高重频 Nd:YVO_4 声光调 Q 与 RTP 电光调 Q 激光器实验对比分析

张 健[1],于永吉[1],姜承尧[2],王子健[1],王 彬[1],陈薪羽[1],金光勇[1]

(1. 长春理工大学 理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室,吉林 长春 130022;
2. 长春市第十一高中,吉林 长春 130000)

摘 要:报道了相同实验条件下激光二极管端面抽运生长型复合 Nd:YVO4 晶体声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 激光器。应用声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 分别实现了最高重复频率 200 kHz 和 500 kHz 的 TEM00 模 1 064 nm 激光输出,输出平均功率分别达到 12.13 W 和 13.56 W,脉冲宽度分别为 16.65 ns 和 27.27 ns,并首次对比了两种调 Q 体制下的高重频激光输出特性。实验结果表明,RTP 电光调 Q 具有更好的高重频关断能力,但由于受到高压驱动的限制,RTP 电光调 Q 无法在更高重复频率下实现窄脉宽高峰值功率激光输出,而在更高重频下仍有较好输出性能的声光调 Q 将取代电光调 Q 成为几百千甚至上兆 Hz 高重频激光器的首选调 Q 机制。

关键词:激光器; 高重频; 声光调 Q; RTP 电光调 Q; 生长型复合 Nd:YVO_4 晶体
中图分类号:O436 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.0205002

Experiment comparison of acousto-optical Q-switching and RTP electro-optical Q-switching of high repetition frequency Nd:YVO_4 laser

Zhang Jian[1], Yu Yongji[1], Jiang Chengyao[2], Wang Zijian[1], Wang Bin[1], Chen Xinyu[1], Jin Guangyong[1]

(1. Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Apply, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. No.11 High School of Changchun, Changchun 130000, China)

Abstract: A laser diode (LD) end-pumped adhesive-free bond composite Nd:YVO_4 Acousto Optical(AO) Q-switched and RTP Electro Optical (EO) Q-switched laser were reported at the same experimental condition. TEM00 operation of 1 064 nm laser were obtained at repetition rate of 500 kHz in AO Q-switched regime and 200 kHz in EO Q-switched regime. And it was the first time to compare the output performance of AO Q-switched operation and RTP EO Q-switched operation at high repetition rate. In EO Q-switched regime, the average output power reached to 12.13 W with the pulse-width of 16.65 ns. In AO Q-switched regime, the average output power reached to 13.56 W with the pulse-width of 27.27 ns. The experimental results show that RTP EO Q-switched operation has better performance of

收稿日期:2016-06-04; **修订日期**:2016-07-09
基金项目:国家自然科学基金(61240004)
作者简介:张健(1990-),男,硕士生,主要从事全固态激光器方面的研究。Email: 844718838@qq.com
导师简介:金光勇(1971-),男,研究员,博士,主要从事激光物质相互作用和全固态激光器方面的研究。Email: jgyciom@163.com
通讯作者:于永吉(1983-),男,副研究员,博士,主要从事固体激光及其非线性频率变换方面的研究。Email: 36880280@qq.com

turn-off. However, due to limitation of high voltage driver, EO Q-switched is not able to achieve with shorter pulse width and higher peak power laser under higher repetition rate operation. The AO Q-switched operation that has better output characteristic at higher repetition rate, and it would be the preferred method to obtain Q-switched laser which the repetition rate is high as thousands of hundreds and even mega.

Key words: laser; high repetition rates; AO Q-switched; RTP EO Q-switched; adhesive-free bond composite Nd:YVO_4 crystal

0 引 言

激光二极管(LD)端面抽运高重频调 Q 激光器有着较窄的脉宽、较高的峰值功率和较好的光束质量。由于声光调 Q 具有调制电压低、腔内插入损耗小以及在较高重复频率下仍然能够实现窄脉宽高峰值功率输出等优势,在工业激光精细微加工、自由空间激光通信、空载激光雷达和激光测距等科学研究和工业加工诸多领域有着重要的应用[1-5]。相比于声光调 Q 技术,电光调 Q 则具有消光比高、开关门速度快以及输出脉宽较窄等优点,百千 Hz 重频量级的电光调 Q 激光器更是为非线性频率变换、紫外加工等领域提供了高性能基频光源[6-8]。2008 年,清华大学 Xingpeng Yan 等人报道了 LD 掠入射高掺杂浓度 Nd:YVO_4 高重频声光调 Q 激光器,工作物质掺杂浓度为 3at%,声光调 Q 重频 2.1 MHz 时,获得了 8.6 W 基模 1 064 nm 激光输出,2 MHz 的脉冲能量稳定性和脉宽稳定性分别小于 6.7%和 6.9%[9]。2012 年,笔者所在课题组报道了 LD 端面抽运生长型复合 Nd:YVO_4 晶体的 RTP 电光调 Q 激光器,在最大抽运功率 25 W,重频 150 kHz 下,获得了 10.8 W 的平均输出功率和 12.7 ns 的窄脉宽,x 和 y 方向的光束质量 M^2 分别为 1.116 和 1.108,实现了高光束质量 1 064 nm 激光输出[10]。随后,课题组将 RTP 电光调 Q 重频提高到 200 kHz,在最大抽运功率为 27 W 时,获得了最大平均功率 11.8 W,脉宽 16.65 ns,对应峰值功率 3.5 kW 的基模激光输出,其脉冲幅度峰-峰值波动小于 6%[11],这是基于 RTP 电光调 Q 的 LD 抽运 Nd:YVO_4 激光器在高重频方面做到的最高水平。上述报道表明,声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 在高重频及窄脉宽等输出特性方面有着一定的差异,而针对这两种调 Q 体制,在相同实验条件即相同泵浦条件和相同腔型结构参数下的对比分析却鲜有报道。考虑到应用方面的不同需求,因此文中首次在相同实验条件下,对比了高重频声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 的输出特性,针对两种调 Q 体制进行了详细的对比分析。应用声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 分别实现了最高重复频率 200 kHz 和 500 kHz 的 TEM00 模 1 064 nm 激光输出,输出平均功率分别达到 12.13W 和 13.56W,脉冲宽度分别为 16.65 ns 和 27.27 ns,并首次对比了两种调 Q 体制下的高重频激光输出特性。

1 实验装置

实验装置均采用 LD 单端抽运结构,如图 1 所示。抽运源为德国 DILAS 公司生产的窄线宽光纤耦合 LD,最大输出功率 32.2 W,中心波长 808.2 nm,光纤芯径 400 μm,数值孔径 N.A.=0.22。耦合系统由消色差 1:1 耦合镜筒组成。增益介质采用掺杂浓度 0.4at%,a 轴切割的生长型双端复合 Nd:YVO_4 晶体,这种生长型复合晶体可以有效改善激光器的热性能,未掺杂部分不存在量子亏损产生的热效应,降低了晶体的热透镜效应[12-14]。Nd:YVO_4 晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×(4+7+4) mm,端面镀有 808 nm 和 1 064 nm 增透膜。晶体四周包有铟箔,将其置入紫铜热沉中,以达到较好的冷却效果。抽运源采用 TEC 和循环水冷双重制冷方式,增益介质采用循环水冷方式制冷,水冷温度设定在 18±0.1 ℃。激光谐振腔为 M1 和 M2 构成的平凹腔,M1 为全反镜,镀有 808 nm 增透膜(R<0.2%)和 1 064 nm 高反膜(R>99.9%);输出镜 M2 为曲率半径为 200 mm 的平凹镜,凹面镀有 1 064 nm 反射膜(R=68%),腔长为 100 mm。实验中分别采用了 40%、32%及 20%三种透过率的输出镜,在相同实验条件下通过对比输出功率及转换效率,最终调 Q 对比实验优化选取 32%透过率作为输出镜膜系。

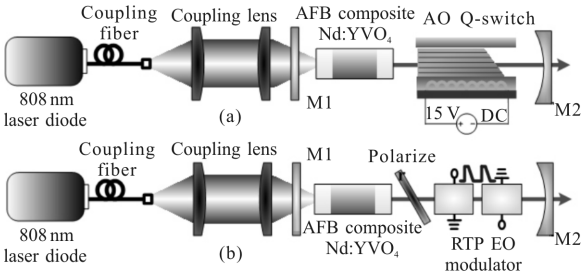


图 1 高重频调 Q 激光器实验装置(a)声光调 Q 实验装置 (b)RTP 电光调 Q 实验装置

Fig.1 Experimental setup of Q-switched laser (a) experimental setup of AO Q-switched laser (b) experimental setup of RTP EO Q-switched laser

在相同实验条件下分别进行了声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 实验。声光 Q 开关为英国古奇公司生产的“牧马”系列,调 Q 晶体为熔融硅,其外形封装尺寸为 63.4 mm×62 mm×37.5 mm (声光 Q 晶体的实际尺寸为 33 mm×36.4 mm×25.9 mm), 两端面镀有 1 064 nm 增透膜, 射频频率为 40.68 MHz, 静态插入损耗<6%, 外部触发器重频为 1 kHz~1 MHz 可调谐。电光调 Q 装置由 Raicol Crystals 公司提供,采用两块 x 轴切割横向加压 RTP 晶体交错排列,RTP 晶体双端均镀有 1 064 nm 增透膜(R<0.3%),尺寸均为 3 mm×3 mm×10 mm,保证 z 轴方向不变,其中一块晶体的 x 轴与另一块晶体的 y 轴相互平行,电极方向与 y 轴垂直,四分之一波电压为 550 V。电光调 Q 驱动源上升时间和下降时间均小于 10 ns,脉冲延迟设定为 1 μs。

2 实验结果及分析

采用图 1 的实验装置在相同的实验条件下分别进行 LD 单端抽运生长型复合 Nd:YVO4 晶体高重频声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 实验。实验中分别使用功率计(F150A-BB-SH-26,OPHIR)测量平均输出功率,数字示波器(TDS2012B,Tektronix)结合光电探测器(DET10A1M,Thorlabs)测量输出激光的脉冲宽度和脉冲序列, 光束质量分析仪 (M2-200s-FW, Spiricon)结合 CCD 相机(GRAS-2045M-C,Spiricon)测量输出激光的光强分布和光束质量 M^2 因子。考虑到复合晶体及其端面镀膜的抗损伤阈值较低, 实验中最大抽运功率只给到 27 W,图 2、3 为最大抽运功率条件下声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 实验的输出平均功率和脉冲宽度随重频变化的关系, 由图 2 可以看出,重频在 230 kHz 以内时,声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 的输出功率随重频变化趋势一致,均为线性增长,在 200 kHz 运转下,输出平均功率分别达到 12.7 W 和 12.13 W,脉宽分别为 19.3 ns 和 16.65 ns,对应光-光转换效率为 47%和 44.9%,由于实验中紧凑型声光调 Q 与含有偏振片及采用双晶体 RTP 电光调 Q 的激光器采用相同腔长, 致使整机腔长变长,导致高重频下最终输出脉宽较宽。在相同实验条件下,这一差异主要由于 RTP 电光调 Q 的腔内插入元件要多于声光调 Q,因此造成了一定的腔内损耗。当重频达到 230 kHz 时,RTP 电光调 Q 输出平均功率趋于饱和,当重频大于 230 kHz 后,RTP 电光调 Q 的输出功率迅速下降,而声光调 Q 依然保持稳定线性增长,主要由于 RTP 电光 Q 开关在高重频高压加载驱动条件下, 短时间内的开关门循环造成单位时间内上能级粒子数累积少,造成了调 Q“关不严门”,功率下降,脉宽展宽,如图 3 所示,低重频条件下 RTP 电光调 Q 具有更好的调 Q 关断能力,相比于声光调Q能够获得更窄的脉冲宽度,但当重频大于 230 kHz

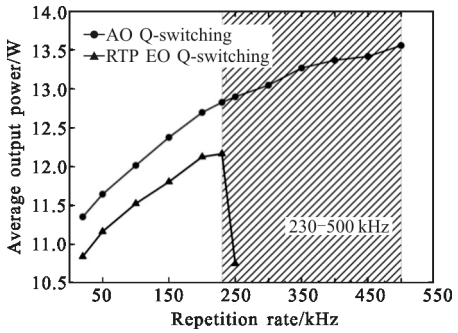


图 2 平均输出功率随不同重频的关系

Fig.2 Relationship of average output power versus different repetition rate

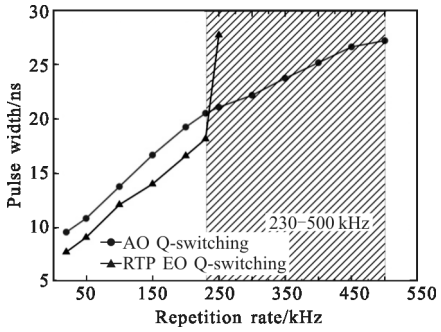


图 3 脉宽随不同重频的关系

Fig.3 Relationship of pulse width versus different repetition rate

后,RTP 电光调 Q 脉冲宽度迅速展宽直至无法形成激光振荡。实验中,应用声光调 Q 最高重频达到 500 kHz,图 4 为声光调 Q 500 kHz 时的脉冲序列图。相应的输出平均功率达到 13.56 W, 对应脉冲宽度为 27.27 ns。

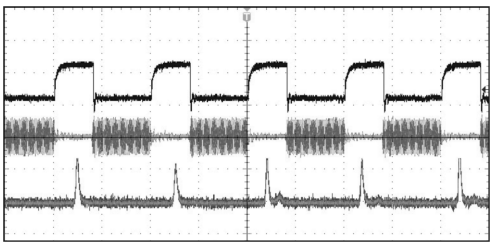


图 4 500 kHz 时的脉冲序列图

Fig.4 Oscilloscope traces of 500 kHz pulse series

图 5 为重频 200 kHz 最大抽运功率条件下测得的 LD 端面抽运生长型复合 Nd:YVO_4 晶体声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 的光强分布图,图 5 表明声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 输出的 1 064 nm 激光均为 TEM00 模。图 6 给出了对应测得的光束质量 M^2 因子,声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 的光束质量因子分别为 M_x^2=1.212,M_y^2=1.188 和 M_x^2=1.118,M_y^2=1.084。

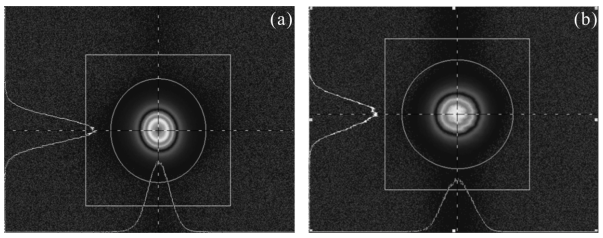
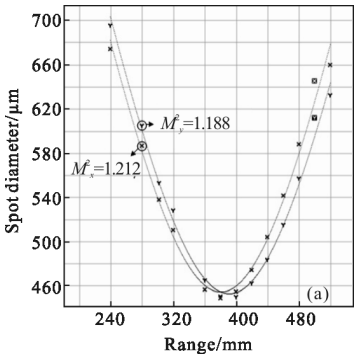


图 5 200 kHz 调 Q 激光光强分布(a)声光调 Q 激光器 (b)RTP 电光调 Q 激光器

Fig.5 Distributions of laser beam intensity for 200 kHz Q-switched laser(a) AO Q-switched laser(b) RTP EO Q-switched laser



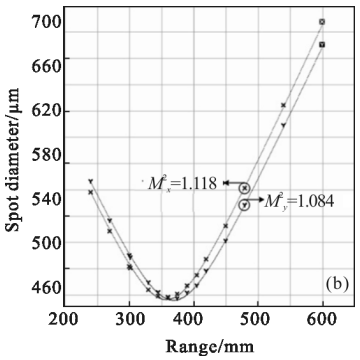


图 6 200 kHz 调 Q 激光器光束质量(a)200 kHz 声光调 Q 激光器光束质量(b)200 kHz RTP 电光调 Q 激光器光束质量

Fig.6 Beam quality for 200 kHz Q-switched laser(a) AO Q-switched laser (b)RTP EO Q-switched laser

在重频为 230 kHz 时,RTP 电光调 Q 最大平均输出功率为 12.4 W,最窄脉宽为 18.5 ns,峰值功率对应 2.91 kW。声光调 Q 所需调 Q 电压仅为 5 V,并且晶体自身承受能力较强,因此利用声光调 Q 装置在较高重频下仍能获得较好的激光输出。实验中,利用声光调 Q 装置最高重频可达到 500 kHz, 最大平均输出功率为 13.15 W,脉宽为 21.9 ns,峰值功率对应为 1.2 kW。在 LD 单端抽运低掺杂浓度生长型复合 Nd:YVO_4 晶体结构下,实现了高重频声光调 Q 激光器和 RTP 电光调 Q 激光器的高光束质量、高转换效率以及窄脉宽运转。

3 结 论

文中在相同实验条件下对比了 LD 单端抽运 Nd:YVO_4 高重频声光调 Q 和 RTP 电光调 Q 激光器的输出特性。在最大抽运功率 27 W,重频 200 kHz 情况下, 声光调 Q 激光器获得最大平均功率 12.7 W,最窄脉宽 19.30 ns 的基模输出, 对应峰值功率为 3.29 kW;RTP 电光调 Q 激光器获得最大平均功率 12.13 W,最窄脉宽 16.65 ns 的基模输出,其对应的峰值功率为 3.5 kW。通过实验可以得出,重频为百千 Hz 时,RTP 电光调 Q 在窄脉宽、高峰值功率方面的优势尤为突出, 这种输出特性使得高峰值功率的电光调 Q 激光器在工业微加工、非线性频率变换等领域有着广阔的发展前景。而在几百千 Hz 甚至更高的重频下,声光调 Q 激光器有着较高的输出功率和转换效率,为激光雷达、激光通信以及激光医疗等

领域提供了很好的前端光源。

参考文献：

[1] Zhang Haikun, Xi Daoming, Wang Jing, et al. Control of the pulse duration a diode-pumped doubly Q-Switched Nd:$GdVO_4$ laser[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2010, 30(3): 788-801. (in Chinese)
张海鹍, 席道明, 王静, 等. 双调 Q Nd:$GdVO_4$ 激光器的脉宽控制[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 788-801.

[2] Feng Yutong, Zhu Xiaolei, Tang Hao, et al. Characteristics of $RbTiOPO_4$ electro-optic Q-Switch operation at high repetition rate[J]. ***Chinese J Lasers***, 2010, 37(3): 617-621. (in Chinese)
冯宇彤, 朱小磊, 唐昊, 等. 磷酸钛氧铷高重复率电光调 Q 特性[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 617-621.

[3] Liu Liren. Laser communications in space optical link and terminal technology[J]. ***Chinese J Lasers***, 2007, 34(1): 3-20. (in Chinese)
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术 [J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.

[4] Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli, et al. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch [J]. ***Chinese J Lasers***, 2009, 36(7): 1654-1659. (in Chinese)
朱小磊, 唐昊, 李小莉, 等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1654-1659.

[5] Zhou Jun, Xu Shizhong, Hou Xia, et al. A Q-Switched all-solid-state single-longitudinal-mode laser with adjustable pulse-width and high repetition rate [J]. ***Chin Phys Lett***, 2006, 23(1): 129.

[6] Li Xudong. Research on 879 nm laser-diode end-pumped Nd:$GdVO_4$ laser with high repetition rate and high brightness [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
李旭东. 879 nm 激光二极管端泵的高重频高亮度 Nd:$GdVO_4$ 激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[7] Wang Cheng. Research on laser-diode end-pumping high repetition rate electro-optical Q-Switchen Nd:$GdVO_4$ laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
王成. LD 端面泵浦高重频电光调 Q Nd:$GdVO_4$ 激光器的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2011.

[8] Zhao Jia, Dong Lei, Zhuo Zhuang, et al. High-repetition-rate RTP electro-optic Q-switched Nd:YAG laser[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(4): 647-650. (in Chinese)
赵佳, 董磊, 卓壮, 等. 高重复率 RTP 电光调 Q Nd:YAG 激光特性研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 647-650.

[9] Yan Xingpeng, Huang Lei, Liu Qiang, et al. 2 MHz AO-switched TEM00 grazing incidence laser with 3at.% Neodymium Doped Nd:YVO_4 [J]. ***IEEE Journal Quantum Electronics***, 2008, 44(12): 1164-1170.

[10] Liu Rui, Yu Yongji, Chen Xinyu, et al. 150 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO_4/Nd:$GdVO_4$ laser[J]. ***Chinese J Lasers***, 2012, 39(6): 0602001. (in Chinese)
刘瑞, 于永吉, 陈薪羽, 等. 150 kHz 生长型复合 Nd:YVO_4/Nd:$GdVO_4$ 电光调 Q 激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602001.

[11] Yu Yongji, Chen Xinyu, Wang Chao, et al. A 200 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO_4 Laser using a double-crystal RTP electro-optic modulator [J]. ***Chinese Physics Letters***, 2012, 29(2): 024206.

[12] Chang Y T, Huang Y P, Su K W, et al. Comparison of thermal lensing effects between single-end and double-end diffusion-bonded Nd:YVO_4 crystals for $^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$ transitions[J]. ***Optics Express***, 2008, 16(25): 21155-21160.

[13] Li X, Yu X, Gao J, et al. Laser operation of LD end-pumped grown-together Nd:YVO_4/YVO_4 composite crystal [J]. ***Laser Physics Letters***, 2008, 5(6): 429-432.

[14] Goujon J, Musset O. Comparison between 2 different composite Nd^{3+}:YVO_4 crystals a fibre coupled diode pumped laser[C]// Advanced Solid-State Photonics, 2008: WB5.