

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0635-04

高重频双端泵浦全固态 Nd YVO₄ 声光调 Q 激光器

石朝辉^{1,2,3}, 张晶^{1,2,3}, 牛岗^{1,2,3}, 王培峰^{1,2,3}, 崔建丰^{1,2,3}, 张瑛³, 裴博^{3,4}, 樊仲维^{3,4}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100081;

3. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085; 4. 中国科学院光电研究院, 北京 100080)

摘要:采用国产大功率光纤束模块, 双端面泵浦两块 Nd YVO₄ 激光晶体, 采用高衍射效率声光调 Q 技术, 在注入总功率 50W, 最高重频 100kHz 的条件下, 获得平均输出功率为 18.21W 的 1064nm 激光输出。脉冲宽度为 62ns, 相应光光转换效率为 36.4%。在最低重频 10kHz 时, 具有最大单脉冲能量 1.3mJ, 相应脉冲宽度为 16.4ns, 峰值功率达到了 80kW。

关键词:全固态激光器; 高重复频率; 声光调 Q; 双端面泵浦; Nd YVO₄

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

High Repetition Rate AO Q-switching of Double End Pumped Nd YVO₄ All-solid-state Laser

SHI Zhao-hui^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2,3}, NU Gang^{1,2,3}, WANG Pei-feng^{1,2,3},
CUI Jian-feng^{1,2,3}, ZHANG Ying³, PEI Bo^{3,4}, FAN Zhong-wei^{3,4}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, ChangChun 130033; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081; 3. Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085; 4. Academy of Science Opto-Electronics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: A high repetition rate acousto-optic Q-switching of high power two Nd YVO₄ all-solid-state TEM₀₀ laser is reported. To reduce thermal effect and achieve higher power output, there are two Nd YVO₄ laser crystals with low-doped concentration in the cavity, and the crystals are pumped by two high power fiber coupled laser diodes with TEC cooling. In Q-switching operation, the maximum average power of 18.21W is obtained at the maximum repetition 100kHz and 50W of diode pump, the pulse duration of this repetition is 62ns, and the corresponding optical-optical conversion efficiency is about 36.4%. The highest single pulse energy of 1.3mJ with peak power of 80kW is generated at the repetition rate of 10kHz, and the pulse duration of this repetition is 16.4ns.

Key words: all-solid-state laser; high repetition rate; acousto-optic Q-switching; double-end-pumped; Nd YVO₄

1 引言

近年来,随着半导体激光产业的迅猛发展,以半导体激光器作为泵源的全固态激光器(DPSSL)的研究取得了巨大的进展。DPSSL兼具普通固体激光器和半导体激光器的双重优点,即体积小、寿命长、光

束质量好和电光效率高。目前,高重复频率(通常

作者简介:石朝辉(1980-),男,中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事高功率全固态激光器及其频率变换技术研究。E-mail: shizh@126.com

收稿日期: 2006-03-17

指工作重复频率 $>1\text{kHz}$ 的 DPSSL 在科研、工业、军事等领域得到越来越广泛的应用,尤其是军用领域,其在激光雷达、光电对抗、激光测距中已成为应用发展的关键技术之一^[1-3]。

目前声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器已经有重频高达 500kHz 的报道^[4],在 30W 泵浦光注入下,得到了 16W 的平均功率输出,相应脉宽低于 30ns。国内也有很多的报道,但基本上都集中于小功率上。杜晨林等^[5]利用端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,采用声光调 Q 方式,分别在 70kHz 和 10kHz 的重复频率下,获得了 6.45W 的平均输出功率和 0.213mJ 的单脉冲能量。

本文采用国产大功率光纤束模块双端面泵浦双 Nd:YVO₄ 激光晶体,采用声光调 Q 技术,实现了高平均功率、高重复频率的 1064nm 准连续激光输出。通过降低 Nd:YVO₄ 激光晶体的掺杂浓度,并且采用双端泵浦双晶体的技术路线,在晶体热效应允许的范围内最大限度的利用了泵浦光的能量;通过腔内插入声光调 Q 开关,优化声光调 Q 的技术参数,实现了 100kHz 的高重复频率下的稳定调 Q 激光输出。最终在晶体注入总功率为 50W,最高重复频率为 100kHz 的条件下,平均输出功率为 18.21W,脉冲宽度为 62ns,相应光光转换效率为 36.4%。在最低重复频率为 10kHz 时,具有最大单脉冲能量 1.3mJ,相应脉冲宽度为 16.4ns,峰值功率达到了 80kW。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,为避免高功率泵浦条件下可能导致的晶体损伤,采用双泵浦双 Nd:YVO₄ 晶体的技术^[6]。泵浦源为北京国科世纪激光公司半导体激光器光纤束模块(型号为 GKHM-30),其输出功率 30W,出口光纤束直径 1.1mm,数值孔径 $NA=0.11$ 。输出激光中心波长为 807~810nm (25 μm),通过调节 TEC 制冷系统的工作温度,使其工作波长接近 808.7nm,与 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰相匹配。采用自行研制的非球面光学耦合系统,将泵浦光整形为直径为 750 μm 左右的圆形光斑,系统的传输透

过率为 92%。Nd:YVO₄ 激光晶体为 0.3 at % 的 Nd³⁺ 掺杂浓度^[7],晶体尺寸为 3mm \times 3mm \times 10mm, a 轴切割,通光方向长度为 10mm。晶体的两个通光面分别镀 1064nm 和 808nm 的增透膜 ($R_{1064\text{nm}} < 0.5\%$, $R_{808\text{nm}} < 5\%$),晶体的侧面用铝箔包住,装在用循环水冷却的紫铜块内,温度设定在 18 $^{\circ}\text{C}$ 。为获取大的基模体积,谐振腔采用简单的平平对称腔结构,总腔长为 900mm 左右。平面镜 M1 一面对 808nm 增透 ($R < 5\%$),另一面对 808nm 增透 ($R < 5\%$) 和 1064nm 全反 ($R > 99.5\%$),平面镜 M2 和 M1 完全一样;平面镜 M3 是 1064nm 的单点全反镜 ($R > 99.8\%$); M4 为平面输出耦合镜,在 1064nm 透过率为 $T = 60\%$ 。M5 为 1064nm 的单点全反镜,入射角为 8 $^{\circ}$;目的是将光路折转为水平方向。声光 Q 开关为 Neos 公司生产的型号为 33027-50-5-的熔石英 Q 开关,通光方向长度为 10mm;由中心频率为 27MHz,射频功率为 70W 的声光驱动电源驱动,在调制重复频率为 1~100kHz 的范围内连续可调。

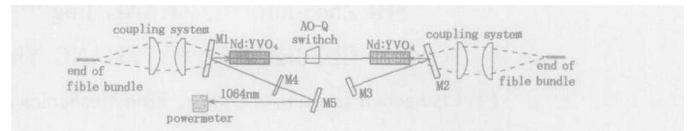


图 1 双端面泵浦双 Nd:YVO₄ 激光器的实验装置

Fig 1 configuration of the double-end-pumped Nd:YVO₄ laser

3 谐振腔设计

端面抽运时,可以将激光晶体等效为一个薄透镜^[8],其热焦距可由下式确定:

$$ft = \frac{K_c}{P_{ph}} \frac{p^2}{dn/dt} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (1)$$

公式中, K_c 为热传导系数; p 为泵浦光斑半径; P_{ph} 为抽运光在晶体中热沉积的功率(一般占泵浦光总功率的 10%~30%); dn/dt 为晶体折射率随温度的变化率; α 为吸收系数; l 为晶体的通光方向的长度。对 Nd:YVO₄ 激光晶体, $K_c = 0.054\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$; $\alpha = 14.8\text{cm}^{-1}$; $dn/dt = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6}/\text{K}$,本文中 $l = 10\text{mm}$,通过试验分析取 $P_{ph} = 15\% P_{\text{pumpPower}}$ 。图 2 就是根据上述参数计算出来的激光晶体热焦距与泵浦光功率和泵浦光斑半径之间的关系曲线,可

以明显看出,随着泵浦光功率的增加,晶体的热效应变的越来越严重,相应的等效热焦距也越短。同时,在同样的泵浦光功率水平下,泵浦光斑的尺寸越小,晶体的热效应也越严重。因此,大功率泵浦时在基本满足与腔膜匹配的条件下,泵浦光半径应该尽量增大以减小晶体热效应。图 3 为根据有源腔结合晶体热透镜效应,利用 ABCD 矩阵公式模拟计算出来的激光晶体上的基模光斑半径尺寸与单个晶体热焦距的关系曲线。在单端 25W 左右的注入功率,泵浦光直径 750 μm 的条件下,晶体热焦距为 130mm 左右。从图 3 可以看出,在泵浦光功率的逐渐增加,相应晶体的热焦距不断减小的整个过程中,泵浦光和腔模之间都可以维持非常好的模式匹配,这是高功率条件下获得基横模输出的根本条件^[9]。

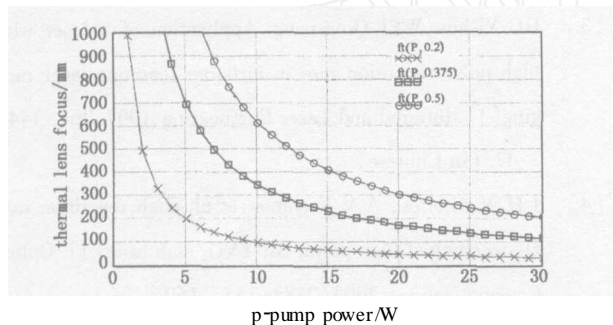


图 2 激光晶体热焦距与泵浦光功率及泵浦光半径的关系曲线

Fig 2 thermal lens focal length versus pump power and radius of the pump light

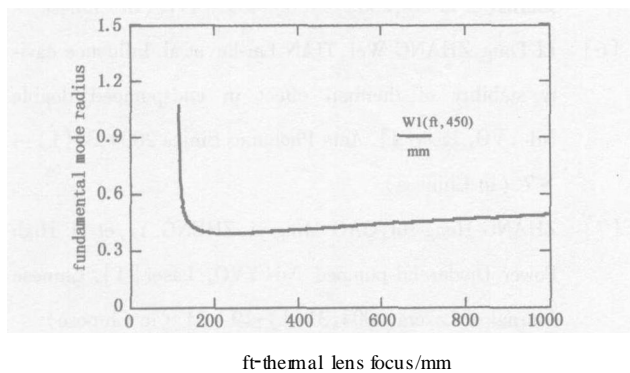


图 3 激光晶体上的基模光斑半径与热焦距的关系曲线

Fig 3 the radius of fundamental mode in laser crystal versus thermal lens focal length

4 实验结果和讨论

采用相干公司 FM100 - 19C 型功率计,对输出激光功率进行了测量;采用 DET - 210 型快速光电二极管和泰克 300MHz 示波器对不同重复频率下的

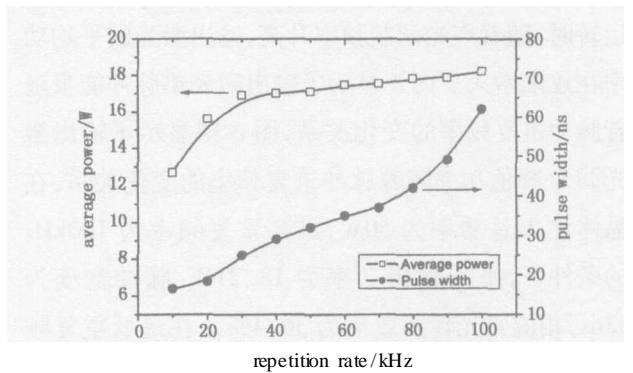


图 4 在激光器准连续模式运转下,激光输出平均功率和脉冲宽度与相应的重复频率之间的关系曲线

Fig 4 the average output power and pulse duration versus repetition rate

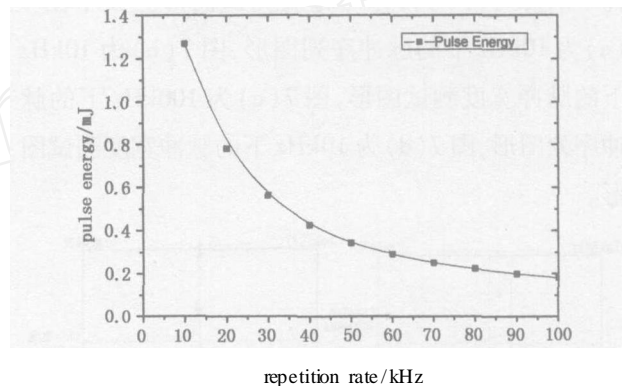


图 5 在激光器准连续模式运转下,激光输出单脉冲能量与相应的重复频率之间的关系曲线

Fig 5 the pulse energy versus repetition rate

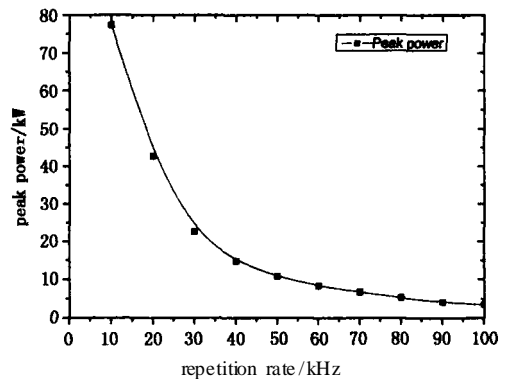


图 6 在激光器准连续模式运转下,激光输出峰值功率与相应的重复频率之间的关系曲线

Fig 6 the peak power versus repetition rate

脉冲宽度进行了测量,测试结果如下:在泵浦电流为 45A 的条件下,也就是单个泵浦的光纤束模块输出功率为 27.6W 的情况下,1064nm 调 Q 激光输出功率和脉宽宽度随不同重复频率的变化关系如图 4 所示,图中分别显示了不同频率下的输出功率和脉冲宽度情况。由曲线可以看出,激光器在调 Q 状态下

运转时,随着声光调制频率升高,输出激光的平均功率在逐渐增大。图 5 显示了输出激光单脉冲能量随着脉冲重复频率的变化关系,图 6 则显示了输出激光调 Q 峰值功率随着脉冲重复频率的变化关系,在晶体注入总功率为 50W,最高重复频率为 100kHz 的条件下,平均输出功率为 18.21W,脉冲宽度为 62ns,相应光光转换效率为 36.4%。在最低重复频率为 10kHz 时,具有最大单脉冲能量 1.3mJ,相应脉冲宽度为 16.4ns,峰值功率达到了 80kW。图 7 则分别给出了最低重频 10kHz 和最高重频 100kHz 条件下的脉冲序列和脉冲宽度测试图形。其中图 7 (a) 为 10kHz 下的脉冲序列图形,图 7 (b) 为 10kHz 下的脉冲宽度测试图形,图 7 (c) 为 100kHz 下的脉冲序列图形,图 7 (d) 为 100kHz 下的脉冲宽度测试图形。

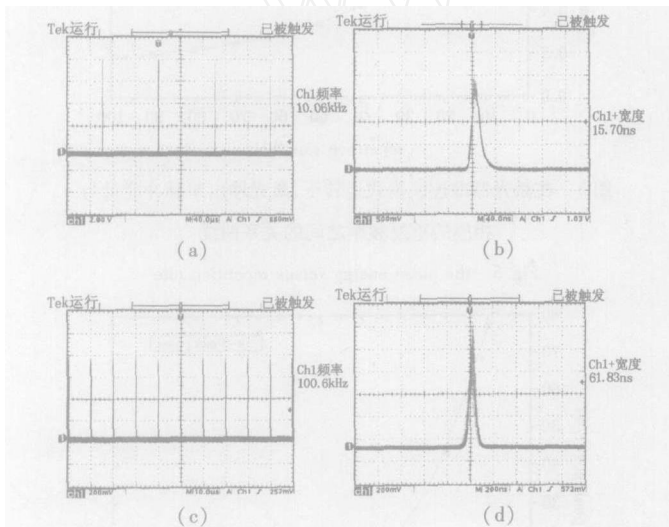


图 7 10kHz 和 100kHz 下的激光脉冲图形

Fig 7 the pulse shape of Q-switched laser at 10kHz and 100kHz respectively

5 小结

本文介绍了采用国产大功率光纤束模块双端泵浦两块 Nd:YVO₄ 激光晶体,采用声光调 Q 技术,实现了高平均功率、高重复频率的 1064nm 激光输出。最终在晶体注入总功率为 50W,最高重复频率为 100kHz 的条件下,激光输出功率为 18.21W,脉冲宽度为 62ns,相应光光转换效率为 36.4%。在最低重复频率为 10kHz 时,具有最大单脉冲能量 1.3mJ,相应脉冲宽度为 16.4ns,峰值功率达到 80kW。我们

相信通过进一步优化谐振腔参数设计和调 Q 器件的参数,能够得到更高的激光输出功率,更高的重复频率和更窄的脉冲宽度。此种类型的全固态高重复频率调 Q 激光器,将会在军事、科研、工业加工等领域具有很好的应用前途。

参考文献:

- [1] HUANG Feng, WANG Yue-feng, WANG Jin-yu, et al Study on application of high-repetition solid state lasers in photoelectric countermeasure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(5): 465 - 467. (in Chinese)
- [2] XU Peng-cheng, SUN Xiao-quan Analysis of high repetition frequency laser interference with real time gate signal [J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20(1): 20 - 23. (in Chinese)
- [3] HU Yi-hua, WEI Qing-nong Application of a laser with high pulse repetition rate in airborne scanning laser ranging[J]. Infrared and Laser Engineering, 1997, 26(5): 43 - 47. (in Chinese)
- [4] J H, V Aboites, A V Kiryanov, et al High repetition rate Q-switching of high power Nd:YVO₄ slab laser[J]. Optics Communications, 2003(218): 155 - 160
- [5] DU Chen-lin, L U Jun-hai, WANG Zheng-ping, et al LD-pumped acousto-optic Q-Switched Nd:YVO₄ laser with high repetition rates and short pulse width [J]. Chinese Journal of lasers, 2002, 29(6): 489 - 491. (in Chinese)
- [6] L I Long, ZHANG Wei, TAN Lai-ke, et al Influence cavity stability of the mail effect in end-pumped double Nd:YVO₄ laser[J]. Acta Photonics Sinica 2004, 33(1): 4 - 7. (in Chinese)
- [7] ZHANG Hong-rui, GAO Ming-yi, ZHENG Yi, et al High Power Diode-end-pumped Nd:YVO₄ Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(1): 19 - 21. (in Chinese)
- [8] HE Jing-liang, HOU Wei, ZHANG Heng-li, et al 8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(6): 481 - 484. (in Chinese)
- [9] L U Jun-hai, L U Jun-hua, L u Jian-ren, et al Mode matching in high power laser diode array end pumped Nd:YVO₄ solid-state laser[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(2): 186 - 189. (in Chinese)