

文章编号: 1001-3806(2017)04-0562-04

## 一种声光调 $Q$ 窄脉宽小体积激光器

刘建强<sup>1</sup>, 汪楠<sup>2</sup>, 杨盈莹<sup>2</sup>, 王菲<sup>1\*</sup>, 林学春<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国科学院 半导体研究所 全固态光源实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了构建一种声光调  $Q$  的窄脉宽小型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器, 从主动调  $Q$  速率方程出发, 分析了抽运速率、重复频率、输出镜透过率对脉宽的影响。该激光器采用简单的平平腔设计, LD 端面抽运高增益的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体, 在谐振腔内插入一个微型的声光调  $Q$  开关, 作用长度约为 7mm, 谐振腔腔长 13mm, 输出镜的透过率为 70%。结果表明, 在抽运功率为 4.21W、重复频率 20kHz 时, 获得了单脉冲能量 20 $\mu$ J、脉冲宽度 1.65ns、峰值功率为 12kW 的 1064nm 激光输出。此结果说明, 用微型声光调  $Q$  开关来构建短腔获得窄脉宽输出是一种切实可行的方案, 且该器件还可以作为大功率激光器的种子源。

**关键词:** 激光器; 窄脉宽; 微型声光调  $Q$ ; 调  $Q$  速率方程

**中图分类号:** TN248.3<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.04.021

## A micro acousto-optic $Q$ -switched laser with narrow pulse width

LIU Jianqiang<sup>1</sup>, WANG Nan<sup>2</sup>, YANG Yingying<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, LIN Xuechun<sup>2</sup>

(1. College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Laboratory of All-solid-state Laser Source, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to construct a micro acousto-optic  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with narrow pulse width, based on active  $Q$ -switched rate equation, the influence of pump speed, repetition rate and output mirror transmittance on pulse width was analyzed. The laser was designed with the structure of simple flat-flat cavity. High gain Nd:YVO<sub>4</sub> laser crystal was end pumped by LD. A micro acousto-optic  $Q$ -switched was inserted in the resonant cavity, with action length of 7mm, cavity length of 13mm, and output mirror transmittance of 70%. The results show that when the pump power is 4.21W and repetition rate is 20kHz, the output of 1064nm laser was obtained with single pulse energy of 20 $\mu$ J, pulse width of 1.65ns and peak power of 12kW. It is feasible to use micro acousto-optic  $Q$ -switched to construct short cavity and obtain narrow pulse width output. The device can also be used as the seed source of high-power lasers.

**Key words:** lasers; narrow pulse width; micro acousto-optical  $Q$ -switched;  $Q$ -switched rate equation

### 引言

脉宽小于 2ns、高峰值功率的激光器在激光与物质的相互作用、材料的加工与制造、医疗等多个领域具有不错的发展和前景。声光调  $Q$  具有工作电压低、电路设计简单、外插入损耗小和时间抖动小等优点, 能够在外加调制信号控制输入时, 在高重频下获得很高的稳定性, 因此适合用来产生窄脉宽激光输出<sup>[1]</sup>。而微片被动调  $Q$  技术主要是利用激光晶体和被动调  $Q$  晶体间的键和将腔长压缩到几个毫米, 可以获得脉宽小于 2ns 甚至于亚纳秒的激光输出, 但是被动调  $Q$  激光器的脉冲稳定性差, 在未加外调制信号输

入时脉冲重复频率不可控, 这两个因素也限制着被动调  $Q$  在激光器中的使用<sup>[2]</sup>。电光调  $Q$  方式也可以产生窄脉宽的激光输出, 但电光调  $Q$  方式对电压的调制和电路的设计要求比较高, 不利于仪器的小型化, 且该方式一般很难在高重频时获得脉宽小于 2ns 的脉宽输出。2007 年, 清华大学的 WANG 等人<sup>[3]</sup>报道了运用声光调  $Q$  技术通过抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体实现短腔的实验, 在重频 80kHz 时, 得到的脉冲宽度为 2ns、单脉冲能量 10.3 $\mu$ J 的脉冲输出。2014 年, 长春理工大学的 DONG<sup>[4]</sup>等人报道了 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 在腔长为 62mm 时, 获得了脉冲宽度为 4.4ns、峰值功率 26kW 的激光输出。2012 年, 北京工业大学 WANG 人<sup>[5]</sup>通过半导体端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 进行电光调  $Q$ , 在重频为 5Hz 时, 获得了脉冲宽度 0.96ns 的激光输出。2000 年, 美国林肯实验室报道了采用微片被动调  $Q$  超短腔技术, 在抽运功率 10W 时, 获得了脉冲宽度为

作者简介: 刘建强 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事绿光激光方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: feewang@163.com

收稿日期: 2016-09-06; 收到修改稿日期: 2016-11-08

310ps、重频达到5kHz、峰值功率565kW的激光输出<sup>[6]</sup>。

本文中基于主动调Q技术中的声光调Q方式,采用微型的声光Q开关,构建一个超短腔,没有多余外来器件的插入损耗。最终在确定各项参量后获得了体积小、重复频率为20kHz、脉宽1.65ns、单脉冲能量20μJ的窄脉宽激光输出。此激光器除了可以作为小型激光器单独使用,在进行外注入放大时,该激光系统也可以作为一个比较优秀的窄脉宽种子光源。

## 1 理论分析

Nd:YVO<sub>4</sub>晶体在1064nm波段作为一个典型的四能级系统,在外加LD抽运激励下粒子在能级间的跃迁过程,主要集中在E<sub>2</sub>和E<sub>1</sub>两个能级间的粒子数反转。受激辐射起主导作用,所以能将四能级系统简化为二能级系统,则主动调Q的速率方程可简化为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -2 \frac{\Delta n}{\Delta n_i} \delta \varphi \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \left( \frac{\Delta n}{\Delta n_i} - 1 \right) \delta \varphi \quad (2)$$

得到Q开关的脉冲宽度表达式如下<sup>[8]</sup>:

$$\Delta t = t \frac{\Delta n_i - \Delta n_f}{\Delta n_i - \Delta n_i \left[ 1 + \ln \left( \frac{\Delta n_i}{\Delta n_f} \right) \right]} \quad (3)$$

式中,Δn为单位体积反转粒子数,Δn<sub>i</sub>为初始反转粒子数,Δn<sub>f</sub>为末态反转粒子数密度,Δn<sub>i</sub>为阈值反转粒子数,φ为腔内光子数,t为腔内光子寿命,δ为腔内阶跃损耗常数。

由主动调Q的脉冲宽度表达式(见(3)式)看出,在一个确定的系统中,脉宽仅由Δn<sub>i</sub>和Δn<sub>f</sub>的比值来决定。脉冲前沿宽度主要与Δn<sub>i</sub>/Δn<sub>f</sub>的比值有关,随着Δn<sub>i</sub>/Δn<sub>f</sub>比值的增加,腔内增益系数变大,光子数迅速增长,脉冲前沿宽度越窄。而脉冲的下降沿主要取决于腔内的光子寿命,光子寿命越短,脉冲宽度就越窄。在保证Δn<sub>i</sub>/Δn<sub>f</sub>尽可能大的情况下,脉冲的后沿宽度与腔内光子的自由衰减快慢有关,腔内光子寿命公式为<sup>[9]</sup>:

$$t = \frac{2L/c}{\ln \left( \frac{1}{1-T} \right) + L'} \quad (4)$$

式中,2L/c为光子在腔内的往返时间,L为谐振腔腔长,c为真空中的光速,T为输出镜的透过率,L'为腔内往返损耗。在主动调Q激光器中,Δn<sub>i</sub>/Δn<sub>f</sub>的比值和腔内的光子寿命是两个重要的参量,直接影响着脉宽的大小。

## 2 实验装置

实验装置如图1所示。采用LD端面抽运Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,谐振腔为平平腔,抽运源为6W光纤耦合输出的半导体激光器,激光波长为808nm,数值孔径为0.22,光纤芯径为100μm,抽运光经过聚焦耦合透镜组后得到的光束束腰为150μm。激光的工作物质为高增益的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,掺杂原子数分数为0.01,尺寸为3mm×3mm×1mm,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体通光面镀有808nm的增透膜和1064nm的高反膜,并用铜铂包裹置于紫铜块中。实验装置里采用微型的声光调Q开关,作用长度为7mm,两端镀1064nm的增透膜,调制频率1kHz~1MHz可调节,可以将谐振腔腔长压缩到13mm,输出镜的透过率T=70%,表面镀1064nm增透膜。为了缩短腔长上述器件排列紧密,无多余的插入损耗,以上装置采用风冷和半导体热电制冷(thermo electric cooler,TEC)。

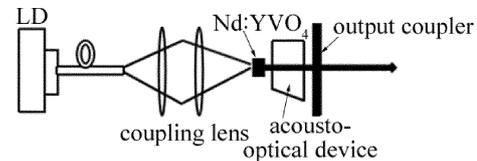


Fig. 1 Experimental setup of LD end-pumping acousto-optical Q-switched laser

## 3 实验结果与分析

由DEGNAN的主动调Q理论<sup>[10]</sup>可知,为了要获得窄脉宽的激光输出,应尽量缩短谐振腔长度和提高增益。试验中使用微型声光调Q开关,在无多余外来插入损耗时可以将谐振腔腔长压缩到13mm,而Nd:YVO<sub>4</sub>晶体相比于其它的激光晶体具有较大的发射截面和荧光寿命,是一种高增益的晶体。在选定高增益晶体Nd:YVO<sub>4</sub>和固定腔长的情况下,下面用实验结果进一步分析了抽运功率、重复频率和输出镜透过率对脉宽输出的影响。

图2中的试验结果给出了在抽运光斑为150μm、输出镜透过率T=70%时,在不同的重复频率下脉宽随LD抽运功率增加的变化曲线。可以看出,在相同的抽运功率下,脉冲宽度随着重复频率的增加而增大。所以在其它条件不变的情况下,由外加信号发生器设置的重复频率不宜太高<sup>[11]</sup>。但是设置的重复频率也不能过低,由于自发辐射跃迁,部分的反转粒子数被损耗掉,会影响声光调Q器件的效率,降低激光器输出的平均功率,其次重频过低更容易在高抽运功率下出现轻微的次脉冲现象。所以综合以上分析,实验中选

用 20kHz 的重复频率。

同样由图 2 还可以看出,同一重频下,随着抽运功率的增加,脉宽呈现下降的趋势,且下降趋势变得越来越小。随着抽运功率的增加,声光  $Q$  开关就会因关不住而产生静态激光,输出的脉冲特性变坏。从图上可以看出,提高抽运功率可以减小脉冲宽度,但这种减小不是无限制的。另外也可以在一定的抽运功率下,适当地减小抽运的光斑尺寸,这能够增大单位时间内抽运到上能级的反转粒子数,也会适当降低脉冲宽度,但这种情况必须保证抽运功率密度小于激光晶体的损伤阈值,以此来避免晶体的损伤。

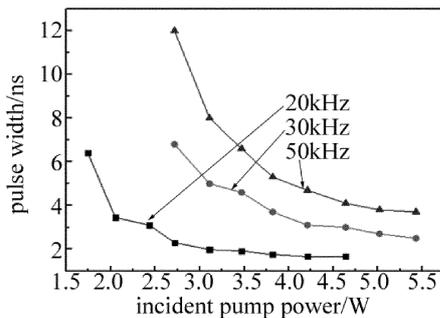


Fig. 2 Relationship between pulse width and incident pump power with different pulse repetition rates

图 3 中的实验结果给出了在抽运光斑尺寸为  $150\mu\text{m}$ 、重复频率 20kHz 时,在不同的输出镜透过率  $T$  下脉冲宽度随抽运功率增加的变化曲线。在相同抽运功率下,输出镜透过率越大,脉冲的上升沿越大,导致脉宽变大;而在脉冲下降沿时,由于光子寿命与输出镜透过率成反比,输出镜透过率越高,光子寿命越短,脉宽越窄<sup>[12]</sup>。所以存在一个最佳的输出镜透过率使得脉宽最小。在综合考虑了脉宽和功率的情况下,实验中选用了透过率  $T = 70\%$  的输出镜。

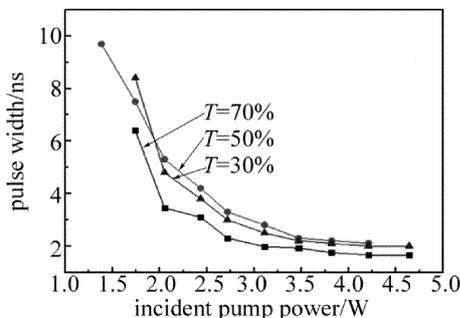


Fig. 3 Relationship between pulse width and pump power at different output coupler transmissions

图 4 中给出了在选定抽运光斑尺寸为  $150\mu\text{m}$ 、重复频率为 20kHz、输出镜透过率  $T = 70\%$  时,激光器的输出平均功率与抽运功率的实验变化曲线。从图 4 可见,在所使用的抽运功率范围,输出功率几乎直线上升,没有出现增益饱和的现象。因此,只要有足够的抽运功率,激光器的输出功率还可以进一步提升。从图 4

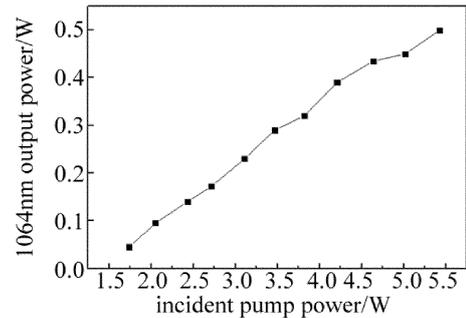


Fig. 4 Average output power of the laser versus the absorbed pump power 还可以看出,在抽运功率 4.21W 时,1064nm 的激光输出平均功率仅为 0.40W,转换效率不足 10%。针对这个现象分析主要有以下 3 个方面的因素限制了激光器平均功率的输出:(1)晶体长度。为了尽可能压缩腔长,实验中选用的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的长度仅为 1mm,严重影响了激光器输出功率;(2)外加信号发生器设置的重复频率。实验中为了获得脉宽小于 2ns 的激光输出,在尽量不产生次脉冲的情况下,设置了比较低的重复频率,影响了声光  $Q$  器件的效率,也是导致转换效率较低的一个重要原因;(3)输出镜的透过率也是影响激光器平均功率输出的一个因素。

图 5 为在输出功率为 0.40W 时得到的示波器脉冲波形图。可以看出,此时输出的激光脉冲宽度为 1.65ns。

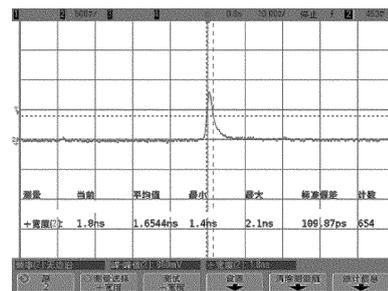


Fig. 5 Laser waveform with pulse width of 1.65ns measured with an oscilloscope

## 4 结论

在主动调  $Q$  速率方程的基础上,从理论分析了产生窄脉宽的影响因素,并且在实验上利用 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,构建了一个小型的短脉冲激光器。该器件使用一个微型的声光调  $Q$  开关,作用长度约为 7mm,输出镜透过率为 70%,谐振腔腔长为 13mm。在抽运功率 4.21W 时,得到脉冲宽度 1.65ns,重复频率 20kHz,平均功率为 0.40W。该激光器可以单独使用,也可以作为大功率窄脉宽激光器的种子源。

## 参考文献

- [1] HWANG D, RYU S G, MISRA N. Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. Applied Physics, 2009, A96(2):289-306.

- [2] WANDT C, KLINGEBIEL S, SIEBOLD M, *et al.* Generation of 220mJ nanosecond pulses at a 10Hz repetition rate with excellent beam quality in a diode-pumped Yb:YAG MOPA system[J]. Optics Letters, 2008, 33(10):1111-1113.
- [3] WANG Y, GONG M, ZHANG H. 2ns pulse width pulse high repetition rate short cavity acousto-optically  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Electronics Letters, 2007, 43(7):394-396.
- [4] DONG X L, FU X L, GAO L L, *et al.* Narrow pulse width laser diode pumped acousto-optically  $Q$ -switched 1064nm laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9):091402 (in Chinese).
- [5] WANG J G, SUN Zh, JIANG M H, *et al.* High-energy 1ns Nd:YAG laser system [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(7): 1257-1262 (in Chinese).
- [6] ZHONG G Sh, MAO X J, BI G J, *et al.* Lasers with narrow pulse width and high beam quality[J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 766-768 (in Chinese).
- [7] ZHANG X, FENG Ch, XIE X Y, *et al.* 1 nanosecond E-Q  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9):2361-2364 (in Chinese).
- [8] DU Ch L, LIU J H, WANG Zh P, *et al.* LD-pumped acousto-optic  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high repetition rates and short pulse width [J]. Chinese Journal Lasers, 2002, 29(6): 489-491 (in Chinese).
- [9] WANG Y, HUANG L, ZHANG H, *et al.* A fundamental mode miniature acousto-optically  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with short pulse width at high repetition rates [J]. Laser Physics, 2008, 5(4): 286-290.
- [10] DEGNAN J J. Theory of the optimally coupled  $Q$ -switched laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2):214-220.
- [11] TANG H, ZHU X L, MENG J Q. High repetition frequency, narrow pulse width LGS electro-optic tuning  $Q$  Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1):137-141 (in Chinese).
- [12] CHENG P F, WU B, SHEN Q H, *et al.* Experiment research of high repetition rate acousto-optic  $Q$ -switched fiber laser under air cooling[J]. Laser Technology, 2015, 39(6):780-784 (in Chinese).