

12.5 μJ 电光腔倒空锁模皮秒激光器的实验研究

李 丽^{1,2,3} 樊仲维^{1,3*} 余 锦¹ 牛 岗³ 白振岍³ 滕崧寒^{1,2,3}

(¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094; ² 中国科学院大学, 北京 100049)
³ 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192)

摘要 报道了单脉冲能量大于 10 μJ 的腔倒空锁模皮秒激光器。通过实验完成了光纤耦合激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体、半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模的大功率皮秒激光振荡器后, 在锁模腔内插入 BBO 电光晶体, 实现重复频率 1 Hz~10 kHz 连续可调的电光腔倒空锁模运转。在抽运功率 17.9 W 时, 获得了单脉冲能量 12.5 μJ 、重复频率 10 kHz、脉冲宽度 24.7 ps 的激光输出。

关键词 激光器; 固体激光器; 锁模激光器; 皮秒脉冲; 腔倒空技术; 普克尔盒

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.071403

Experimental Research on 12.5 μJ Electro-Optical Cavity-Dumped Mode-Locked Picosecond Laser

Li Li^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Yu Jin¹ Niu Gang³ Bai Zhen'ao³ Teng Songhan^{1,2,3}

(¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract This paper reports the cavity-dumped mode-locked picosecond laser with single pulse energy greater than 10 μJ for the first time in China, to the best of our knowledge. We complete semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) mode-locked high-power picosecond laser oscillator with a fiber-coupled laser diode end-pumped Nd:YVO₄ crystal. Then we insert BBO electro-optic crystal to the clamping cavity, realizing the repetition frequency 1 Hz~10 kHz continuously adjustable electro-optical cavity-dumped mode-locked operation. When the pump power is 17.9 W, pulses with single pulse energy of 12.5 μJ and repetition frequency of 10 kHz are obtained, whose pulse width is about 24.7 ps.

Key words lasers; solid-state lasers; mode-locked laser; picosecond pulse; cavity-dumping technology; Pockels cell

OCIS codes 140.4050; 320.5390; 230.2090

1 引 言

皮秒激光脉冲具有高峰值功率、高光束质量等特点, 利于材料的精细加工, 即学术界所称冷加工。特别是能量为微焦量级的皮秒激光脉冲在高精度、低热损伤激光加工领域有着重要应用^[1]。目前获得大能量皮秒激光脉冲的途径主要包括再生放大^[2]、多通放大^[3]和超长谐振腔锁模振荡器^[4-5]。而腔倒空锁模激光器是提高单脉冲能量简单有效的方案, 以降低脉冲重复频率为代价, 不需要引入复杂的放大系统^[6]。

腔倒空皮秒激光器最早见于 1987 年德国的 Glotz 等^[7]的报道: 选用 Nd:YAG 晶体作增益介质, 声光/染料锁模、电光腔倒空获得脉冲宽度 80 ps、重复频率 100 Hz、平均单脉冲能量 1 mJ \times (1 \pm 4%) 的皮秒激光

收稿日期: 2013-04-03; 收到修改稿日期: 2013-04-20; 网络出版日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205136)、中国科学院科研装备研制项目(YZ201216)、中国科学院光电研究院创新项目(Y30B16A13Y)、科技部“十二五”科技支撑计划(2012BAI07B04)、高光束质量绿光钻石切割关键技术及装备(K20110037)

作者简介: 李 丽(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器和超快激光等方面的研究。E-mail: milly@aoe.ac.cn

导师简介: 樊仲维(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制、大功率全固态激光技术与谐波产生技术、高亮度半导体激光耦合技术等方面的研究。E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

输出。2005年, Killi等^[8]对激光二极管(LD)端面抽运的Nd:YVO₄皮秒振荡器采用双BBO电光腔倒空,实现了重复频率50 kHz~1 MHz的调谐,在重复频率401 kHz时单脉冲能量3.5 μJ、倒空率91%,500 kHz时单脉冲能量2.6 μJ,在重复频率0.7, 0.8, 1 MHz时,脉冲能量为常量1.8 μJ。2009年,匈牙利High Q公司的Wegner等^[9]报道了二极管端面抽运半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的Nd:YVO₄皮秒激光器,并采用BBO晶体进行腔倒空,在重复频率为500 kHz时,获得平均功率7.8 W、单脉冲能量15.6 μJ的皮秒脉冲输出;当重复频率升高至1 MHz时,获得平均功率10 W、单脉冲能量10 μJ的皮秒激光脉冲输出。

国内对于腔倒空皮秒激光器的报道见于2005年,北京工业大学张丙元等^[10]将电光腔倒空与激光二极管端面抽运Nd:YAG半导体可饱和吸收镜锁模激光器相结合,在连续抽运功率5 W条件下获得了脉冲宽度11 ps的锁模单脉冲输出和脉冲宽度200 ns的调Q脉冲输出,腔倒空单脉冲能量30 nJ,重复频率10 Hz。2011年,该课题组实现端面抽运Nd:YVO₄晶体的SESAM连续锁模后,在锁模腔内插入BBO电光调制晶体,获得10 kHz腔倒空皮秒锁模脉冲输出^[11]。当抽运光功率为14.1 W时,输出锁模脉冲的单脉冲能量为6.5 μJ,脉冲宽度10.4 ps。

在国内外对腔倒空锁模皮秒激光器研究的基础上,本文采用SESAM锁模技术和腔倒空技术相结合实现大功率、高能量的腔倒空锁模皮秒激光器。首先建立起稳定的连续锁模皮秒脉冲,在腔内进行无输出损耗的激光振荡,当腔内光能量达到饱和时,利用电光开关突然使光的偏振态发生改变,倒出腔内的激光能量。通过控制电光开关的重复频率,可得到单脉冲能量微焦量级的皮秒脉冲,该激光脉冲可直接用于精细微加工。

2 实验装置

通过优化谐振腔设计,完成了实验腔型的设计和装调。图1为实验装置图,其中图1(a)为对连续锁模皮秒激光器进行调试的实验装置,图1(b)为插入电光开关形成腔倒空皮秒激光器的实验装置。

实验所用抽运模块为LIMO公司生产的30 W光纤耦合激光器(耦合光纤纤芯直径400 μm,数值孔径NA=0.22),抽运光经过三片整形镜聚焦进Nd:YVO₄晶体(掺Nd³⁺原子数分数0.27%,尺寸3 mm×3 mm×10 mm,a向切割)。HR1为前后表面镀808 nm增透膜、后表面增镀1064 nm全反膜的0°镜;HR2和HR3为镀1064 nm全反膜的平面反射镜;R1、R2为平凹镜,镀1064全反膜;SESAM调制深度 $\Delta R=0.6\%$,吸收系数 $A=1\%$,饱和恢复时间小于10 ps。图1(a)采用薄膜偏振片(TFP)和1/4波片进行激光输出。图1(b)中插入普克尔盒(PC),并将1/4波片移除,实现对腔内激光能量的倒空,普克尔盒中电光晶体为BBO,其1/4波长电压为4800 V。

3 实验结果及分析

3.1 连续锁模状态下激光器输出光参数

在图1(a)所示实验装置下调节谐振腔,使激光器实现稳定的连续锁模,利用光电管和示波器记录激光器锁模脉冲序列,如图2所示,脉冲重复频率58.57 MHz。调节1/4波片,在抽运功率为17.9 W时获得最大平均输出功率2.83 W,提高抽运功率,输出功率可达5 W。通过腔型的优化设计,实现了在连续锁模状态下的大功

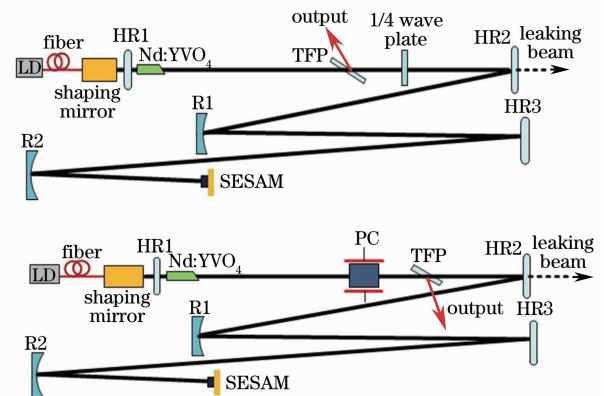


图1 实验装置图。(a)连续锁模皮秒激光器;
(b)腔倒空锁模皮秒激光器

Fig. 1 Experimental setup. (a) CW mode-locked picosecond laser; (b) cavity-dumped mode-locked picosecond laser

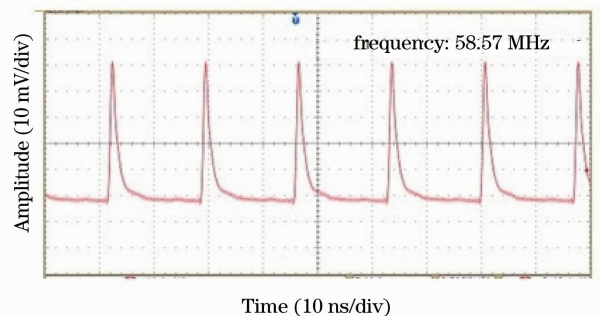


图2 连续锁模脉冲输出

Fig. 2 Output train of CW mode-locked laser

率输出,为获得大的腔倒空单脉冲能量奠定基础。

3.2 腔倒空皮秒激光器输出光参数

在上述稳定的连续锁模皮秒激光器中插入普克尔盒,将 $1/4$ 波片移除,并通过精确调节恢复稳定的连续锁模,给电光晶体加压,精确调节电光晶体的加压时间,实现对腔内激光能量的倒空。

图 3 为重复频率为 10 kHz 时的倒空锁模脉冲序列。图 4 为单个腔倒空锁模脉冲波形。可见系统的消光比已经很高,但仍然能看到略微突起的连续锁模脉冲,可以通过使用更好的偏振片以及进一步细调普克尔盒提高系统消光比,获得更加纯净的腔倒空脉冲。

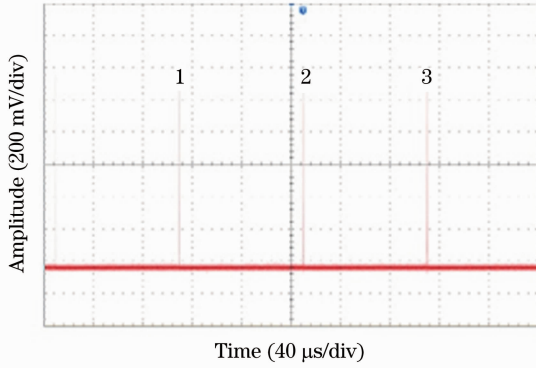


图 3 10 kHz 腔倒空锁模脉冲序列

Fig. 3 Cavity-dumped output pulse train at the repetition rate of 10 kHz

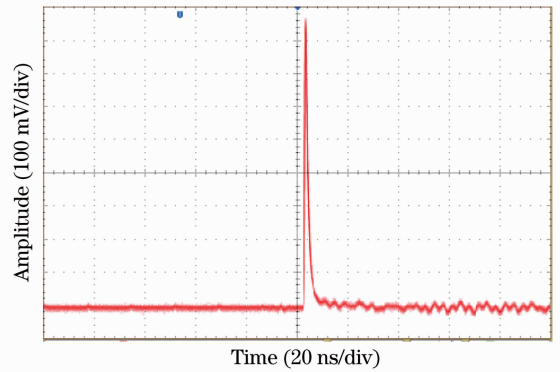


图 4 10 kHz 单个腔倒空锁模脉冲波形

Fig. 4 Single cavity-dumped mode-locked pulse at the repetition rate of 10 kHz

通过优化调节,在抽运功率 17.9 W 时获得了 125 mW 的 10 kHz 腔倒空锁模脉冲,单脉冲能量 12.5 μ J。用自相关仪 (Femtochrome Research Inc., 型号 FR-103XL) 测量 10 kHz 腔倒空锁模脉冲自相关曲线,图 5 为示波器记录的自相关曲线,其半峰全宽 $\Delta t = 1.09$ ms。脉冲宽度 $\tau = \Delta t \times \alpha \times 32$ (ps/ms), α 是波形系数,按高斯函数拟合 $\alpha = 0.707$,算得激光脉宽为 24.7 ps。用光谱分析仪 (YOKGAWA Inc., 型号 AQ6370B) 测得 10 kHz 腔倒空锁模脉冲的光谱曲线,如图 6 所示。可以读出光谱中心波长 1063.98 nm,带宽 0.17 nm。计算得时间带宽积为 1.13。

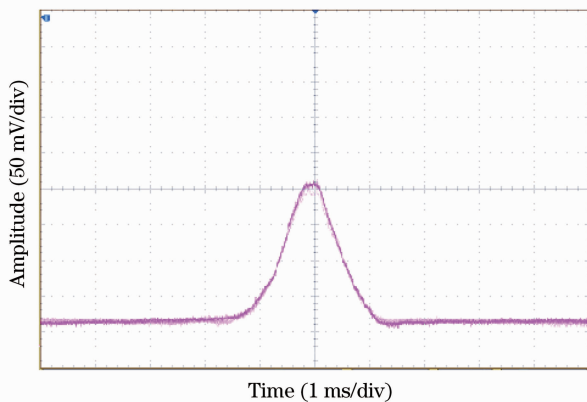


图 5 腔倒空锁模皮秒脉冲自相关曲线

Fig. 5 Autocorrelation curve of cavity-dumped mode-locked picosecond pulse

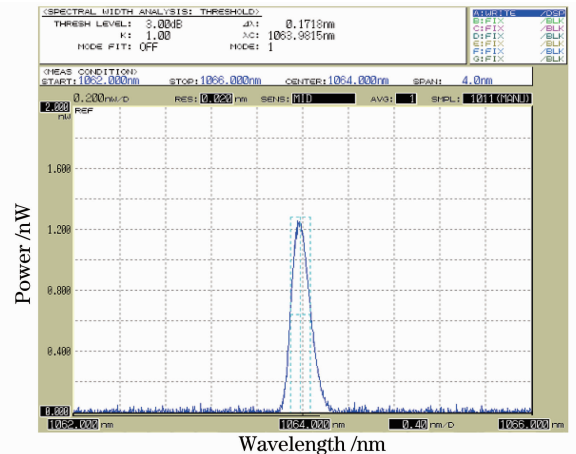


图 6 腔倒空锁模皮秒脉冲光谱图

Fig. 6 Optical spectrum of cavity-dumped mode-locked picosecond pulse

用光束质量分析仪 (Spiricon Inc., 型号 M^2 -200-8) 对 10 kHz 腔倒空锁模脉冲进行分析,如图 7 所示, X、Y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.42、1.58。

3.3 实验分析

对于腔倒空激光器,由于封闭腔内的高峰值强度,对镀膜元件的光损伤是主要的问题。通过腔型设计产

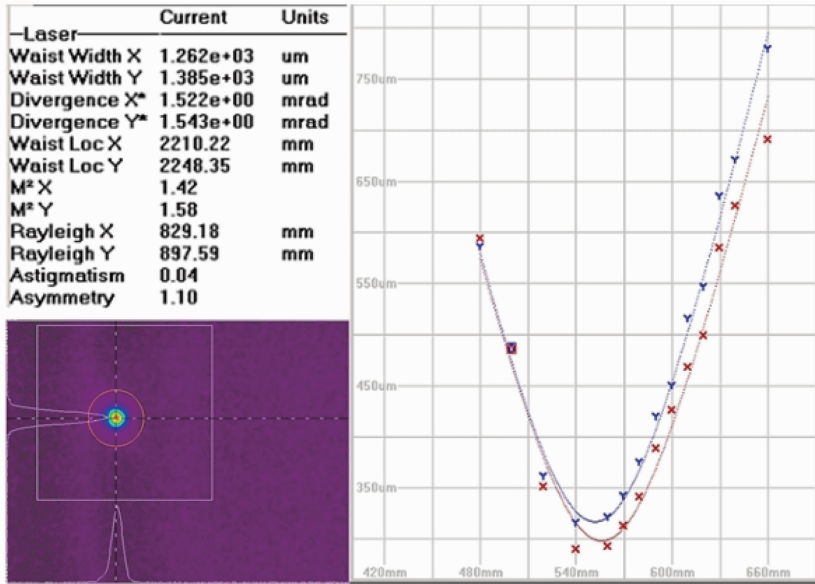


图7 输出脉冲光束质量

Fig. 7 Beam quality of the output pulse

生大的激光模体积,以此来降低镀膜元件上的峰值强度,是切实可行的方案。因此我们使用 LASCAD 软件进行了腔型的优化设计,以保证 SESAM 上的光斑足够大。

根据文献[11]对倒空率影响因素的分析,倒空率影响因素包括普克尔盒所加高压和重复频率。

普克尔盒上所加高压直接影响腔内振荡光的偏振态,通过调节电压可以调节消光比和倒空率。对 BBO 晶体,电压从 1000 V 到 6000 V 连续调节,在 4800 V 左右获得了最好的输出效果,根据理论分析,Nd:YVO₄ 晶体(荧光寿命 100 μs)在重复频率不大于 10 kHz 时能够实现 100% 倒空率,如图 8 所示,图中“Stable CWML”表示稳定的连续锁模阶段,当发生腔倒空时,腔内锁模脉冲倒出,腔内稳定连续锁模遭到破坏,进入非稳定锁模状态“Unstable CWML”,经过一段时间后恢复稳定连续锁模运转,为下一次腔倒空做准备。在

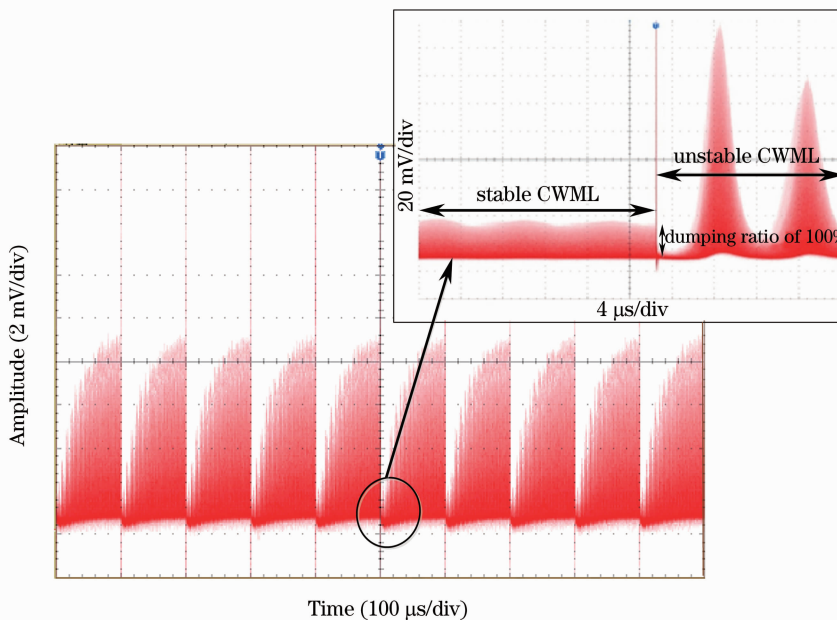


图8 BBO 普克尔盒加 4800 V 电压时示波器监测的倒空率情况

Fig. 8 Dumping ratio for 4800 V voltage applied on BBO Pockels cell

实验中将抽运功率降低,发现倒空率降低,同时降低重复频率则可以恢复 100% 倒空,说明抽运强度对腔内恢复稳定锁模的时间有影响,在高重复频率时可以通过增加抽运功率来提高倒空率。

4 结 论

在国内外腔倒空锁模皮秒激光器研究的基础上,通过优化腔型设计,完成了对 Nd:YVO₄ 晶体端面抽运,SESAM 锁模,重复频率 1 Hz~10 kHz 连续可调的电光腔倒空锁模激光器的实验研究。在抽运功率 17.9 W 时获得了较高的连续锁模功率输出,腔倒空获得单脉冲能量 12.5 μJ、重复频率 10 kHz、脉冲宽度 24.7 ps 的脉冲输出。实验中得到了 BBO 晶体普克尔盒所加高压的最佳值和脉冲延时的最佳值。该系统在连续 8 h 实验下,腔倒空脉冲波形稳定,输出功率无明显降低。相信采用上述实验方案,通过提高抽运功率、改善增益介质以及模式匹配,可以获得更大的输出功率和单脉冲能量。进一步通过使用更高重复频率的电光驱动电源和改进设计,有望与国际相关领域的研究成果接轨。

参 考 文 献

- 1 J Meier, U Wegner, M J Lederer. Cavity-dumped picosecond mode-locked Nd:YVO₄ laser for micro-machining applications [C]. OSA ASSP, 2010. AWB17.
- 2 D A Clubley, A S Bell, G Friel. High average power Nd:YVO₄ based picosecond regenerative amplifier [C]. SPIE, 2008, 6871; 68711D.
- 3 V Kubecek, M Jelinek, M Cech, *et al.*. 0.4 mJ quasi-continuously pumped picosecond Nd:GdVO₄ laser with selectable pulse duration [J]. Laser Phys Lett, 2010, 7(2): 130–134.
- 4 V Z Kolev, M J Lederer, B Luther-Davies, *et al.*. Passive mode locking of a Nd:YVO₄ laser with an extra-long optical resonator [J]. Opt Lett, 2003, 28(14): 1275–1277.
- 5 D N Papadopoulos, S Forget, M Delaigue, *et al.*. Passively mode-locked diode-pumped Nd:YVO₄ oscillator operating at an ultralow repetition rate [J]. Opt Lett, 2003, 28(19): 1838–1840.
- 6 Alexander Killi, Uwe Morgner. Solitary pulse shaping dynamics in cavity-dumped laser oscillators [J]. Opt Express, 2004, 12(5): 3397–3407.
- 7 M Glotz, H-J Eichler. Cavity dumping of a mode-locked pulsed Nd:YAG laser [J]. J Phys E: Sci Instrum, 1987, 20(12): 1493–1496.
- 8 A Killi, J Döring, U. Morgner. High speed electro-optical cavity dumping of mode-locked laser oscillator [C]. OSA ASSP, 2005. MF6.
- 9 U Wegner, J Meier, M J Lederer. Compact picosecond mode-locked and cavity-dumped Nd:YVO₄ laser [J]. Opt Express, 2009, 17(25): 23098–23103.
- 10 Zhang Bingyuan, Li Gang, Chen Meng, *et al.*. Electro optically cavity-dumped laser-diode pumped mode-locked Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(3): 356–358.
张丙元, 李 港, 陈 檬, 等. 电光腔倒空激光二极管抽运 Nd:YAG 锁模激光器[J]. 光学学报, 2005, 25(3): 356–358.
- 11 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang, *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0314002.
付 洁, 庞庆生, 常 亮, 等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0314002.