75mm 的两个透镜耦合进 Nd:YAG 晶体。Nd:YAG( AR/AR 808nm&1064nm) 晶体尺寸为 4mm × 4mm × 10mm, 掺 Nd 的原子数分数为 0.008。电光调 Q 晶体为 KD\*P 晶体, 平平全反镜 M<sub>1</sub> ( AR@808nm, HR@1064nm)。输出耦合镜 M<sub>2</sub> 在 1064nm 的透过率通过(3)式得 50%。

## 1.3 数值模拟

通过 ABCD 矩阵可以计算谐振腔的模式大小, 增益介质可被视为一个热透镜<sup>[10]</sup>, 热透镜焦距为:

$$f_t = \frac{2\pi\kappa_c w_{\text{eff}}^2}{\frac{dn}{dT} \xi \eta P_0} \quad (4)$$

式中  $f_t$  为晶体的热透镜焦距, 热导率  $\kappa_c = 14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (20°C 时), 折射率温度系数  $\frac{dn}{dT} = 7.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 量子缺陷效率  $\xi = 0.24$ , 通过 1:1 耦合透镜, 抽运模式在

晶体中的有效光斑半径  $w_{\text{eff}} = 0.4 \text{ mm}$ 。由(4)式得出热透镜焦距随抽运单脉冲能量变化, 如图 2 中虚线所示, 星状线为实际测试的热透镜焦距随抽运单脉冲能量变化。

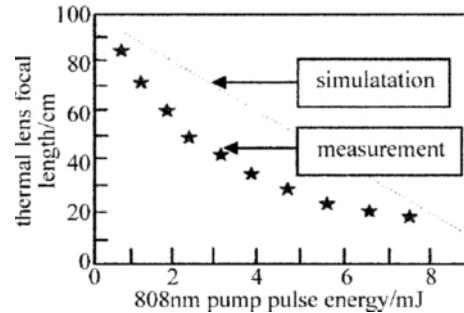


Fig. 2 Thermal lens focal length changes with the pump pulse energy

单程损耗系数为:

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha_{\text{eff}} l) \quad (5)$$

式中, 晶体有效吸收系数  $\alpha_{\text{eff}} = 0.003 \text{ cm}^{-1}$ , 晶体长度  $l = 10 \text{ mm}$ , 由(5)式得出激光在 Nd:YAG 中的单程损耗为 0.003。

要使激光输出模式为 TEM<sub>00</sub>, 激光抽运模式在晶体中的有效光斑半径  $w_{\text{eff}}$  与抽运光在晶体中的光斑半径  $w_0$  应满足:

$$1 < \frac{w_{\text{eff}}}{w_0} < 1.73 \quad (6)$$

所以选用 1:1 的耦合透镜。

在 808nm 单脉冲抽运能量 6.7 mJ 时, 设计的激光谐振腔的稳定性如图 3 所示。

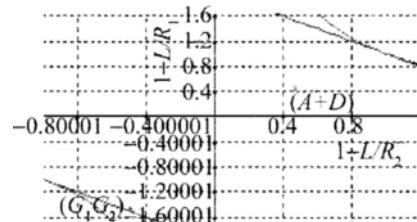


Fig. 3 Stability of the resonator ( $L$  is oscillator length,  $R_1$  and  $R_2$  are the radius of  $M_1$  and  $M_2$ )

$$\text{激光器的稳定条件 } \frac{(A+D)}{2} = 0.4639, \text{ 稳定条件 } G_1 G_2 = 0.7319, \text{ 满足激光器谐振腔的稳定性。}$$

谐振腔中各镜面和晶体中的光斑大小如图 4 所示。

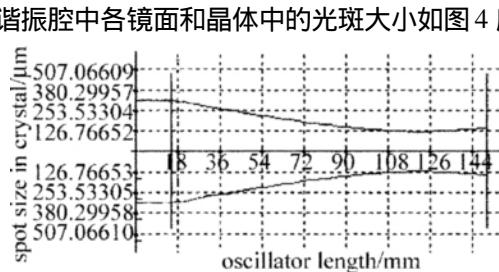


Fig. 4 Laser spot size in the resonator

为了得到较短的激光脉冲, 谐振腔总腔长为 150mm。在 Nd:YAG 晶体中光斑半径  $w_0 = 316 \mu\text{m}$ , 满

足激光器输出单模的条件(见(6)式)。

## 2 实验结果和讨论

在重复频率1kHz时,1064nm单脉冲输出能量随抽运能量的变化如图5所示。

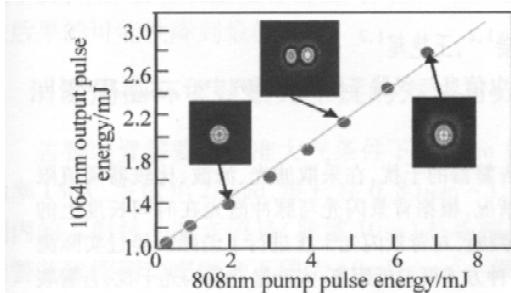


Fig.5 Output pulse energy changes with pump pulse energy

输出1064nm激光的抽运阈值1mJ,抽运光从1mJ~3mJ输出激光模式为TEM<sub>00</sub>,因为此时单脉冲抽运能量较小,激光晶体热透镜焦距较长,满足单模输出条件;抽运光从3mJ~5mJ输出激光模式为TEM<sub>01</sub>,因为此时单脉冲抽运能量较大,热透镜效应使得激光在晶体中的光斑半径小于300μm,不满足单模输出条件(6)式;随着单脉冲抽运能量的进一步增加,晶体中的光斑半径逐渐变大,在抽运单脉冲能量6.7mJ时,输出激光模式为TEM<sub>00</sub>;光光转换效率达到40%。如图5所示。

在重复频率1kHz、激光输出单脉冲能量为2.7mJ时,光斑M<sup>2</sup>=1.2,激光脉冲宽度为5ns,单脉冲能量稳定性小于3%。

## 3 结 论

报道了二极管端面抽运的高重频电光调Q Nd:YAG激光器。通过理论分析与优化,获得了重复频

率1kHz、脉冲宽度5ns、单脉冲能量2.7mJ的1064nm激光输出,光光转换效率40%,光束质量M<sup>2</sup>=1.2,对实验结果进行了分析和讨论。这为1kHz 500W,10ns绿光主振荡功率放大器提供了合格的种子源。

## 参 考 文 献

- [1] DAI Y J. The principle of lidar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 232-277 (in Chinese).
- [2] PHILLIPS M W, HENDERSON S W, POLING M, et al. Coherent lidar development for Doppler wind measurement from the International space sation [J]. Proceedings of SPIE 2001 4153: 376-384.
- [3] REN P, WANG Y L, KANG D Y, et al. Numerical optimization in VAD inversion technique for wind lidar [J]. Laser Technology 2009, 33(6): 664-666 (in Chinese).
- [4] LAI D, CHEN Y, ZHOU D F, et al. Beam scanning of lidar and the simulation of the improved VAD inversion methods [J]. Laser Technology 2008, 32(6): 584-586 (in Chinese).
- [5] HENDERSON S W, HANNON S M. Advanced coherent lidar system for wind measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5887: 588-601.
- [6] XU Q Y, NING H Sh, CHEN W Sh, et al. Applications of meteorological radar for the civil aviation safety [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2147-2151 (in Chinese).
- [7] ZHANG S Q, LOU Q H, ZHOU J, et al. Design of drive circuit for continuously adjustable ns pulse LD [J]. Laser Technology 2008, 32(4): 396-398 (in Chinese).
- [8] MERMILLIOD N, ROMERO R, CHARTIER I, et al. Performance of various diode-pumped Nd:laser materials: influence of inhomogeneous broadening [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1179-1186.
- [9] ALFREY A J. Modeling of longitudinally pumped CW Ti:sapphire laser oscillators [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(4): 760-766.
- [10] ZHENG J A, ZHAO SH Zh, WANG Q P, et al. Influence of thermal effect in gain-media on optimum design of LD-end pumped solid state laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(6): 724-729 (in Chinese).