

锁模激光脉冲串放大过程中的整形控制*

唐 军, 丁 磊, 邓青华, 罗亦鸣, 许党朋, 卢振华, 景 峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了获得具有特殊要求的驱动激光,设计了一套以 Nd:YVO₄ 锁模激光器为种子光,用二极管激光器泵浦的 Nd:YAG 放大系统进行放大的激光系统。对放大过程中锁模激光脉冲串因增益饱和造成的脉冲串包络畸变以及对包络的整形控制进行了研究。实验获得能量为 24 mJ 的基频光,5.7 mJ 的倍频光,0.608 mJ 的紫外四倍频光;通过脉冲串整形控制,实现了包络顶部平整的紫外超短脉冲串输出,满足了光阴极注入器对驱动激光的特殊需求。

关键词: 锁模激光; 脉冲串; 放大; 整形

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A

紫外光在生物学、光化学、自由电子学以及生物医学等研究领域都具有很重要的应用价值。近年来,全固态高效率紫外激光装置的研究成为热点之一,取得了很大进展。2000 年 T. Kojima 等人利用 CLBO 频率转换晶体获得了平均功率为 20.5 W 的 4 次谐波激光^[1]。2003 年日本的 H. Kitano 等人利用 ns 级 Nd:YVO₄ 激光器和 CBO 频率转换晶体产生波长为 355 nm、平均功率为 3 W 的紫外光^[2]。也有很多研究者采用不同的激光系统和频率转换晶体实现了紫外激光输出^[3-9]。在自由电子激光研究领域,紫外激光驱动的光阴极注入器作为电子源可以获得高流强高品质的电子束。光阴极注入器对驱动激光的要求是:波长为 266 nm,持续时间为 1~6 μs 的顶部平整的脉冲串,单个脉冲的能量不小于 5 μJ。

针对这种要求,本文设计的驱动激光系统主要包括:Nd:YVO₄ 锁模激光器、二极管激光器(LD)泵浦的 Nd:YAG 放大系统以及频率转换部分。由于 Nd:YAG 的增益高,脉冲串持续时间长(数 μs),放大过程将出现明显的增益饱和效应,实验采用低电压 KTP 电光开关从连续锁模激光脉冲串中截取出包络宽度为数 μs 的脉冲串,并通过控制加在 KTP 电光开关上的电压波形对脉冲串包络进行预整形,补偿激光放大器的增益饱和效应,以输出顶部平整的脉冲串包络。

1 系统结构及原理

根据锁模激光器的输出指标和系统最终的输出要求,放大系统需从连续锁模激光脉冲串中截取出包络宽度 1~6 μs 的脉冲串,以及对脉冲串包络进行整形放大,再进行 4 次谐波转换,获得具有一定能量、脉冲串顶部平整的紫外超短脉冲串。图 1 为实验系统的光路图。系统中注入脉冲串由 Nd:YVO₄ 锁模激光器产生,其重复频率为 54 MHz,波长为 1 064 nm,平均功率为 10 W,单个脉冲的脉冲宽度为 10 ps、能量约为 0.2 μJ。采用

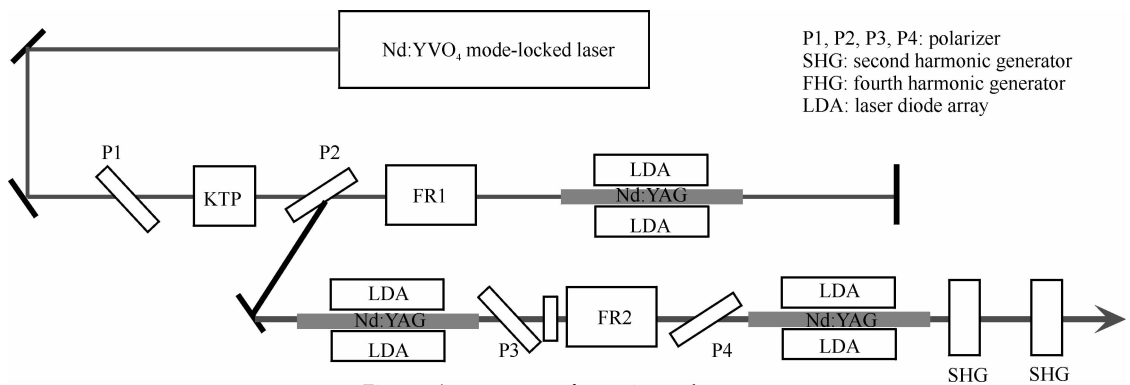


Fig. 1 Arrangement of experimental system

图 1 实验装置示意图

* 收稿日期:2009-04-15; 修订日期:2009-07-17

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:唐 军(1974—),男,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究;tangjun0@tom.com。

低电压 KTP 电光开关从锁模激光器中截取出所需要的持续几 μs 的锁模脉冲串,并通过控制加在电光开关上的电压对脉冲串包络进行预整形,以补偿放大系统的增益饱和和效应。光阴极注入器驱动激光器的放大系统采用 3 台紧密环行 LD 泵浦的 Nd:YAG 棒状放大器作为增益组件,其中 1 台放大器采用双程放大,另外 2 台放大器采用串联单程放大构型对信号光进行放大。采用了 2 台法拉第磁光隔离器以抑制放大系统的自激光振荡以及放大系统与锁模激光器之间的自激振荡。设计了 2 块 I 类匹配 BBO 晶体来完成对放大的脉冲串包络的 4 次谐波转换,以获得较高的 4 次谐波转换效率。

系统采用了自行设计的 Nd:YAG 棒状激光放大器与二极管激光器阵列(LDA)泵浦,结构示意图如图 2 所示。Nd:YAG 棒状激光放大器采用环形 LDA 侧面泵浦耦合结构。其中 Nd:YAG 棒状增益介质的几何尺寸为 $3\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,增益介质棒上的泵浦长度为 10 mm 。每个放大器中有 2 个 LDA,LDA 是将激光巴条封装在半环形的铜热沉上构成的,每个 LDA 的最大峰值功率为 1.25 kW ,工作时 LDA 发光面相对,形成一个圆环,对放置在中心的 Nd:YAG 棒进行侧面泵浦。用一台制冷水箱调控 LDA 的温度,调节 LD 的发射激光波长,使其对准激光介质的吸收峰,并冷却激光棒。

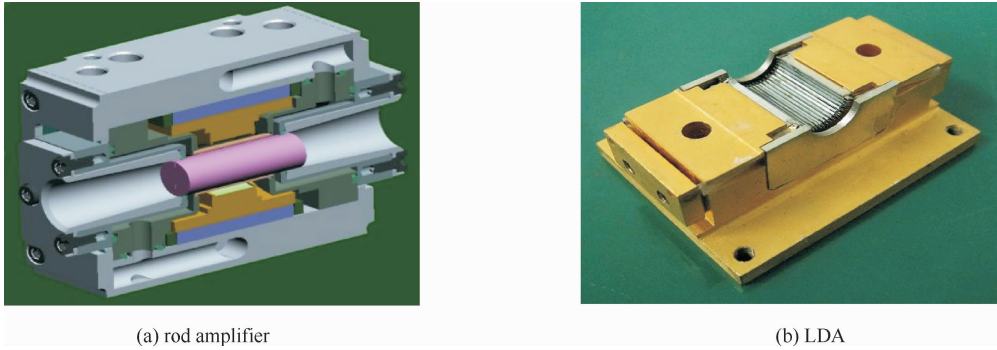


Fig. 2 Schematic illustration of Nd:YAG rod amplifier and LDA

图 2 Nd:YAG 棒状放大器与环形 LDA 示意图

2 实验结果

2.1 输出能量

通过对数 μs 锁模激光脉冲串的整形、放大及 4 次谐波转换技术研究,研制了模块化的光阴极注入器驱动激光器放大系统。

对光阴极注入器驱动激光器放大系统输出的基频光、2 次谐波及 4 次谐波能量进行实验研究。注入脉冲串单脉冲能量为 $0.2\ \mu\text{J}$,经过对脉冲串整形、放大后,系统输出脉冲串基频光能量约为 24.1 mJ , 532 nm 倍频光能量约为 5.7 mJ , 266 nm 四倍频光能量约为 $608\ \mu\text{J}$ 。其中,倍频转换效率为 23.7% ,四倍频约为 10.6% ,系统整体倍频转换效率约为 2.5% 。

2.2 系统的整形能力

实验研究了系统基频光、2 次谐波与 4 次谐波的输出波形。由于脉冲串宽度为数 μs ,而单个脉冲宽度仅为 10 ps ,数字示波器无法测量脉冲的形状与其细致结构。实验采用了模拟示波器测量不同频段脉冲的时间波形,获得了稳定的顶部平整的数 μs 激光脉冲串输出,图 3 为未经整形的基频光脉冲串包,图 4 为放大系统输出的基频光、2 次谐波及 4 次谐波的脉冲串包络波形。由图 3,4 可以看出,如果不加整形,系统无法输出顶部平整的脉冲串包络,整形后的 4 次谐波的脉冲串包络顶部起伏小于 5% 。

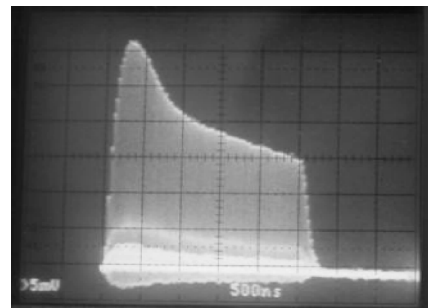


Fig. 3 Pulse sequence envelope of fundamental wave without shaping

图 3 未经过整形放大后基频光脉冲串包络

3 结 论

通过对数 μs 锁模激光脉冲串的整形、放大及 4 次谐波转换技术研究,研制完成了光阴极注入器驱动激光器放大系统模块,获得了稳定的顶部平整的数 μs 紫外超短激光脉冲串输出,并用于自由电子激光研究,满足了用于自由电子激光研究的光阴极注入器系统对激光脉冲的特殊需求。系统的谐波转换效率偏低,分析认为,主要是因为锁模激光器输出的激光脉冲宽度未达到小于 10 ps 的技术指标(实测值约为 16 ps),使得注入谐波转

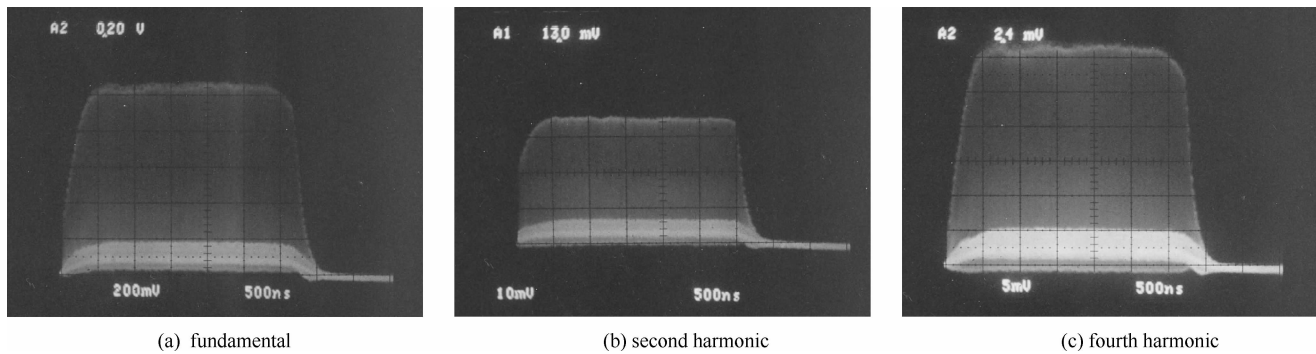


Fig. 4 Pulse sequence envelopes of fundamental wave, second and fourth harmonics outputs by amplification system

图 4 放大系统输出的基频光、2 次谐波及 4 次谐波的脉冲串包络波形

换系统的激光功率密度低于设计值,因此谐波转换效率低于设计值。可通过优化锁模激光器的输出提高系统的谐波转换效率。

参考文献:

- [1] Kojima T, Konno S, Fujikawa S, et al. 20-W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(1):58-60.
- [2] Kitano H, Matsui T, Sato K, et al. Efficient 355-nm generation in CsB₃O₅ crystal[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(4):263-265.
- [3] Sakuma J, Asakawa Y, Obara M. Generation of 5-W deep-UV continuous-wave radiation at 266 nm by an external cavity with a CsLiB₆O₁₀ crystal[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(1):92-94.
- [4] Druon F, Balembois F, Georges P. High-repetition-rate 300-ps pulsed ultraviolet source with a passively Q-switched microchip laser and a multipass amplifier[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**(7):499-501.
- [5] Jia Fuqiang, Zheng Quan, Xue Qinghua. High-power high-repetition-rate UV light at 355 nm generated by a diode-end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(15):2975-2979.
- [6] 程光华, 于连君, 王屹山, 等. 高效全固态紫外四倍频激光器的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(3):330-334. (Cheng Guanghua, Yu Lianjun, Wang Yishan, et al. Experimental study of all-solid-state second harmonic and fourth harmonic generation in Ti:Sapphire laser. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):330-334)
- [7] 张少军, 董圣明, 李福奇, 等. 新型 BiB₃O₆ 晶体高效和频产生 355 nm 紫外激光[J]. 中国激光, 2003, **30**(12):1087-1089. (Zhang Shaojun, Dong Shengming, Li Fuqi, et al. Efficient third-harmonic-generation of 1 064 nm laser with BiB₃O₆ crystal. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(12):1087-1089)
- [8] 石朝辉, 樊仲维, 张英, 等. 高效率大功率全固态紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):27-30. (Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying, et al. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(1):27-30)
- [9] Scheid M, Markert F, Walz J, et al. 750 mW continuous-wave solid-state deep ultraviolet laser source at the 253.7 nm transition in mercury [J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(8):955-957.

Shaping of mode-locked pulse sequence in high-gain amplifier

Tang Jun, Ding Lei, Deng Qinghua, Luo Yiming, Xu Dangpeng, Lu Zhenhua, Jing Feng
(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: Using optic injectors driven by laser as the electron source is advantageous in the research of free electron laser. To get the driving laser meeting certain requirement, a laser system has been designed. In the laser system, a mode-locked Nd:YVO₄ laser offers the seed pulse sequence and an laser diode array pumped Nd:YAG amplification system amplifies the seed sequence. In the amplification process, the shape of the sequence envelope is aberrated due to gain saturation effect. 24 mJ fundamental wave(1 064 nm), 5.7 mJ second harmonic and 0.6 mJ fourth harmonic have been obtained respectively in the system. The aberration and the way to compensate are also studied experimentally. As a result, the ultraviolet sequence with flat-topped envelope was obtained after fourth harmonic conversion of the amplified sequence.

Key words: mode-locked laser; pulse sequence; amplification; shaping