

脉冲式半导体激光器端面抽运主振荡-功率放大器及腔外倍频系统

王小发^{1,2,3} 樊仲维^{1,3} 余锦¹ 石朝辉³ 黄科^{1,2,3} 黄玉涛^{1,2,3} 连富强^{1,2,3}

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

摘要 利用脉冲式半导体激光器(LD)具有高峰值功率的优点,通过对抽运光和基频光的模式进行匹配,构建了一台脉冲式 LD 抽运腔倒空结构的主振荡器和功率放大器,并对其进行了腔外倍频实验。实验结果表明,系统实现了非常紧凑的结构,脉冲式 LD 抽运的方式能够提高振荡器和功率放大级的能量输出,更好地消除热畸变的影响,从振荡器可以获得脉冲宽度达 3.7 ns、脉冲能量约为 4 mJ 的基频激光脉冲输出,经功率放大和腔外倍频后,能够得到脉宽 3.4 ns、脉冲能量为 3.2 mJ 的绿光输出,倍频效率为 40%,脉冲峰值稳定性为 5%(均方根值),发散角约为 0.5 mrad。

关键词 激光器;脉冲式 LD 抽运源,全固态腔倒空激光器,主振荡-功率放大器,腔外倍频

中图分类号 O437.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.111404

Pulsed Semiconductor Laser End-Pumped Master Oscillator Power Amplifier and External-Cavity Frequency Doubling System

Wang Xiaofa^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Yu Jin¹ Shi Zhaohui³ Huang Ke^{1,2,3}

Huang Yutao^{1,2,3} Lian Fuqiang^{1,2,3}

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

Abstract By using the advantage of pulsed semiconductor lasers with high peak power, a pulsed LD-pumped cavity-dumped oscillator and power amplifier is built, and the pump light and signal light of the system are matched. In addition, external cavity second harmonic experiments are also carried out. The results show that, the pulsed LD pumping system has a very compact structure, it can increase the energy output in oscillator and amplification stage oscillator, and can better eliminate thermal distortion effects. Pulse width of 3.7 ns and laser pulse energy of 4 mJ can be obtained in the stage of the oscillator. Through the power amplifier and the second harmonic generation (SHG), the second harmonic light with the pulse width of 3.4 ns, pulse energy of 3.2 mJ, SHG efficiency of 40%, pulse peak stability of 5% (root mean square) and divergence angle of 0.5 mrad is obtained.

Key words lasers; pulsed LD-pumped source; all solid-state cavity-dumped laser; master oscillator power amplifier; external-cavity frequency doubling

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3580

1 引言

激光器腔倒空技术是指利用快速光开关,使能量以光场的形式在激光器谐振腔内积聚,再利用快速光开关使激光腔的耦合输出由 0 变化到 100%,把能量瞬间倒出,从而实现高能量、窄脉宽的激光输出技术^[1~8]。

收稿日期: 2011-06-28; 收到修改稿日期: 2011-07-19; 网络出版日期: 2011-10-11

基金项目: 国家 863 计划(2009AA034701),北京海淀区重大科技成果转化和产业化项目和中国科学院自主创新项目(2009AOE002)资助课题。

作者简介: 王小发(1979—),男,博士研究生,主要从事工业激光器方面的研究。E-mail: bluebaby0614@126.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

该技术已经在工业激光器、光通信、超快激光^[8~10]、再生腔^[11]等领域得到广泛应用。

半导体激光器(LD)作为抽运源,因其与传统灯抽运相比具有结构紧凑、寿命长、能量转换效率高、易于热管理等优势,被广泛使用在主振荡-功率放大器(MOPA)中^[12~15]。连续或准连续的半导体激光器已经在中小功率的工业激光器中得到了广泛应用;脉冲式半导体激光器虽然已经有了成型的产品,但是其作为抽运源在全固态腔倒空激光器和主振荡-功率放大系统中还未多见,腔倒空形式的 MOPA 系统与其他形式的 MOPA 系统相比,具有输出能量高、脉宽窄、易于以低重复频率工作、结构紧凑等优点,具有广泛的实用价值。基于此,本文利用脉冲式 LD 作为抽运源,搭建了一台 MOPA 实验装置,主振荡级和放大级都采用脉冲式 LD 端面抽运的方案,两抽运模块的时序信号是同步的,利用 MOPA 装置能够实现以紧凑结构放大基频光脉冲能量的目的。此外,还对放大后的脉冲进行了腔外倍频实验,获得了满意的倍频效果,有望将此系统制成成型产品应用到液晶修复技术中。

2 实验装置

图 1 给出了脉冲式 LD 抽运 MOPA 及腔外倍频系统的简图。其中,LD 为自制的脉冲式半导体激光器模块,热电制冷(TEC),温度控制在约 25 °C。使用内径为 400 μm 的传输光纤;M1 和 M2 构成抽运光的耦合头,放大倍数为 2;M3(808 nm 减反,1064 nm 高反)为一端镜;增益介质均为掺杂质量分数为 0.5% 的 Nd:YAG,尺寸为 3 mm×3 mm×15 mm。TFP1 和 TFP2 为以布儒斯特角放置的薄膜偏振片,WP 为 1/4 波片,KD*P 泡克耳斯盒为德国 LINOS PHOTONICS 公司生产,横向加压,晶体长 25 mm,直径为 8 mm,1/4 波电压为 3.4 kV,表面膜层的破坏阈值为 4000 MW/cm²。M4(1064 nm 高反)为另一端镜,TFP2 作为振荡器的输出镜,M5 为 45°双色镜(808 nm 减反,1064 nm 高反),M6 为 45°反射镜(1064 nm 高反),倍频晶体为使用 TEC 控温的 I 类相位匹配 LBO 晶体,尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,M7 为 45°双色镜(1064 nm 高反,532 nm 减反)。Dustbin 为“垃圾桶”,用于收集剩余的基频光,振荡器的腔长为 400 mm。图 2 为紧凑设计的实物图。

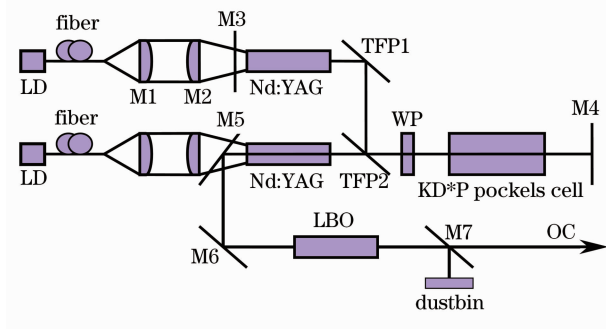


图 1 脉冲式 LD 抽运 MOPA 及腔外倍频系统

Fig. 1 Pulsed LD-pumped MOPA and external-cavity frequency doubling system

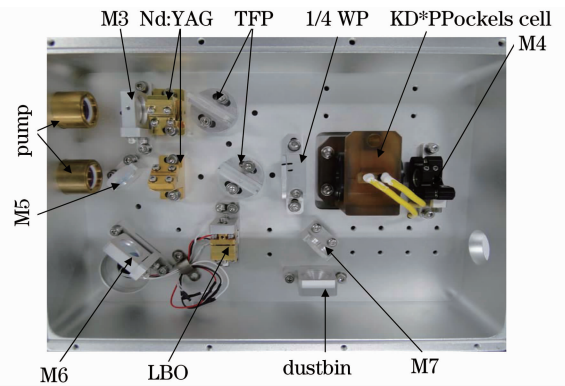


图 2 实验中使用的实物装置

Fig. 2 Physical devices used in experiment

3 实验结果与讨论

3.1 脉冲抽运源

实验中振荡器和放大级所用的抽运源都采用脉冲式半导体激光器,抽运波长为 805.3 nm,抽运周期为 250 μs ,1 Hz 重复频率运行时的占空比为 1:4000,最高运行电流达到 250 A,输出的单脉冲能量最大可达 43.5 mJ,远远高于准连续抽运所能支持的电流范围,且无需制冷。由于耦合头的焦距较短,且抽运能量较高,为了简便起见,直接采用相纸来观测抽运能量的空间分布。图 3(a)为相纸上获得的抽运光光斑图样,中心白色部分为有效光斑,为近超高斯平顶分布,直径为 0.79 mm,比设计的腔模直径 0.76 mm 略大,模式匹配较好,与耦合头 1:2 的设计相符合。图 3(b)为抽运光的波形图,半峰全宽约为 244 μs ,利用脉冲 LD 抽运能够提高抽运光的峰值功率和能量的转换效率、减少热效应导致的不良影响。

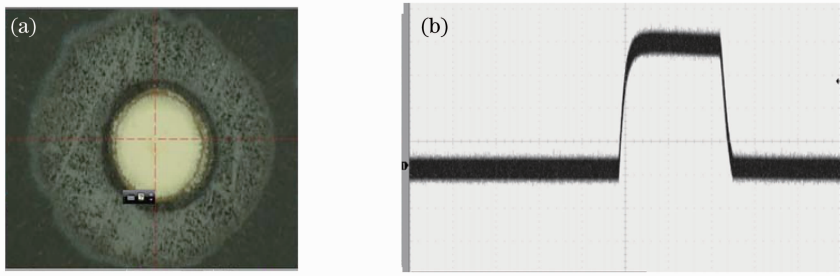


图3 脉冲抽运源的输出特性

Fig. 3 Output characteristics of the pulsed pump source

3.2 MOPA 激光系统

为了获得低重复频率、高能量、窄脉冲宽度的激光脉冲,振荡器采用腔倒空的技术方案。实验中使用KD*P泡克耳斯盒作为倒空器,在腔内使用了双薄膜偏振片结构,在便于调节光路的同时,使反射率较高的垂直方向线偏振光在腔内振荡,减少腔内的损耗。利用自制的泡克耳斯盒退压式电源,通过控制电压波形来实现腔倒空输出。在保证腔内器件不被损坏的前提下,能够获得重复频率为1~30 Hz,脉冲宽度为3.7 ns,脉冲能量为4.0 mJ的基频激光输出。图4给出了腔倒空输出脉冲的基本特性。泡克耳斯盒驱动电源的两个电极电势的变化规律以及激光输出情况如图4(a)所示(所测结果为感应笔测得,并非严格的实际高压波形,但很接近),两个电极开始都处在高电势,其中一电极电势(亮线)直接降为参考值,而另一电极(灰线)会有一阶梯下降,然后持续一段时间(开门时间)之后才降为0,阶梯状产生的原因是由于泡克耳斯盒本身的电容产生了一定的压降,中间脉冲即为输出的激光脉冲。图4(b)为输出激光脉冲相对于抽运脉冲的时序位置,尖峰表示输出的激光脉冲,在一个抽运周期内,抽运时间进行到230 μs 时,KD*P泡克耳斯盒开始工作,随后激光输出。图4(c)为输出的激光单脉冲波形。从图中可以看出,输出波形为典型的腔倒空波形,前沿陡,后沿略缓。图4(d)为输出的激光光斑,从高斯拟合来看,光束空间分布较好。在放大级,尽量使增益介质Nd:YAG晶体靠近振荡器的输出端,调整抽运光和信号光的光斑尺寸,使其在空间上尽量实现模式匹配。当信号光脉冲宽度为3.7 ns、脉冲能量4 mJ时,调节放大级抽运电流为220 A,抽运能量为3.2 mJ,此时获得放大的激光单脉冲能量为8.1 mJ,脉冲宽度变为4.1 ns,放大级单程增益系数约为2.02。

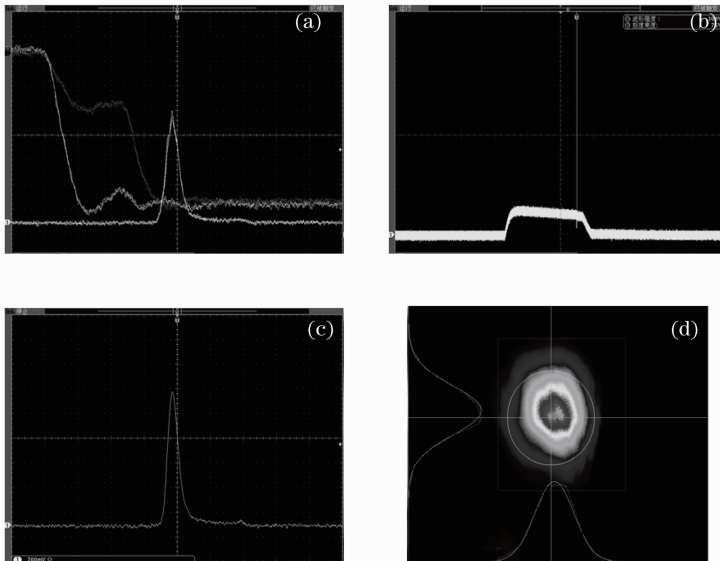


图4 振荡器的输出特性

Fig. 4 Output characteristics of the oscillator

3.3 LBO 腔外倍频及样本加工实验

经过放大后,获得了脉冲宽度为 4.1 ns,单脉冲能量为 8.1 mJ 的基频激光输出。将 I 类相位匹配的 LBO 晶体放在自制的紫铜晶体架中,用 TEC 控制晶体的温度在 $46\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,在未加聚焦透镜的情况下,获得倍频光的脉冲宽度为 3.4 ns,脉冲能量为 3.2 mJ,倍频效率约为 40%。监测了 500 个输出脉冲,发现脉冲的峰值稳定性约为 5%(均方根值),用刀口法测得脉冲的发散角为 0.5 mrad。图 5 给出了绿光的输出波形和光斑形状。从图中可以看出,脉冲的形状较好,后沿的背底基本消失,信噪比较高,在相纸上获得的光斑圆度较好。

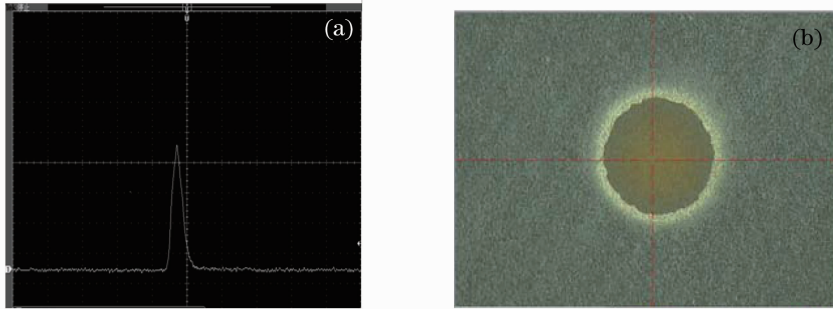


图 5 绿光的输出波形(a)和光斑形状(b)

Fig. 5 Output waveform (a) and beam shape (b) of green light

再利用获得的绿光脉冲进行了液晶样品的轰击实验。实验目的是观察光斑所在的区域中,液晶样品是否被擦干净。图 6 给出了样品的加工结果。图 6(a)和(b)的最小分辨单元都为 $10\text{ }\mu\text{m} \times 37\text{ }\mu\text{m}$,但两图的实际放大尺寸是不同的。在图 6(b)中,聚焦后的光斑直径约为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。图 6(a)为轰击前液晶的情况,存在坏点,但大部分区域良好,而在图 6(b)所示轰击后的情况中,圆圈的范围表示实际光斑的作用范围,从圆圈区域中可以看出,液晶都被破坏掉,达到了定点破坏的作用效果,圈外的区域也遭到了不完全破坏,圈外的不完全破坏会使好的晶区遭受损害,这是需要避免的。在实际加工系统中,通过控制脉冲的能量,同时对光束进行整形,使其成为能量均匀的矩形光斑,并使其尺寸与加工区域匹配,就可以避免外部区域遭受损害,加工的具体问题还有待进一步研究。样品轰击实验说明激光器系统的输出指标可满足液晶修复技术的要求。

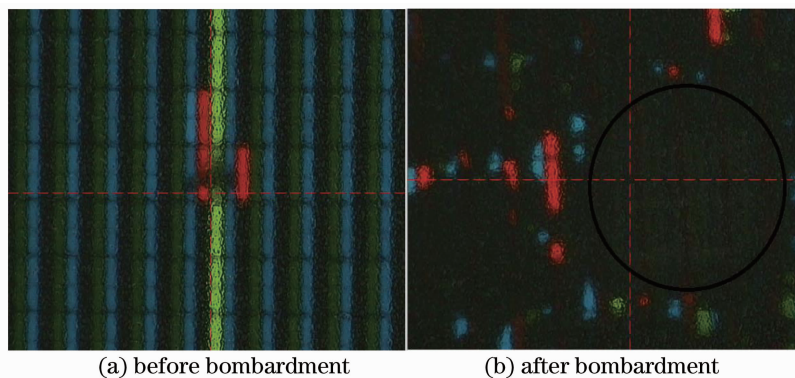


图 6 绿光脉冲对液晶样品的轰击实验

Fig. 6 Green light pulse experiments on the bombardment of liquid crystal samples

4 结 论

利用脉冲式半导体激光器抽运具有高峰值功率的优点,通过对抽运光和基频光的模式进行匹配,构建了一台腔倒空结构的 MOPA 系统,并对放大后的激光脉冲进行了腔外倍频实验。该系统结构紧凑,脉冲式 LD 端面抽运方式能够提高振荡器和功率放大级的输出能量,更好地消除热畸变的影响。从振荡器可以获得脉冲宽度 3.7 ns,脉冲能量约为 4 mJ 的腔倒空脉冲,经功率放大和腔外倍频后,能够得到脉宽达 3.4 ns、

脉冲能量为 3.2 mJ 的绿光输出。利用获得的绿光脉冲对液晶样品进行了轰击实验,获得了满意的效果,可满足液晶修复技术的要求。

参 考 文 献

- Zhou Xibin, Henry Kapteyn, Margaret Murnane. Positive-dispersion cavity-dumped Ti:sapphire laser oscillator and its application to white light generation[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9750~9757
- Feng Chengyong, Fan Zhongwei, Cui Jianfeng *et al.*. Electro optically cavity dumped Nd:YLF lasers with high beam quality and short pulse[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 32~35
冯承勇, 樊仲维, 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
- D. Malim, Rudolph A. Bradbury, A. Hordvik *et al.*. Production of intense sub-nanosecond pulses by cavity dumping[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1974, **QE-10**(1): 20~25
- Zeng Qinyong, Wan Yong, Niu Ruihua *et al.*. Research of laser-diode-pumped high repetition rate cavity dumping Nd:YAG laser[J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(7): 551~554
曾钦勇, 万 勇, 牛瑞华 等. LD 泵浦高重频腔倒空 Nd:YAG 激光输出研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(7): 551~554
- Divid Cheng. Instability of cavity-dumped YAG laser due to time-varying reflections[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(6): 585~588
- R. H. Johnson. Characteristics of acousto-optic cavity dumping in a mode-locked laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(2): 255~257
- L. McDonagh, R. Wallenstein, R. Knappe. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high repetition rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3303~3305
- M. Siegel, A. Guandalini, J. Aus der Au. High repetition rate cavity-dumped Yb:KYW femtosecond oscillator[C]. CLEO, 2010, CTuV₄
- Alan Braun, Liu Xinning, Gerard Mourou *et al.*. Diode-pumped Nd:glass kilohertz regenerative amplifier for sub-picosecond micro-joule level pulses[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18): 4163~4167
- A. K. Sharm, R. A. Joshi, R. K. Patidar *et al.*. A simple highly stable and temporally synchronizable Nd:glass laser oscillator delivering laser pulses of variable pulse duration from sub-nanosecond to few nanoseconds[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(2): 455~460
- H. Liu, J. Nees, G. Mourou *et al.*. Yb:KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(3-6): 315~321
- Liu Lang, Bi Guojiang, Huang Maoquan. Research of single longitudinal mode main oscillator pumped by LD in MOPA system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 527~530
刘 朗, 秘国江, 黄茂全. MOPA 激光系统中 LD 抽运的单纵模主振荡器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 527~530
- Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin *et al.*. 160 W diode-pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1455~1458
唐 淳, 高清松, 童立新 等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1455~1458
- Ma Huijun, Li Xiaoli, Ji Jianghua *et al.*. Investigation on the performance of high repetition laser diode pumped Nd:YAG laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1309~1312
马惠军, 李小莉, 纪江华 等. 高重复率半导体激光抽运 Nd:YAG 放大器激光特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1309~1312
- Wang Weimin, Yao Zhenyu, Pang Yu *et al.*. Study on DPL technology of hectowatt green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(s): 5~7
王卫民, 姚震宇, 庞 毓 等. 百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(s): 5~7