

doi: 10.3788/gzxb20174608.0814001

1 kHz 窄脉宽高峰值功率 MgO : LN 电光腔 倒空 Nd : YAG 激光器

卢一鑫, 白杨, 白冰, 白晋涛

(西北大学 光子学与光子技术研究所, 光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地,
陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

摘 要:报道了一种 1 kHz 窄脉冲宽度、高峰值功率的电光腔倒空 1 064 nm 全固态激光器. 该激光器采用 808 nm 脉冲 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体棒的双凹型折叠谐振腔结构和同步延迟 MgO : LN 晶体横向加压式电光腔倒空技术, 通过优化设计谐振腔结构, 在脉冲重复频率 200 Hz 时, 获得了最大单脉冲能量 46.7 mJ、脉冲宽度 4.06 ns、峰值功率 11.50 MW 的 1 064 nm 脉冲激光稳定输出, 脉冲宽度和能量的峰峰值不稳定性分别为 $\pm 1.52\%$ 和 $\pm 2.02\%$; 在 1 kHz 时, 最大单脉冲能量达到 18.3 mJ, 脉冲宽度 5.02 ns, 峰值功率 3.69 MW, 脉冲宽度和能量的峰峰值不稳定性分别为 $\pm 2.75\%$ 和 $\pm 3.52\%$, 激光束因子为 3.849 和 3.868, 远场发散角为 3.46 mrad 和 3.55 mrad, 束腰直径为 1 508.84 μm 和 1 477.30 μm .
关键词: 固体激光器; 脉冲激光; 脉冲重复频率; 电光调制; 激光谐振腔; 腔倒空; MgO : LN 电光晶体; 窄脉冲宽度; 高峰值功率; 高稳定性

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0814001-7

MgO : LN Electro-optic Crystal Cavity-dumped Nd : YAG Laser for Short Pulse Width and High Peak Power at 1 kHz

LU Yi-xin, BAI Yang, BAI Bing, BAI Jin-tao

(*Institute of Photonics and Photo-Technology, National Key Laboratory of Photoelectric Technology and Functional Materials (cultivation base), Shaanxi Engineering Technology Research Center for All Solid State Laser and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: An electro-optic cavity-dumped 1064 nm solid state laser with short pulse duration and high peak power at 1 kHz repetition rate was proposed. The Nd : YAG crystal was side-pumped by an 808 nm pulsed laser diode in a folded biconcave cavity. Transverse voltage addition cavity dumping mechanism realized with a synchronously delayed MgO : LN crystal was used to generate laser pulses. Output pulses with maximum pulse energy and peak power up to 46.7 mJ and 11.5 MW were obtained, corresponding to 200 Hz repetition rate and 4.06 ns pulse duration at 1 064 nm. Peak to peak instabilities of pulse width and pulse energy were $\pm 1.52\%$ and $\pm 2.02\%$. At the highest repetition rate of 1 kHz, the measured pulse energy, peak power and pulse duration were 18.3 mJ, 3.69 MW and 5.02 ns. Peak to peak instabilities of pulse duration and pulse energy were $\pm 2.75\%$ and $\pm 3.52\%$, corresponding to the beam quality factors of 3.849 and 3.868, far field divergence angles of 3.46 mrad and 3.55 mrad, and waist spot diameter of 1 508.84 μm and 1 477.30 μm respectively.

Key words: Solid state lasers; Pulsed laser; Pulse repetition rate; Electro-optical devices; Laser cavities;

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205114)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(No. 2011KTCL01-06)资助

第一作者: 卢一鑫(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全固态激光器技术. Email: bys627@163.com

导 师: 白晋涛(1959-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为全固态(包括光纤)激光器及超短脉冲激光器. Email: baijt@nwu.edu.cn

通讯作者: 白杨(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大功率全固态激光器及非线性频率变化. Email: by@nwu.edu.cn

收稿日期: 2017-02-27; 录用日期: 2017-04-07

<http://www.photon.ac.cn>

Cavity-dumping; MgO : LN electro-optic crystal; Short pulse width; High peak power; High stability

OCIS Codes: 140.3538; 140.3480; 140.3530; 140.3580; 140.3425

0 引言

稳定输出的高能量、窄脉冲宽度、高峰值功率脉冲激光器在雷达、精密加工、光通信、测距、医学、非线性光学频率变换等方面均获得了广泛的应用^[1-5]. 基于增益介质上能级储能的传统调Q激光器可以获得脉冲宽度10 ns左右的短脉冲激光输出,但是受到增益介质上能级荧光寿命、输出镜透过率、脉冲重复频率等方面的制约难以方便地获得幅值稳定、脉冲宽度为5 ns左右的脉冲激光输出^[6-9]. 虽然可利用被动可饱和吸收体来压缩脉冲宽度,但是受到损伤阈值低的限制,无法获得大能量、高峰值功率的脉冲激光输出^[10-11]. 基于谐振腔光子储能的腔倒空技术因激光脉冲宽度理论上只与谐振腔长度和开关速度有关,因此可以实现相对幅值稳定、大能量、高峰值功率、高重复频率的脉冲激光输出.

近年来,随着纳秒量级响应时间的优质电光晶体的出现,电光腔倒空激光器的研究迅速开展. 2006年, Mcdonagh L等^[12]利用888 nm 半导体激光(LD)端面泵浦Nd : YVO₄晶体和BBO晶体电光腔倒空技术获得了脉冲重复频率100 kHz、脉冲宽度6 ns、单脉冲能量47 μJ的1 064 nm激光输出;2011年, Ping He等^[13]利用879 nm LD端面泵浦键合Nd : GdVO₄晶体和RTP晶体电光腔倒空技术获得了脉冲重复频率50 kHz、脉冲宽度5.5 ns、单脉冲能量102 μJ的1 064 nm激光输出;2014年,石朝辉等^[14]利用880 nm LD端面泵浦Nd : YVO₄晶体和BBO晶体电光腔倒空技术获得了脉冲重复频率500 kHz、脉冲宽度6 ns,单脉冲能量为20 μJ的1 064 nm激光输出. 目前,电光腔倒空激光器大多基于LD端面泵浦增益介质,虽然脉冲宽度压缩到了5 ns以下,但单脉冲能量仅为数十微焦,峰值功率仅为千瓦至数十千瓦,与激光峰值功率高达兆瓦量级的传统电光调Q技术相比差距明显. 虽然2009年冯承勇等^[15]采用脉冲LD端面泵浦Nd : YLF激光晶体和KDP晶体电光腔倒空技术获得了脉冲重复率200 Hz、脉冲宽度4 ns的1 053 nm激光输出. 由于采用端面泵浦,泵浦能量较低,最大单脉冲能量只有1.2 mJ,峰值功率仅达到300 kW. 2014年,朱少岚等^[16]利用氙灯侧面泵浦Nd : YAG晶体和KDP晶体电光腔倒空技术获得了脉冲重复频率30 Hz、脉冲宽度1.7 ns,单脉冲量15 mJ、峰值功率8.82 MW的1 064 nm激光输出,但脉冲重复频率偏低,限制了其应用范围. 此外,常用的电光晶体BBO、KDP易潮解,RTP价格较贵,影响使用. 掺杂氧化镁的铈酸锂(MgO : LN)晶体在具备一般非掺杂铈酸锂晶体(LN)横向半波电压较低优点的同时,掺杂氧化镁可大幅提高其抗光干扰性和抗光折变性,承受光强比一般LN晶体提高了两个数量级^[17],特别是低廉的生产成本使其在大能量、窄脉冲宽度、高峰值功率的脉冲激光器市场开发中具有价格优势.

本文采用808 nm脉冲LD侧面泵浦Nd : YAG晶体棒和同步延迟MgO : LN晶体横向电光腔倒空技术,通过优化设计折叠谐振腔结构,实现了幅值稳定、最大脉冲重复频率1 kHz、窄脉冲宽度、高峰值功率的1 064 nm脉冲激光输出. 脉冲重复频率分别为200 Hz和1 kHz时,最大单脉冲能量分别达到46.7 mJ和18.3 mJ,对应的脉冲宽度分别为4.06 ns和5.02 ns,峰值功率分别高达11.50 MW和3.69 MW,脉冲宽度及能量的峰峰值不稳定性分别为(±1.52%, ±2.02%)@200 Hz、(±2.75%, ±3.52%)@1 kHz.

1 实验装置及原理

基于MgO : LN晶体横向电光调制的脉冲LD侧面泵浦腔倒空激光器原理如图1. 脉冲LD中心发射波长为808 nm,脉冲重复频率为1 kHz ~1 Hz可调,泵浦占空比为20%,脉冲宽度为250 μs. 增益介质Nd : YAG晶体棒的尺寸为φ3 mm×65 mm, Nd³⁺掺杂浓度为1.0 at. %,两个通光均镀制1 064 nm高透射膜(T>99.8%). M₁和M₂均为1 064 nm平凹全反射镜(反射率R>99.8%). 横向加压MgO : LN电光晶体的尺寸为7 mm×7 mm×20 mm, MgO掺杂浓度为6.0 mol%,光抗损伤阈值300 MW/cm²,两个通光均镀制1 064 nm高反射膜(T>99.8%). 实验所使用的加压式高压电光驱动电源的上升沿、下降沿时间均小于4 ns,调制频率范围1 Hz~2.0 kHz,动静比为0.9 : 1. TFP₁、TFP₁均为薄膜偏振片,以55.6°左右的布儒斯特角对1 064 nm的s偏振光高反射、对p偏振光高透射. 808 nm脉冲LD侧面泵浦Nd : YAG晶体棒激发的非偏振1 064 nm受激辐射荧光经过TFP₁后,透射的p偏振1 064 nm受激辐射荧光通过加载横向半波电压的MgO : LN晶体,其偏振态旋转90°变为s偏振态,s偏振1 064 nm受激辐射荧光经过TFP₂被反射至

M_2 , 此时输出耦合率为 0, 1 064 nm 线偏振光得以在谐振腔内振荡放大并以光子的形式储能. 当 MgO:LN 晶体撤去半波电压, 输出耦合率接近 100%, 谐振腔内储存的激光能量在经历一次腔内循环后全部经 TFP₂ 倒出腔外. 由同步脉冲信号发生器向脉冲 LD 泵浦模块驱动电源与 Mg:LN 晶体高压驱动电源提供触发脉冲信号, 通过调节两个信号的延迟触发时间, 保证触发 808 nm 脉冲 LD 泵浦光与 Mg:LN 晶体加压精确同步. 如果电光晶体高压驱动电源的上升沿时间足够快, 则激光脉冲宽度与脉冲重复频率无关, 其值等于光子在谐振腔内单次往返的渡越时间 $\tau = 2L/C$, 其中 L 为谐振腔的光学长度, C 为真空光速^[16]. 本装置实为 V 型折叠谐振腔, 该腔型结构可提高激光的偏振度、避免更多的插入损耗, 从而提高激光的输出能量.

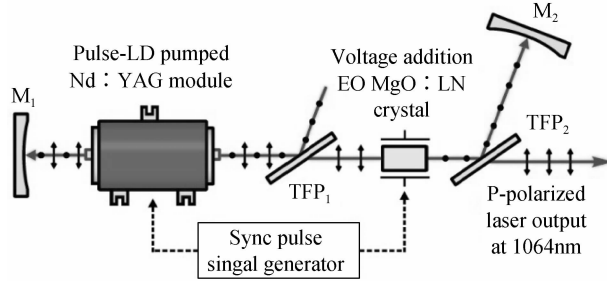


图 1 脉冲 LD 侧面泵浦电光腔倒空激光器结构

Fig. 1 Schematic of pulsed LD side pumped electro-optic cavity-dumping laser

由于随着泵浦功率的增加, 增益介质的热效应加剧, 热透镜焦距减小, 这将严重影响谐振腔的稳定性和光束输出质量, 甚至造成腔失谐, 无法形成激光振荡, 因此需要对谐振腔结构进行优化设计, 使其在一定的热焦距变化范围内具有动态热不灵敏性. 当脉冲重复频率分别为 1 kHz 和 200 Hz 时, 泵浦电流从 50 A 升至 100 A 时, 利用热透镜焦距动态 CCD 测试法^[18] 测量得到热透镜焦距分别从 430 mm 下降至 320 mm 左右@ (1.0 kHz)、750 mm 下降至 640 mm 左右@ (200 Hz). 在 Nd:YAG 晶体棒和 MgO:LN 电光晶体尺寸已经确定的前提下, 基于热稳定性理论和热透镜焦距随泵浦功率的变化规律, 实验利用激光谐振腔设计软件 (LASCAD) 对谐振腔的结构参量进行了优化设计, 兼顾到降低激光脉冲对晶体、镀膜的伤害风险, 适当增加了谐振腔长度, 最终确定 M_1 、 M_2 的凹面曲率半径分别为 2.5 m 和 0.6 m, 谐振腔光学长度 L 500 mm 左右, 激光在腔内的单次往返渡越时间 $\tau = 3.34$ ns.

根据 ABCD 矩阵理论, 当脉冲重复频率为 1 kHz 时, 热透镜焦距从 430 mm 下降至 320 mm, 利用 LASCAD 软件计算得到谐振腔的稳定性参量变化规律为

$$\left| \frac{A_s + D_s}{2} \right| \approx 0.4025 \rightarrow 0.8558 / 1.0 \text{ kHz} \quad (1)$$

$$\left| \frac{A_t + D_t}{2} \right| \approx 0.4574 \rightarrow 0.9092 / 1.0 \text{ kHz} \quad (2)$$

当脉冲重复频率为 200 Hz 时, 热透镜焦距从 750 mm 下降至 640 mm, 计算得到谐振腔的稳定性参量变化规律为

$$\left| \frac{A_s + D_s}{2} \right| \approx 0.4921 \rightarrow 0.7205 / 200 \text{ Hz} \quad (3)$$

$$\left| \frac{A_t + D_t}{2} \right| \approx 0.5419 \rightarrow 0.8254 / 200 \text{ Hz} \quad (4)$$

式中 s, t 分别表示弧矢面光斑和子午面光斑. 式(1)~(4)表明, 不同脉冲重复频率下, 当热透镜焦距在较大范围内变化时, 谐振腔的稳定性参量始终小于 1, 经过优化设计的谐振腔对泵浦功率变化具有热不灵敏性. 在最大泵浦电流 100 A 时, 理论模拟 1 064 nm 多模激光束的弧矢面光斑尺寸、子午面光斑尺寸随腔长的变化规律如图 2 所示. 1 kHz 时, Nd:YAG 晶体棒和 Mg:LN 电光晶体中多模激光束的弧矢面光斑、子午面光斑尺寸分别约 ($d_s \approx 2.76$ mm, $d_t \approx 2.73$ mm) 和 ($d_s \approx d_t \approx 2.62$ mm); 200 Hz 时, 相应晶体中的弧矢面光斑、子午面光斑尺寸分别约 ($d_s \approx 2.58$ mm, $d_t \approx 2.57$ mm) 和 ($d_s \approx d_t \approx 2.46$ mm). 理论模拟表明, Nd:YAG 晶体棒和 MgO:LN 电光晶体中多模激光束的弧矢面光斑和子午面光斑彼此之间的差异很小, 可较好地提高激光输出的稳定性和光束质量^[19], 同时较大的激光光斑尺寸也能够降低晶体、镀膜的光损伤风险.

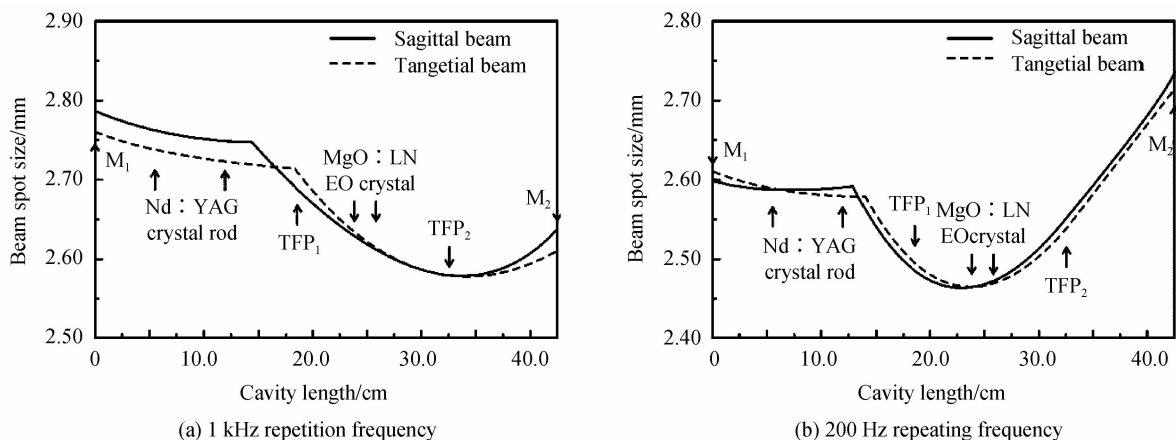


图2 1 kHz和200 Hz脉冲重复频率时谐振腔内光斑直径沿谐振腔变化的仿真结果

Fig. 2 Beam diameters as function of the cavity length at 1 kHz and 200 Hz repetition frequency, respectively

实验中,使用 Coherent 公司的 FieldMax-TOP 型号功率/能量计以及 J-25MB-LE&-HE 能量探头测量脉冲激光能量,使用 Anilent Technologies 公司带宽 1 GHz、采样率 20 Gsa/s 的 DS09104AB 型示波器和 Thorlabs 公司上升沿为 50 ps 的 DET02AFC 光电探测器测量激光脉冲宽度,使用 YOKOGAWA 公司的波长分辨率为 0.06 ns@1 064 nm 的 AQ6370C 型光谱分析仪测量激光谱线宽度.采用 $(\text{最大峰值}-\text{最小峰值}) \times 0.5 / \text{平均值}$ 的公式计算 3000 个脉冲的能量及脉冲宽度的峰峰值不稳定性^[15],采用 $(\text{单脉冲能量}/\text{脉冲宽度})$ 的公式计算脉冲峰值功率^[20].

2 实验结果

实验中,MgO:LN 电光晶体加载的横向半波电压@1 064 nm 为 4.8 ± 0.2 kV,随着脉冲重复频率不同需要对其横向半波电压和触发延时量进行微调.不同脉冲重复频率下,激光单脉冲能量及脉冲宽度随泵浦电流及泵浦电压的变化规律如图 3 所示.可以看出,在相同的泵浦电流下,随着脉冲重复频率的减小,由于单程激光增益逐渐增大,单脉冲能量会随之提高;在相同的重复频率下,随着泵浦电流的增加,脉冲宽度的起伏小于 ± 0.1 ns.在最大泵浦电流 100 A 和泵浦电压 42 V 时,1 kHz、600 Hz、400 Hz 和 200 Hz 对应的最大单脉冲能量测量值、脉冲宽度、脉冲宽度峰峰值不稳定性分别为(18.3 mJ,5.02 ns, $\pm 2.75\%$)、(26.9 mJ,4.70 ns, $\pm 2.32\%$)、(32.7 mJ,4.41 ns, $\pm 1.85\%$)和(46.7 mJ,4.06 ns, $\pm 1.52\%$),对应的单脉冲测量波形如图 4 所示,考虑到高压驱动电源参量变化和测量误差等因素的影响,可以认为激光脉冲宽度与激光在谐振腔内单次往返的渡越时间理论计算值基本符合;最大脉冲重复频率 1 kHz 时,激光峰值功率相对最小为 3.65 MW;200 Hz 时,激光峰值功率达到 11.50 MW,接近 MgO:LN 电光晶体的光损伤阈值,故实验将脉冲重复频率的下限设定在 200 Hz.不同脉冲重复频率下的谱线宽度测量值均在 0.24 nm 左右,1 kHz 时的测量光谱如图 5 所示.

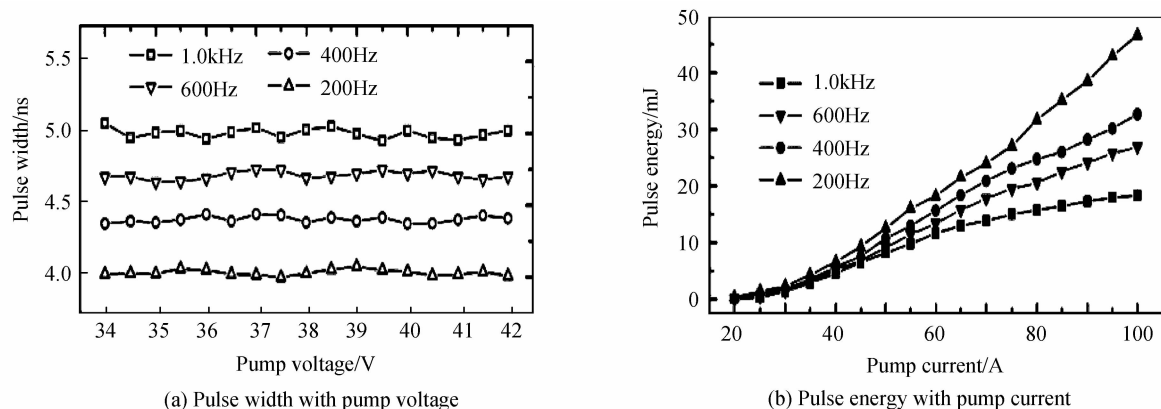


图3 不同脉冲重复频率下脉冲宽度及激光单脉冲能量随泵浦电流及泵浦电压的变化

Fig. 3 Pulse width and pulse energy as function of the pump current and pump voltage at different repetition frequency

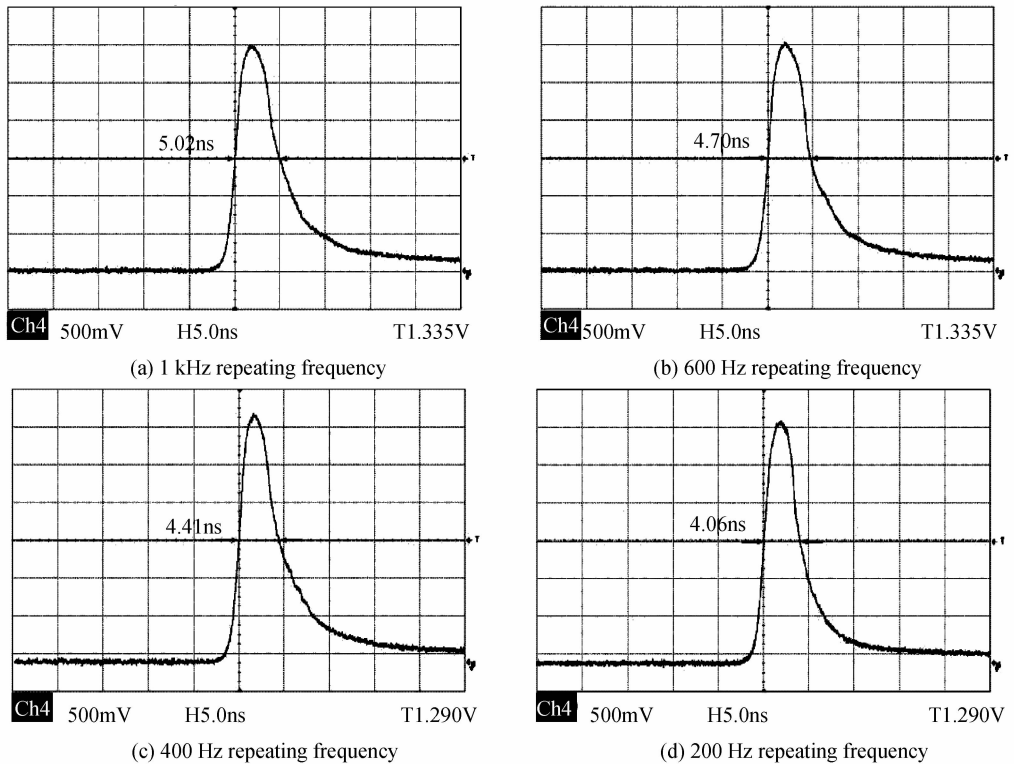


图 4 最大泵浦电流 (100A) 时不同脉冲重复频率的单脉冲波形

Fig. 4 Single pulse envelopes measured at different repetition rates when the pump current is at the maximum value of 100 A

图 6 展示了在最大泵浦电流 100 A 和泵浦电压 42 V 时不同脉冲重复频率的高稳定性激光脉冲序列轨迹. 1 kHz、600 Hz、400 Hz 和 200 Hz 对应的能量峰峰值不稳定性分别为 $\pm 3.52\%$ 、 $\pm 3.09\%$ 、 $\pm 2.22\%$ 和 $\pm 2.02\%$. 脉冲-脉冲能量高稳定性输出的原因可以解释为在 1 kHz~200 Hz 范围内, 相邻激光脉冲的时间间隔均明显大于 Nd:YAG 晶体 230 μs 的上能级荧光寿命, 这充分保证了脉冲 LD 泵浦光有充足的时间泵浦 Nd:YAG 晶体棒, 使每个脉冲激光的增益恢复到最大值, 即始终保持受激辐射光在放大过程中消耗的反转粒子数与受激吸收过程中增加的反转粒子数之间的平衡, 相邻激光脉冲在振荡放大过程中相互不受影响. 同时发现, 随着脉冲重复频率的下降, Nd:YAG 晶体棒中的热积累减小, 引发的热透镜效应和热弛豫振荡减弱, 脉冲宽度峰峰

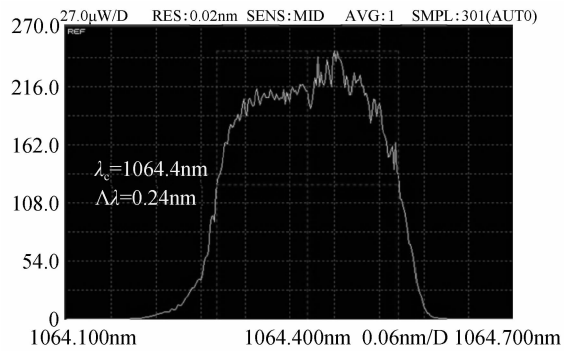
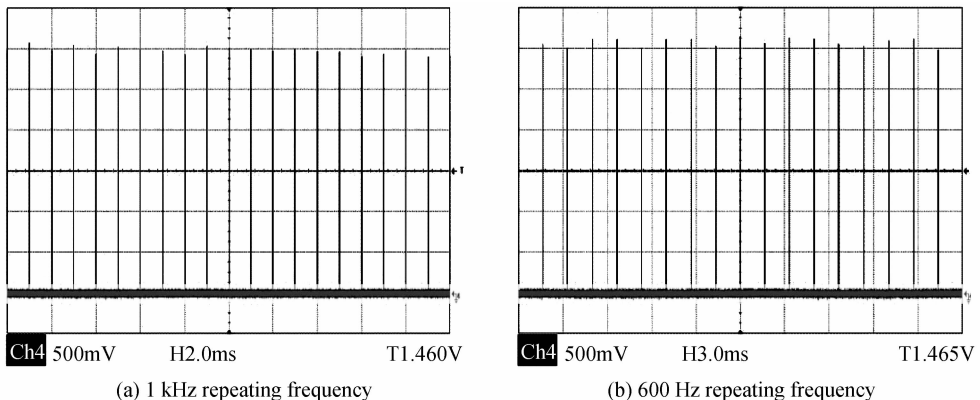


图 5 1 kHz 时的脉冲激光输出光谱

Fig. 5 Output spectrum at the repetition rate of 1 kHz



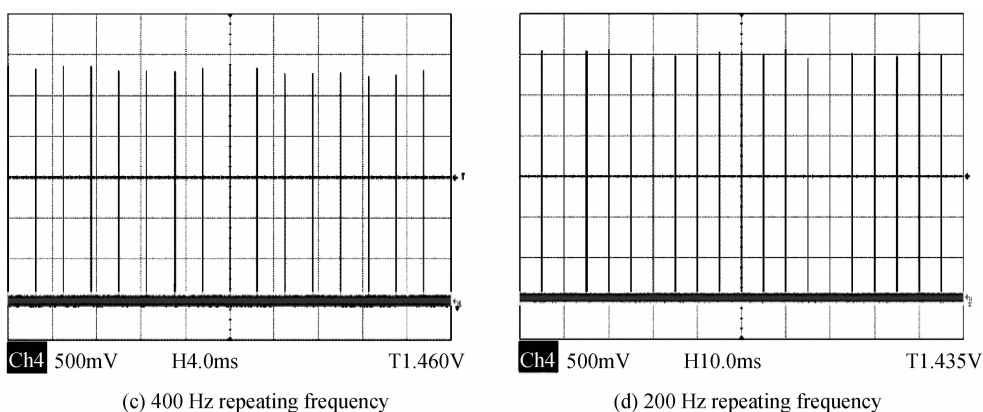
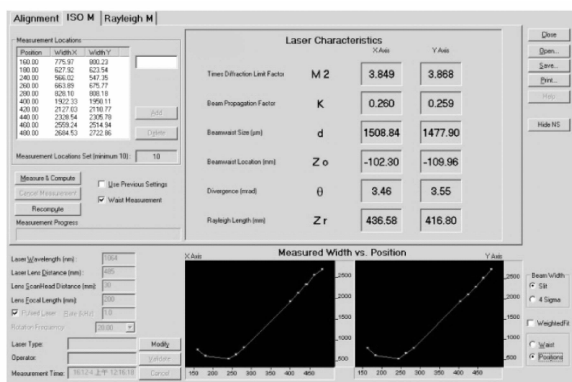


图6 最大泵浦电流(100A)时对应不同脉冲重复频率的激光脉冲序列

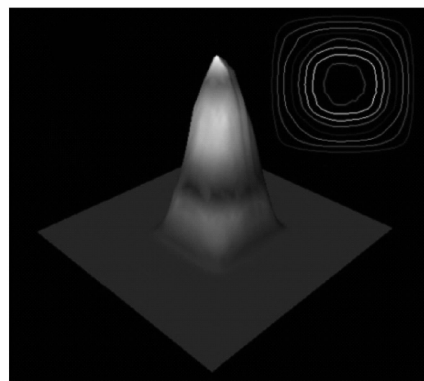
Fig. 6 Output laser pulse trains measured at different repetition rates when the pump current is at the maximum value of 100 A

值不稳定性和能量峰峰值不稳定性均呈现出小幅下降趋势。

实验使用 Photon Inc. 公司的 ModeScan1740 型 (允许最大平均功率 ≤ 100 W, 允许脉冲重复频率 ≥ 1 kHz) 光束质量分析仪对脉冲重复频率 1 kHz 的激光束进行了无衰减的光束质量分析, 测试数据如图 7(a) 所示. 在最大泵浦电流 100 A 时, 1 064 nm 激光束的 M^2 因子为 $M_x^2 = 3.849$, $M_y^2 = 3.868$, 远场发散角 θ 为 $\theta_x = 3.46$ mrad, $\theta_y = 3.55$ mrad, 束腰直径 d 为 $d_x = 1\,508.84$ μm , $d_y = 1\,477.30$ μm . 图 7(b) 为近场光束的 3D 和 2D 光斑能量密度分布测试图. 通过双凹折叠型谐振腔的优化设计, 有助于提高激光束的光束质量, 从上述 M^2 因子和远场发散角 θ 的无衰减测试数据可以得到佐证.



(a) Test data graph of laser beam quality



(b) 3D and 2D beam energy density distributions of laser

图7 最大泵浦电流(100A)和脉冲重复频率为 1 kHz 时的激光束近场光束激光光束质量的测试数据、3D 和 2D 光斑能量密度分布

Fig. 7 Test data graph of laser beam quality, 3D and 2D beam energy density distributions of the laser at the maximum pump current of 100 A and repetition rate of 1 kHz

3 结论

实验研究了一种基于 MgO : LN 晶体横向电光调制和脉冲 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 晶体棒的腔倒空激光器. 通过结构优化设计, 该腔倒空激光器具有良好的热不灵敏特性, 在 4.8 kV 较低的 MgO : LN 晶体半波电压调制和 500 mm 谐振腔光学长度条件下, 实现了 1 kHz~200 Hz 脉冲频率可调、4~5 ns 窄脉冲宽度、3~11 MW 量级高功率 1 064 nm 脉冲激光的稳定输出. 当脉冲重复频率为 200 Hz 时, 最大单脉冲能量达到 46.7 mJ、脉冲宽度 4.06 ns、峰值功率高达 11.50 MW, 脉冲宽度及能量的峰峰值不稳定性分别为 $\pm 1.52\%$ 和 $\pm 2.02\%$; 1 kHz 时, 最大单脉冲能量达到 18.3 mJ、脉冲宽度 5.02 ns、峰值功率 3.69 MW, 脉冲宽度及能量的峰峰值不稳定性分别为 $\pm 2.75\%$ 和 $\pm 3.52\%$, 同时测得 M^2 因子为 $M_x^2 = 3.849$, $M_y^2 = 3.868$, 远场发散角 θ 为 $\theta_x = 3.46$ mrad, $\theta_y = 3.55$ mrad, 束腰直径 d 为 $d_x = 1\,508.84$ μm , $d_y = 1\,477.30$ μm . 该实验结果可为激光打标、激光切割、激光打孔、激光测距、遥感、非线性光学频率变换等领域提供应用参考.

参考文献

- [1] MA Y F, YU X, LI X D, *et al.* Improved performance of acoustooptically Q-switched Nd : GdVO₄ laser by using the planoconvex cavity[J]. *Laser Physics*, 2008, **18**(12): 1505-1507.
- [2] BUTLER A C, SPENCE D J, COUTTS D W. Scaling Q-switched microchip lasers for shortest pulses[J]. *Applied Physics B*, 2012, **109**(1): 81-88.
- [3] HENDOW S T, SHAKIR S A. Structuring materials with nanosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10188.
- [4] TEIXIDOR D, FERRER I, CIURANA J, *et al.* Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, **29**(1): 209-218.
- [5] ZHANG Da-yong, ZHANG Kun, LI Yao, *et al.* 100 W all-fiberized pulsed fiber laser with high repetition rate and narrow pulse duration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0814002.
张大勇,张昆,李尧,等. 100 W全光纤化高重复率窄脉宽光纤激光器[J]. 光子学报, 2016, **45**(8): 0814002.
- [6] WANG Xu, SUN Zhe, CHENG Guang-hua. High repetition rate and short width electro-optic Q-switched Nd : YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(6): 0601007.
王旭,孙哲,程光华. 高重复频率窄脉宽电光调 Q Nd : YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2016, **43**(6): 0601007.
- [7] TANG Hao, ZHUN Xiao-lei, MENG Jun-qing, *et al.* High repetition rate short pulse width LGS electro-optic-switched Nd : YVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 137-141.
唐昊,朱小磊,孟俊清,等. 高重复频率窄脉宽 LGS电光调 Q Nd : YVO₄ 激光器[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 137-141.
- [8] SHEN Zhao-guo, TANG Gang-feng, DONG Tao, *et al.* LD pumped Nd : YAG high energy slab laser[J]. *Laser and Infrared*, 2016, **46**(2): 187-190.
沈兆国,唐刚峰,董涛,等. 高能量 LD 泵浦 Nd : YAG 板条激光器[J]. 激光与红外, 2016, **46**(2): 187-190.
- [9] MA Y F, YU X, TITTEL F K, *et al.* Output properties of diode-pumped passively Q-switched 1.06 μm Nd : GdVO₄ laser using a[100]-cut Cr⁴⁺ : YAG crystal[J]. *Applied Physics B*, 2012, **107**(2): 339-342.
- [10] WEN Wu-qi, FU Ru-lian, SUN Jian-tang, *et al.* Short cavity passive Q-switched Nd : YAG laser end-pumped by QCW-LDA[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(9): 900-903.
温午麒,傅汝廉,孙建堂,等. LDA 端泵浦短腔 Cr⁴⁺ : YAG 被动调 Q Nd : YAG 激光器[J]. 光电子 · 激光, 2002, **13**(9): 900-903.
- [11] ZHAO S, LI G, LI D, *et al.* Dual-loss-modulated Q-switched and mode-locked Nd : GdVO₄ laser with AO and Cr⁴⁺ : YAG saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, **7**(1): 29-33.
- [12] MCDONAGH L, WALLENSTEIN R, KNAPPE R. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM(00) Nd : YVO(4) oscillator[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(22): 3303-3305.
- [13] HE Ping, WANG Hui-li, ZHANG Li-li *et al.* Cavity-dumped electro-optical Q-switched Nd : GdVO₄ laser with high repetition rate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(3): 631 - 634.
- [14] SHI Zhao-hui, LIU Xue-song, HUANG Yu-tao, *et al.* 500 kHz, 6 ns High repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd : YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(10): 1002006.
石朝辉,刘学松,黄玉涛,等. 500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd : YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2014, **41**(10): 1002006.
- [15] FENG Cheng-yong, FAN Zhong-wei, CUI Jian-feng, *et al.* Electro-optically cavity-dumped Nd : YLF lasers with high beam quality and short pulse[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(1): 32-35.
冯承勇,樊仲,崔建丰,等. 高光束质量短脉宽电光腔倒空 Nd : YLF 激光器[J]. 光电子 · 激光, 2009, **20**(1): 32-35.
- [16] ZHU Shao-lan, ZHAO Wei, LIU Bai-yu, *et al.* Cavity dumped laser using fast GaAs photoconductive switch[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(5): 0502003.
朱少岚,赵卫,刘白玉,等. 利用高速 GaAs 光电导开关实现腔倒空激光脉冲输出[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502003.
- [17] SU Zhuo-lin MENG Qing-long YU Jun-li, *et al.* Analysis of damage threshold of MgO-doped LiNbO₃ crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(11): 1116003.
苏卓琳 孟庆龙 于军立,等. 掺氧化镁铌酸锂晶体的损伤阈值分析[J]. 光学学报, 2015, **35**(11): 1116003.
- [18] 白杨. LD 侧面泵浦多晶 Nd:YAG 陶瓷 BBO 电光调 Q 窄脉宽绿光、紫外光激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2010: 48-50.
- [19] SHI R P, BAI Y, QI M, *et al.* A passively modelocked intracavity frequency doubled Nd : YVO₄ femtosecond green laser based on graphene[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, **11**(2): 025001.
- [20] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. New York, USA: Springer Science + Business Media press, 2006: 474-478.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61205114) and the Science and Technology Coordinator Innovation Plan Project of the Shaanxi Province (No. 2011KTCL01-06)