

网络预出版：

标题：高峰值功率窄脉宽单纵模脉冲激光器的实验研究

作者：张宽收,赵鑫,李渊骥,冯晋霞

收稿日期：2017-01-22

录用日期：2017-02-17

DOI：10.3788/cjl201744.0501006

引用格式：

张宽收,赵鑫,李渊骥,冯晋霞. 高峰值功率窄脉宽单纵模脉冲激光器的实验研究[J]. 中国激光,2017,44(05):0501006.

网络预出版文章内容与正式出版的有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

高重复频率宽光谱皮秒脉冲全光纤掺镱激光器

李平雪 王晓晓 苏宁 苏盟 邵月 肖坤 刘建国
北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124
中国激光,2017,44(2):0201017

复合调制掺Yb³⁺兆瓦级光纤激光系统

金亮 李四川 赵鑫 李洋 张贺 徐英添 徐莉 邹永刚 徐成阳 何广龙 马晓辉
长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022
中国激光,2017,44(2):0201016

掺钕双包层大模场保偏光子晶体光纤激光器

张峰 张海鹏 陈涛 宋朋 周城
济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022
中国激光,2017,44(2):0201020

高功率光纤激光抽运耦合技术综述

肖起榕 张大勇 王泽晖 黄昱升 张利明 李丹 闫平 巩马理
清华大学精密仪器系, 北京 100084
中国激光,2017,44(2):0201008

高功率超短脉冲掺铈光纤激光器的研究进展

刘江 谭方舟 刘晨 王璞
北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124
中国激光,2017,44(2):0201003

高峰值功率窄脉宽单纵模脉冲激光器的实验研究

赵鑫¹ 李渊骥^{1,2} 冯晋霞^{1,2} 张宽收^{1,2*}

¹量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006

²极端光学协同创新中心, 山西大学, 山西 太原 030006

摘要 报道了一种基于电光腔倒空技术的全固态 Nd:YVO₄ 单纵模脉冲激光器。通过精确控制 RTP 普克尔盒的温度, 降低了由于普克尔盒中 2 块 RTP 晶体对泵浦、振荡激光能量的不均匀吸收导致的热退偏, 提高了普克尔盒的偏振消光比。通过优化普克尔盒开关驱动源的下降沿时间, 解决了下降沿时间过长导致的脉宽展宽及输出功率降低等问题。在泵浦占空比为 50%、泵浦峰值功率为 16.9 W、重复频率为 200 Hz 条件下, 实验获得了脉宽为 2.85 ns、峰值功率为 1 MW 的单纵模 1.064 μm 脉冲激光。50 ms 内输出激光的峰值功率稳定性优于±1.8%, 连续记录的 1300 发脉冲的脉冲上升沿时间抖动优于±0.2 ns。

关键词 激光器; 单纵模脉冲激光; 电光腔倒空; 高峰值功率; 窄脉宽

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

High-Peak-Power Narrow-Pulse-Width Single-Longitudinal-Mode Pulse Laser

Zhao Xin¹ Li Yuanji^{1,2} Feng Jinxia^{1,2} Zhang Kuanshou^{1,2}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics,
Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A kind of all-solid-state single-longitudinal-mode Nd:YVO₄ pulse laser based on electro-optical cavity-dumping technology was designed and fabricated. The thermal depolarization originated from the nonuniform pump and laser absorption of the two RTP crystals was reduced via precise temperature control of the pockels cell, and the polarization extinction ratio of the pockels cell was consequently improved. By optimizing the fall time of the pockels cell driver, the problems such as pulse width broadening and power dropping due to the too long time of falling edge were all overcome. At the pump duty cycle of 50%, the incident peak pump power of 16.9 W and the repetition rate of 200 Hz, single-longitudinal-mode pulse laser with pulse width of 2.85 ns, peak power of 1 MW was obtained. The measured peak power fluctuation of output pulse was less than ±1.8% during a given time of 50 ms, and the time jitter of pulse rising edge was less than ±0.2 ns during 1300 shots.

Keyword laser; single-longitudinal-mode pulse laser; electro-optical cavity-dumping; high peak power; narrow pulse width

收稿日期: 年-月-日; 收到修改稿日期: 年-月-日

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0301401), 国家自然科学基金青年科学基金项目(11204167, 61405109), 山西省高等学校科技创新项目(2015102)

作者简介: 赵鑫(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事激光技术研究。E-mail: zhaoxin241210@163.com

导师简介: 张宽收(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事量子光学与激光技术研究。

E-mail: kuanhsou@sxu.edu.cn (通信联系人)

1 引言

稳定输出的高功率窄脉宽脉冲激光器在激光微加工、激光医学和高分辨激光雷达等领域有着广泛的应用^[1-5]。特别是在金属薄膜-陶瓷复合材料的微加工领域，材料的刻蚀深度、重凝层厚度、刻蚀表面粗糙度等均依赖于激光的脉冲宽度和峰值功率密度。一方面，当峰值功率密度一定时，激光脉宽越窄，则刻蚀精度越高、重凝层厚度越薄、表面平整度越好；另一方面，激光的峰值功率密度必须高于所加工材料的刻蚀阈值，功率密度越高，材料熔化、气化的速度越快^[6,7]。研究表明，当激光脉冲宽度为 4 ns、峰值功率为 0.035 MW、聚焦光束半径为 10 μm 时，对 SiC/AA2024 复合材料的刻蚀加工具有较好的效果，刻蚀表面的重凝层厚度接近于 0，表面粗糙度约为 6.8 μm ^[6]。为了进一步提高对这类材料刻蚀加工的精度，并将该技术应用到刻蚀阈值更高的复合材料中，就需要进一步研制出脉冲宽度更窄、峰值功率更高的输出稳定的脉冲激光光源。

目前，获得 ns 量级脉冲宽度、MW 量级峰值功率脉冲激光的主要技术有电光调 Q、可饱和吸收体被动调 Q 以及电光腔倒空等。其中，被动调 Q 激光器的脉冲功率起伏和时间抖动通常都比较差^[8,9]，无法达到高精度无损刻蚀加工应用的需求。电光调 Q 和电光腔倒空激光器均具有主动可控、运转稳定的优点。然而与调 Q 激光不同的是，腔倒空激光的产生过程中，振荡和输出是分开进行的，因此激光的脉宽与增益和重复频率基本无关。腔倒空激光更易于在高重频下实现窄脉宽的脉冲输出，还可以在不影响激光脉宽的前提下通过增大泵浦光与振荡激光的模体体积来提高输出激光的峰值功率^[10]。2006 年，L. McDonagh 等人报道了基于 BBO 普克尔盒的 Nd:YVO₄ 电光腔倒空激光器。为了改善激光晶体热效应，提高激光峰值功率，一方面通过采用 888 nm 激光二极管直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体，使得泵浦光能量沿谐振腔光轴方向被增益介质较为均匀地吸收；另一方面则通过采用“Z”形非稳腔设计实现了较大的振荡激光模体体积。基于上述措施，该研究组在重复频率为 30 kHz 时，获得了脉宽为 6 ns，峰值功率为 0.26 MW 的 1064 nm 脉冲激光^[10]。2012 年，Y. F. Ma 等人报道了基于 LiNbO₃ 普克尔盒的闪光灯泵浦 Nd:YAG 腔倒空激光器，通过设计热不灵敏腔，在泵浦能量为 8.1 J 时获得了重复频率为 10 Hz，脉宽为 6.0 \pm 0.1 ns，峰值功率为 6.7 MW 的脉冲激光^[11]。2014 年，Y. F. Ma 等人采用 YVO₄-Nd:GdVO₄ 复合晶体改善晶体热效应，基于 RTP 普克尔盒获得了重复频率为 100 kHz，脉宽为 3.8 \pm 0.3 ns，峰值功率为 0.034 MW 的脉冲激光^[12]。

本文针对基于 RTP 普克尔盒的激光二极管端面泵浦 Nd:YVO₄ 电光腔倒空激光器，从优化普克尔盒的偏振消光比、下降沿时间以及注入泵浦能量三个方面进行了压窄激光脉冲宽度、提高激光峰值功率的实验研究，获得了重复频率为 200 Hz、脉冲宽度为 2.85 ns、峰值功率为 1 MW 的稳定运转单纵模脉冲激光。

2 实验装置

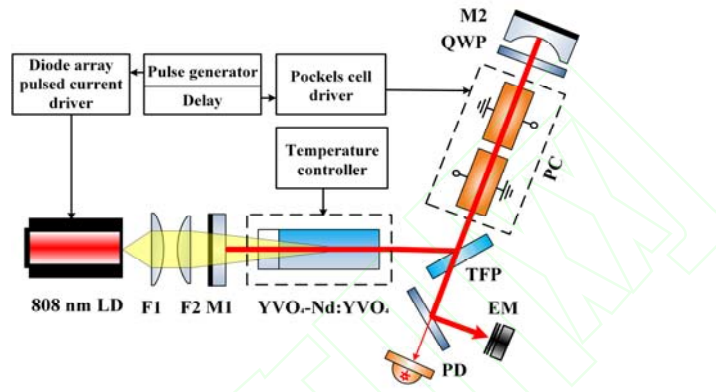


图 1 Nd:YVO₄ 电光腔倒空脉冲激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of electro-optical cavity-dumped Nd:YVO₄ laser

如图 1 所示为电光腔倒空 Nd:YVO₄ 激光器的实验装置图。其中泵浦源采用光纤耦合输出的激光二极管 (LD, Coherent 公司, Model: V10862), LD 的中心波长为 808 nm, 最大输出功率为 30 W, 光纤芯径为 800 μm 。为了减小激光晶体的热负载, LD 通过可调制电流源驱动实现准连续运转, 电流源的重复频率设置为 200 Hz。激光晶体采用沿 a 轴切割、Nd 离子掺杂浓度为 0.5 at.% 的单端键合 YVO₄-Nd:YVO₄ 晶体。晶体的尺寸为 $3 \times 3 \times (2+6) \text{ mm}^3$, 两个通光端面均镀有 808 nm 和 1064 nm 的减反膜 ($R@1064\text{nm} < 0.3\%$; $R@808\text{nm} < 2\%$)。为了提高激光运转的能量稳定性, 实验中采用铝箔包裹激光晶体并将其放置在紫铜水冷热沉中, 通过使用高精度恒温控温仪 (Model: YG-3D, 控温精度 $\pm 0.01^\circ\text{C}$) 将晶体的温度精确控制在 15°C 。谐振腔采用三镜“V”形腔结构。其中输入镜 M1 为平面镜, 镀有 $R@1064\text{nm} > 99.8\%$, $T@808\text{nm} > 95\%$ 的双色膜; 腔镜 M2 为曲率半径 $r=1000 \text{ mm}$, 镀膜参数为 $\text{HR}@1064\text{nm}$ ($R@1064\text{nm} > 99.8\%$) 的平凹镜; 输出镜采用布氏角放置的薄膜偏振片 (TFP), 其偏振消光比 $T_p:T_s > 1000:1$ (T_p 为 p 偏振光的透射率, $T_p > 99\%$ 。 T_s 为 s 偏振光的透射率, $T_s < 0.1\%$)。M1 与 Nd:YVO₄ 晶体前端面之间的腔长为 10 mm, Nd:YVO₄ 晶体后端面与 M2 之间的腔长为 95 mm。根据 ABCD 矩阵理论, 当晶体的热透镜焦距在 150~450 mm 之间变化时, 谐振腔的腔模腰斑约为 250~260 μm 。实验中通过选择放大倍数为 4:3 的望远镜系统 (F1 和 F2) 对泵浦

光进行准直聚焦，实现振荡激光与泵浦光之间的模式匹配。

为实现腔倒空运转，在谐振腔内 TFP 与 M2 之间插入普克尔盒 (PC) 以及 $\lambda/4$ 波片 (QWP)。其中波片的光轴与腔内振荡激光的偏振方向成 45° 夹角。普克尔盒由 2 块正交放置的全同 RTP 晶体构成，其 $1/4$ 波电压为 750 V，分别由 LEYSOP 公司定制的和自己设计研制的高压驱动源驱动。腔倒空输出的脉冲激光由分束器分为两束，其中主激光束注入能量计 (EM, Newport 公司, Model: 1935-C) 测量激光单脉冲能量，小部分激光注入快速响应探测器 (PD, Thorlabs 公司, Model: DET-10A) 探测并通过示波器 (Tektronix 公司, Model: DPO7254) 记录脉冲激光的波形。根据测得的单脉冲能量和脉冲宽度，计算出输出脉冲激光的峰值功率。

3 实验结果

根据 D. B. Coyle 等人的理论分析^[13]，在确定腔长条件下，影响腔倒空激光脉冲宽度的主要因素是普克尔盒的性能。为了将激光脉宽压窄至小于 3 ns，我们针对普克尔盒的动态消光比和下降沿时间进行了实验优化。

相比于 BBO、KTP 等电光晶体，RTP 晶体的电光系数更大，半波电压更低，因此对高压驱动源的性能要求较低。由于 RTP 晶体存在较强的自然双折射，因此在我们的实验中使用由 2 块正交放置的全同 RTP 晶体构成的普克尔盒，对其自然双折射予以补偿。而由于 RTP 晶体的热光系数较大^[14]，且前后 2 块晶体吸收的振荡激光和泵浦光能量不同，因此在高泵浦强度条件下会产生热退偏效应，导致普克尔盒的动态消光比变差，开关性能降低。考虑到热退偏源于 2 块晶体温度不一致导致的相位差，我们对普克尔盒进行了精密控温。图 2 所示为重复频率为 200 Hz，泵浦占空比为 25%，泵浦峰值功率为 13.8 W 的条件下，RTP 晶体未控温和控温温度为 15°C 时测得的脉冲波形图。可以看到，未对 RTP 晶体进行控温时，热退偏效应较为严重，普克尔盒的关断时间延长，脉冲下降沿出现台阶和拖尾现象，脉冲波形的半高全宽为 7.6 ns。当将 RTP 晶体控温在 15°C 时，热退偏效应得到了较好的改善，波形的下降沿变得陡峭，测得激光的脉冲宽度为 4.8 ns。

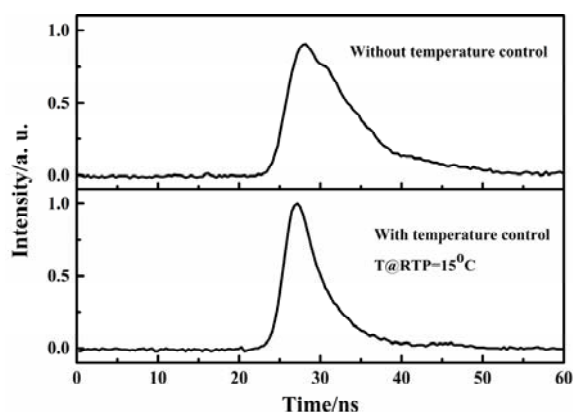


图 2 不同的 RTP 晶体控温状态下，腔倒空激光的脉冲波形图

Fig.2 Oscilloscope traces of cavity dumped laser pulses at different states of RTP crystal temperature

在上述实验中，普克尔盒由 LEYSOP 公司定制的高压驱动源驱动。当驱动源工作在重复频率 200 Hz、峰值电压 1.4 kV、脉冲持续时间 200 ns 时，s 偏振连续波 1064 nm 激光单次通过普克尔盒与薄膜偏振片之后的透射信号波形如图 3(a)所示，透射信号的下降沿时间为 26.5 ns。为提高普克尔盒的工作性能、降低透射信号的下降沿时间，进一步压窄激光脉宽、提高输出峰值功率，我们设计研制了一台高重频高压普克尔盒驱动源。驱动源由 3 组以“Marx”结构排列的雪崩晶体管电路构成。其中每组电路中均级联 6 个 FMMT417 晶体管（Zetex 公司，基极-集电极击穿电压大于 320 V），并采用分压电路使每个晶体管承受的电压相同。各组之间通过去耦电容连接。驱动源的供电电源采用 EKSMA 公司生产的 HV40WM 直流高压模块，该模块的输出电压 0.6-1.6kV 可调，最大输出功率为 40W。触发信号则由隔离变压器耦合输入。图 3(b)是采用自制的驱动源驱动普克尔盒实验测得的透射信号波形，下降沿时间仅为 3.8 ns。

图 4 是分别使用由 LEYSOP 公司定制的和自己研制的高压驱动源驱动普克尔盒，脉冲激光器输出激光脉冲宽度与峰值功率随泵浦峰值功率的变化关系。当使用 LEYSOP 公司定制的高压驱动源驱动普克尔盒时，激光脉冲宽度随泵浦峰值功率变化较大。当泵浦峰值功率为 16.9 W 时，激光脉冲宽度为 4.8 ns，最大输出峰值功率为 0.19 MW。当使用自己研制的高压驱动源驱动普克尔盒时，脉宽随泵浦峰值功率变化的幅度明显减小。当泵浦峰值功率为 16.9 W 时，激光脉冲宽度为 2.8 ns，最大输出峰值功率为 0.79 MW。由于普克尔盒的开关时间大幅度减小，内腔激光在更短的下落沿时间内被倒空，激光光子在腔内往返振荡次数减少。因此腔镜不完全透射、内腔元件吸收等因素导致的内腔损耗显著降低，激光脉宽得到进一步压窄、峰值功率也得到显著提高。

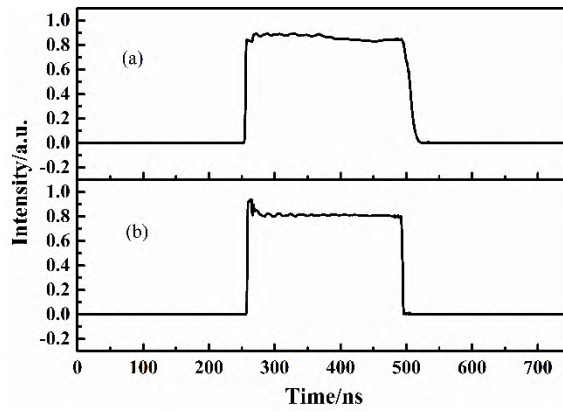


图3 采用 LEYSOP 驱动源 (a) 和自制驱动源 (b) 驱动普克尔盒时的透射信号波形图
 Fig.3 Oscilloscope traces of transmitted signals using LEYSOP driver (a) and home-made driver (b)

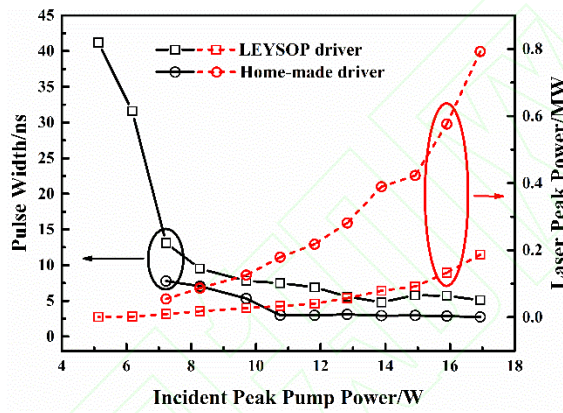


图4 使用不同普克尔盒驱动源时，激光脉冲宽度和峰值功率随泵浦峰值功率的变化关系
 Fig.4 Pulse width and laser peak power as functions of peak pump power using different pockels cell drivers

考虑到在采用准连续泵浦、复合晶体及自制的普克尔盒驱动源等措施之后，注入泵浦峰值功率的变化对腔倒空激光的脉宽影响较小（如图4所示），我们通过增加泵浦占空比的方式进一步提高脉冲激光的峰值功率，使之达到 MW 水平。当泵浦占空比分别为 25%和 50% 时，脉冲激光的输出特性如图5所示。当泵浦峰值功率为 16.9 W、占空比为 50%、重复频率为 200 Hz 时，实测的输出激光脉宽为 2.85 ns，峰值功率为 1MW。由于晶体热效应导致的模式匹配比率的变化，泵浦占空比为 50%时的脉宽比占空比为 25%时略高，但脉冲激光的峰值功率得到进一步提高。

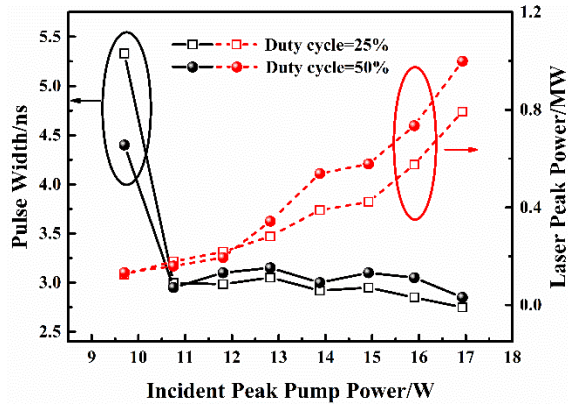


图 5 不同占空比下，激光脉冲宽度 (a) 与峰值功率 (b) 随泵浦峰值功率的变化关系

Fig.5 Pulse width (a) and laser peak power (b) as functions of peak pump power under different duty cycles

图 6 为激光器工作在重复频率 200 Hz、脉宽 2.85 ns、峰值功率 1 MW 状态时测得的脉冲波形图和脉冲序列图。由图 6 可以看出，激光脉冲平滑无调制；50 ms 内的输出激光峰值功率稳定性优于 $\pm 1.8\%$ 。我们利用 F-P 标准具多光束干涉法测得的输出脉冲激光的纵模特性。F-P 标准具（熔融石英）的厚度为 25 mm，两个端面镀膜为 $R@1064\text{nm}=70\%\pm 1\%$ 。F-P 标准具透射光用 CCD（Spricon 公司，Model: GRAS-20S4M-C）记录，如图 7 所示。可以看到，干涉图样为清晰的单套环状条纹。根据 F-P 标准具的参数可以计算出其线宽分辨率为 680 MHz，根据激光器的参数可计算出其纵模间隔为 2 GHz，因此可以判定激光为单纵模运转。连续记录 1000 次透射光束的干涉图样，观测到的激光单纵模几率约为 100%。图 8 为 6.5 s 内采用数字示波器连续记录的 1300 发脉冲的叠加波形。从图中可以看出，脉冲建立时间相对于整个系统的时间抖动小于 ± 0.2 ns。采用光束质量分析仪 (Spricon 公司，Model: M2-200-BB; CCD: GRAS-20S4M-C) 测量输出激光的光束质量因子， $M^2_x=1.26$ ， $M^2_y=1.18$ 。

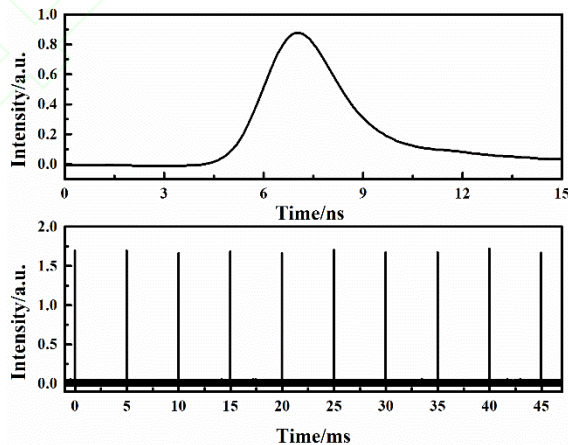


图 6 脉冲激光器输出脉冲激光的波形图和序列图

Fig.6 Oscilloscope traces of single pulse and pulse train

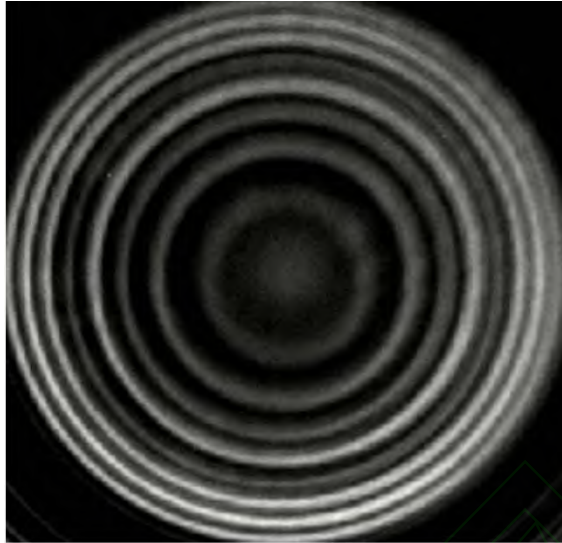


图 7 F-P 标准具干涉图

Fig.7 Interference fringes measured by F-P etalon

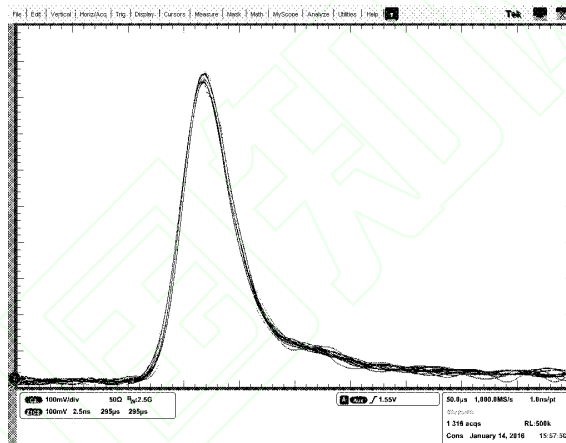


图 8 连续记录的 1300 发激光脉冲的叠加波形图

Fig.8 Oscilloscope traces superposition of laser pulses during 1300 shots

4 结论

采用退压式电光腔倒空技术进行了窄脉宽高功率单纵模脉冲激光器的研究。通过对普克尔盒进行精密控温，解决了高泵浦强度下、由于双 RTP 晶体热退偏效应导致的普克尔盒消光比降低的问题。通过研制高性能的高重频高压普克尔盒驱动源，压窄了输出脉冲激光的脉宽、提高了峰值功率。进一步通过增大泵浦占空比，实验获得了脉冲宽度为 2.85 ns、峰值功率为 1 MW 的单纵模脉冲激光输出。在 50 ms 测量时间内，输出激光峰值功率稳定性优于 $\pm 1.8\%$ ；在 6.5 s 的数据采集时间内，连续记录的 1300 发脉冲的脉冲建立时间相对于整个系统的时间抖动小于 $\pm 0.2\text{ns}$ ，激光单纵模几率约为 100%。

参考文献

- (1) 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.
- (2) Hellman A N, Rau K R, Yoon H H, et al. Biophysical response to pulsed laser microbeam-induced cell lysis and molecular delivery[J]. *Journal of Biophotonics*, 2008, 1(1): 24-35.
- (3) Sakaizawa D, Nagasawa C, Nagai T, et al. Development of a 1.6 μm differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO_2 profile[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): 748-757.
- (4) Li Y J, Zhao X, Feng J X, et al. Stable all-solid-state single-longitudinal-mode pulse laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 061411.

李渊骥, 赵鑫, 冯晋霞, 等. 稳定输出的全固态单纵模脉冲激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53: 061411.
- (5) Kou T, Wang H Y, Wang F, et al. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 414001.

寇添, 王海晏, 王芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 414001.
- (6) Zhang H Z, Huang T, Xiao R S. Parameter study of nanosecond pulsed fibre laser ablation of SiCp/Al composite[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(1): 0102017.

张寰臻, 黄婷, 肖荣诗. SiCp/Al 复合材料纳秒脉冲光纤激光刻蚀工艺[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102017.
- (7) Yang J P, Chen X K, Wu G, et al. Mechanism of nano-second laser ablation of metallic thin film on composite material[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 256-260.

杨建平, 陈学康, 吴敢, 等. 纳秒激光刻蚀复合材料基金属薄膜机制研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 256-260.
- (8) Cho C Y, Cheng H P, Chang Y C, et al. An energy adjustable linearly polarized passively Q-switched bulk laser with a wedged diffusion-bonded Nd:YAG/Cr³⁺:YAG crystal[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 8162-8169.
- (9) Han S, Liu Y Q, Zhang F, et al. Sub-nanosecond passively Q-switched Nd:YVO₄/Cr³⁺:YAG microchip lasers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 68: 197-200.
- (10) McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3303-3305.
- (11) Ma Y F, Zhang J W, Li H, et al. High stable electro-optical cavity-dumped Nd:YAG laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8): 561-563.
- (12) Ma Y F, Li X D, Yu X, et al. High-repetition-rate and short-pulse-width electro-optical cavity-dumped YVO₄/Nd:GdVO₄ laser[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3081-3084.
- (13) Coyle D B, Guerra D V, Kay R B. An interactive numerical model of diode-pumped, Q-switched/cavity-dumped lasers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, 28(3): 452-462.
- (14) Mikami T, Okamoto T, Kato K. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for RbTiOPO₄[J]. *Optical Materials*, 2009, 31:1628-1630.