

文章编号: 1001-3806(2008)04-0360-03

高重复频率的增益开关 $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4 + \text{KTP}$ 绿光激光器

王金定^{1,2}, 王安帮¹, 王云才^{1*}

(1 太原理工大学 物理系, 太原 030024; 2 中国计量学院, 杭州 310018)

摘要: 为了设计一种可连续和脉冲双模式输出的绿光激光器, 采用一只半导体激光器端面抽运 $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4 + \text{KTP}$ 胶合晶体, 通过腔内倍频, 获得光-光转换效率为 19% 的连续绿光激光输出。利用增益开关技术, 改变注入激光器的电脉冲波形, 可得到方波、正弦波或三角波的绿光激光脉冲输出; 调节激光器驱动电流的幅度和占空比可改变输出激光脉冲的强度和脉宽; 改变驱动电源的重复频率可以使输出绿光激光脉冲的重复频率连续可调, 最大重复频率可达 2MHz。在重复频率为 560kHz 时, 获得了输出绿光激光脉冲宽度为 74ns、峰值功率为 285mW、振幅噪声小于 3%。研究表明, 利用增益开关技术可以获得重复频率和窄脉冲宽度的绿光激光脉冲。

关键词: 激光器; 绿光激光器; 增益开关; 倍频; 重复频率

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Gain-switched $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4 + \text{KTP}$ green laser at high repetition rate

WANG Jin-ding^{1,2}, WANG An-bang¹, WANG Yun-cai¹

(1. Department of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A compact green laser, which can emit continuous wave or laser pulse trains respectively, was reported. With utilizing a laser diode end-pump $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4 + \text{KTP}$ gluing crystal, 19% optical-optical conversion efficiency was achieved in continuous output. Adjusting the waveform of the laser power supply to gain-switch the laser diode, the corresponding output waveform of square, sine, or triangle green laser pulses were obtained. The intensity and pulsewidth of the laser pulses could be varied with the amplitude and duty circle of the injecting current pulses. Meanwhile, by changing the injecting current pulses repetition rates, the laser pulse trains repetition rates could be tuned from 0.5Hz to as high as 2MHz. A green laser pulse train, with 74ns pulsewidth, 285mW peak power and amplitude noise less than 3%, was obtained at 560kHz. The research showed that green laser pulse of high repetition rates and narrow pulsewidth could be obtained by gain-switched technique.

Key words: lasers; green laser; gain-switched; frequency doubling; repetition rate

引 言

半导体激光器 (LD) 抽运的全固态腔内倍频绿光激光器, 具有体积小、效率高、结构紧凑、工作可靠等特点而被广泛应用, 而 $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4 + \text{KTP}$ 结构被人们认为是全固态绿光激光器的最佳组合之一^[1]。迄今为止, 许多学者对 LD 抽运 $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4$ 晶体结合 KTP 晶体腔内倍频的连续光输出已作了大量的研究^[2-4]。高重复频率、大功率与更短的光脉冲输出是当前固体激光器研究的 3 个主要方向, 也是技术发展的必然要求。调 Q 技术是产生超短光脉冲序列的一项较为成熟的

技术^[5-7], 但调 Q 激光器需要在腔内插入调 Q 器件, 增加了损耗, 而且它产生的光脉冲的重复频率通常较低 (一般在 100kHz 以内)^[8]。利用可饱和吸收体的被动锁模技术可产生重复频率高达 100GHz 的飞秒光脉冲^[9], 但其脉冲宽度及脉冲重复频率取决于可饱和吸收体的参量和激光器腔长, 很难调节。增益开关 LD 抽运激光晶体是产生激光脉冲的有效方法之一, 其具有结构简单、性能稳定且易与外部信号同步等优点^[10-12]。作者采用增益开关 LD 抽运 $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4$ 晶体结合 KTP 晶体腔内倍频技术, 实现重复频率在 0.5Hz~2MHz 连续可调的绿光激光脉冲输出。

1 实验装置

图 1 为 LD 端面抽运的增益开关绿光激光器结构示意图。为了提高抽运光能利用率、减少损耗以及使器件小型化, 一方面在 LD 与 $\text{Nd}^{3+} \text{YVO}_4$ 晶体之间无耦合光学系统, 而是采用面对面紧凑型直接耦合; 另一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60577019); 山西省自然科学基金资助项目 (20041042)

作者简介: 王金定 (1980-), 男, 硕士, 主要从事固体激光及其驱动电源的研究。

* 通讯联系人。E-mail: group-wang@tyut.edu.cn

收稿日期: 2007-05-23; 收到修改稿日期: 2007-08-06

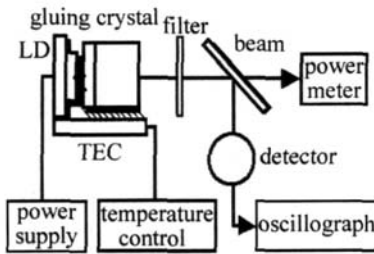


Fig 1 Experimental setup

方面,选用 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4 + \text{KTP}$ 胶合晶体,胶合晶体是将原子数分数为 0.03、尺寸为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体和尺寸为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的 KTP 晶体根据相位匹配条件直接粘合在一起,并且在胶合晶体的前后端面直接镀膜构成谐振腔。LD 采用中国科学院半导体所生产的 500mW 量子阱激光器。作者自行设计了可以连续和脉冲双模式输出的激光器驱动电源,在连续模式下,输出电流可在 $0\text{A} \sim 1.5\text{A}$ 范围内精确调整,满负荷工作电流稳定度优于 1mA ;在脉冲模式下,重复频率在 $0.5\text{Hz} \sim 3\text{MHz}$ 连续可调,并且在重复频率小于 100kHz 时,可以输出方波、三角波和正弦波 3 种波形,输出方波时的占空比能够在 $12\% \sim 85\%$ 之间调节,图 2 是在重复频率为 40.5kHz 时输出的 3 种不同波形的电脉冲,依次为方波、正弦波和三角波。

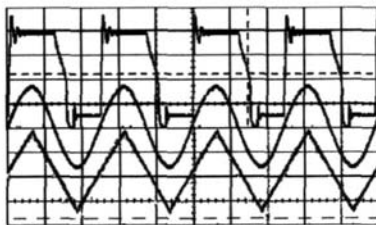
Fig 2 Electric pulses at low repetition rate ($10\mu\text{s}/\text{div}$)

图 1 中,由增益开关 LD 出射的 808nm 激光脉冲抽运 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体,出射 1064nm 激光,经 KTP 晶体倍频转换成 532nm 绿光激光输出。使用 Newport818-bb-21 PN 光电探测器接收 532nm 激光脉冲,用 Tektronix TDS3052 型示波器测量激光脉冲的宽度和重复频率,用物料光电 LPE-1A 型功率计测量输出平均功率。为了保证激光器工作的稳定性和 LD 发射激光波长与 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体吸收峰值波长的匹配,采用一块 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的半导体制冷片对激光器进行整体温控,精度优于 0.5C 。

2 激光器连续模式下的输出特性

选择激光器驱动源工作在连续模式下,调节注入电流,激光器的工作阈值约为 120mA 。图 3 为实测的一组抽运光功率和输出光功率之间的关系,从图中可见,随着抽运功率的增大,光-光转换效率不断提高,在抽运功率为 300mW 时,获得 57mW 的绿光输出,转换效率为 19% ,但当抽运功率大于 300mW 时,容易出现

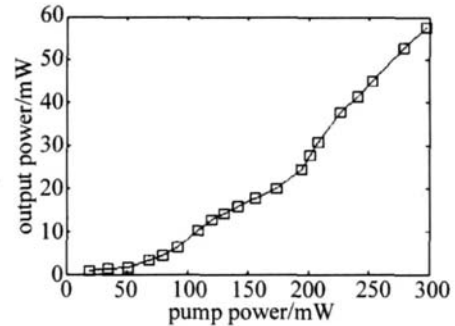
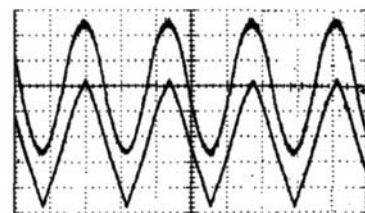
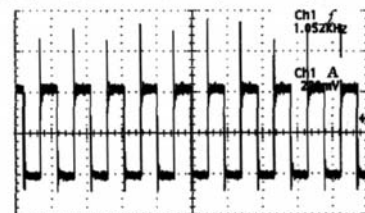


Fig 3 Pump power vs output power

多横模振荡,输出功率反而会下降;利用 Peltier 效应对激光器进行整体恒温控制,在连续 3h 的实测过程中,在输出绿光功率为 30mW 时的光功率稳定度约为 $\pm 1\text{mW}$ 。造成光功率不稳定和高功率时多横模振荡的主要原因:一是腔内没有引入选频器件,激光器处于多纵模运转,纵模通过倍频晶体的和频作用发生耦合以及腔内纵模间的交叉饱和效应产生的“绿光噪声”;二是采用 LD 直接耦合抽运,虽然减少了损耗,但同时由于 LD 输出激光的 x, y 方向的极不对称性和大的发散角,使激光晶体不能被均匀激发;此外,直接在胶合晶体端面上镀膜构成平-平腔,各项参量无法调节以及驱动电流的噪声也影响输出激光的稳定性。

3 激光器脉冲模式下的输出特性

在低重复频率(重复频率小于 50kHz)的电脉冲注入下,调节驱动电源的直流偏置略高于激光器的工作阈值。激光器输出绿光激光脉冲有较好的波形响应,即当选择不同的注入电流波形时,可得到相应波形的绿光脉冲输出。图 4 和图 5 是在选择不同波形的电脉

Fig 4 Green laser pulses of sine and triangle at low repetition rate ($400\mu\text{s}/\text{div}$)Fig 5 Green laser pulses of square at low repetition rate ($1\text{ms}/\text{div}$)

冲注入激光器,重复频率为 1kHz 占空比为 50% 时,得到的绿光激光脉冲的输出情况。当选用方波电脉冲注入时,输出的光脉冲宽度随着注入电脉冲占空比的改变基本上呈线性变化,但因注入的方波电脉冲在上升沿和下降沿均存在弛豫振荡(见图 2),通过激光器的非线性

效应,其输出光脉冲对应产生放大的瞬时脉冲,见图5。

在高重复频率(重复频率大于200kHz)的电脉冲注入下,输出绿光激光脉冲主要由半导体激光器的速率方程所决定,此时光脉冲的宽度主要取决于载流子的注入速率及抽运半导体激光器的调制带宽。图6所示输出激光脉冲的重复频率为559.6kHz,脉冲宽度为74.4ns,脉冲峰值功率为285mW,振幅噪声小于3%。

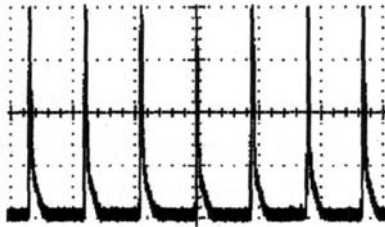


Fig 6 Green laser pulses at repetition rate of 559.6kHz(2 μ s/div)

图7所示重复频率为2.029MHz时,输出的绿光激光脉冲波形、脉冲宽度为161.7ns,振幅噪声约为3.5%。

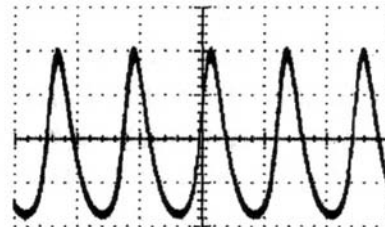


Fig 7 Green laser pulses at repetition rate of 2.029MHz(400ns/div)

对比图6图7可知,当调制电脉冲的重复频率较高时,脉冲宽度较小,每一个电脉冲注入到抽运LD的载流子在LD的第1个弛豫振荡峰发射脉冲后,反转粒子数被迅速消耗,在第2个电脉冲注入之前,不足以维持LD的受激发射,使脉冲后沿相对较快地下降,故输出绿光激光脉冲后沿随着电脉冲重复频率的增加而不断改善,但因受驱动电源最大输出功率和激光器调制带宽的限制,脉冲峰值功率逐渐减小,脉冲宽度也有所展宽^[11]。

4 结论

利用增益开关技术和二次谐波产生理论,研制了全固态、小型化的连续和脉冲双模式运转的绿光激光器。在连续模式下,通过精密温度控制,调整LD出射波长,使其与激光晶体的吸收峰值波长一致,得到最高光光转换效率为19%的绿光激光输出。在脉冲模式下,可获得重复频率为0.5Hz~2MHz的绿光激光脉冲,而目前有报道的采用增益开关技术获得固体激光器脉冲输出的的调节范围一般只有几千赫,最大重复频率也明显地较以往采用调Q技术的重复频率(一般

在100kHz以内)高;并且通过改变激光器驱动电源的工作参数,在重复频率小于50kHz时,可实现绿光激光脉冲的正弦波、三角波及方波3种波形输出,输出方波时脉冲宽度可大范围调节。

实验中发现,在重复频率大于200kHz时,增大注入电流的直流偏置和脉冲幅度,可减小输出激光脉冲宽度,增大峰值功率,这和文献[11]中报道的结论相吻合,但受抽运LD功率和胶合晶体所能承受的最大抽运功率的限制,本文中的小型绿光激光器输出激光脉冲的峰值功率较小,且脉冲宽度相对较大,若采用更大功率的LD,并采用分立激光元件进行合理的腔型设计,进一步改进驱动电源注入电脉冲的能量和电脉冲波形,提高抽运光的抽运能量,则利用增益开关技术应该可获得高功率和窄脉冲宽度的理想绿光激光脉冲。

参考文献

- [1] ZHENG Q, ZHAO L, TAN H M, *et al* LD-pumped high efficiency all-solid-state low noise green laser [J]. Laser Journal, 2001, 22 (2): 6-7 (in Chinese).
- [2] SHEN D Y, LIU A P, SONG J, *et al* Efficient operation of an intracavity-doubled Nd³⁺ YVO₄/KTP laser end pumped by a high-brightness laser diode [J]. Appl Opt, 1998, 37 (33): 7785-7788.
- [3] LI R N, LAI Y J, MA X T. Single frequency green laser produced by diode-pumped Nd³⁺ YVO₄ laser frequency doubling with KTP [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51 (8): 1736-1738 (in Chinese).
- [4] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser end-pumped Nd:YVO₄/KTP high-power solid-state green laser [J]. Opt & Laser Technol, 2002, 34 (4): 333-336.
- [5] FENGL C, HUO Y J, HE S F, *et al* LD-pumped acousto-optically Q-switched 532nm laser with high repetition rate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32 (4): 461-465 (in Chinese).
- [6] WELFORD D. Passively Q-switched lasers [J]. IEEE Circuits & Devices Magazine, 2003, 19 (4): 31-36.
- [7] YANG K J, ZHAO S Z, LI G Q, *et al* A new model of laser-diode end-pumped actively Q-switched intracavity frequency doubling laser [J]. IEEE J Q E, 2004, 40 (9): 1252-1257.
- [8] LARAT C, FEUGNET G, SCHWARZ M, *et al* Gain-switched solid-state-laser pumped by high brightness laser diodes [C]//Lasers and Electro-Optics, Hambury: CLEO, 1996: 57-57.
- [9] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. Nature, 2003, 424 (14): 831-838.
- [10] SHENG F, GE J H, CHEN J. Gain-switched Nd³⁺ YVO₄ microchip laser with high repetition rate short pulse output [J]. Optical Instruments, 2004, 26 (5): 40-43 (in Chinese).
- [11] WU Q Y, XU B, ZHANG Z Q, *et al* Analysis of the temporal performance of a gain-switched four-level laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25 (8): 673-676 (in Chinese).
- [12] SHENG F, CHEN J, GE J H. Effect of pumping conditions on output characteristics of a gain-switched Nd³⁺ YVO₄ laser [J]. Opto-electronic Engineering, 2005, 32 (4): 28-31 (in Chinese).