

氟化氪短脉冲激光的放大和组束研究*

王 钊, 张 骥, 李 静, 高智星, 胡凤明, 田宝贤, 班晓娜

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

摘 要: 为充分利用氟化氪(KrF)准分子激光放大器的长泵浦时间, 探索提高激光输出效率的方法, 开展紫外超短脉冲在 KrF 准分子激光器中多脉冲放大和组束的实验研究。采用双脉冲放大方案研究激光脉冲时间间隔对输出能量的影响, 确定延时时间, 提高脉冲总能量并有效抑制自发辐射(ASE)。实现了单次放大 4 个紫外超短脉冲, 获得了近 4 倍于单脉冲放大的输出能量。并探索紫外超短激光脉冲的组束技术, 成功应用光学角多路的方法将两个亚皮秒的紫外激光脉冲进行精确组束。

关键词: 紫外超短激光; 准分子激光; 氟化氪激光; 激光放大; 脉冲组束

中图分类号: TN242; TN248.2

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190460

Amplification and beam combination of ultra-short KrF laser pulse

Wang Zhao, Zhang Ji, Li Jing, Gao Zhixing, Hu Fengming, Tian Baoxian, Ban Xiaona

(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: To make full use of the long pump time of krypton fluoride excimer laser amplifiers and to increase the amplification efficiency, we carried out experimental research on multi-pulse amplification and beam combination of ultra-short UV pulses. The effect of delay time on pulse energy was studied using dual pulse amplification. Based on the above relationship, optimal delay time was confirmed, the increase of total energy and the reduction of amplified spontaneous emission (ASE) were both archived. Amplification of four ultraviolet pulses was achieved, and the energy was nearly four times that of the single pulse amplification. We also explored beam combining technology of ultraviolet ultra-short laser pulses, and combined two sub-picosecond pulses accurately.

Key words: ultraviolet short pulse laser; excimer laser; KrF laser; beam amplification; beam combination

随着可调谐激光晶体掺钛蓝宝石的应用、克尔透镜自锁模技术的发展和脉冲啁啾放大技术的发展, 飞秒脉冲激光的功率有了极大提高^[1-5]。高功率飞秒脉冲技术及其与物质相互作用的研究, 引发了基础科学和技术科学的变革, 创造出诸多新的研究领域^[6-8]。

准分子激光器在放大飞秒脉冲方面有着和固体激光完全不同的特点。准分子激光的介质是稀有气体卤化物, 一方面密度较低, 另一方面激光的饱和能量小, 因此激光在准分子介质中的非线性效应比在固体介质中小 6 个数量级, 从而避免了固体激光器在放大过程中出现的非线性效应, 如自聚焦、相位畸变和自相位调制等^[9]。准分子激光由于波长短, 其聚焦的焦点尺寸小, 而且光束的发散角可以接近衍射极限, 其良好聚焦性能使得其功率密度几乎可以与固体系统相比^[10]。

准分子的不利因素在于其上能态粒子寿命短。固体激光由于增益介质的上能级寿命长(μs 量级), 激光经过时泵浦已经结束, 采用单脉冲放大就可以有效提取泵浦提供的能量。KrF 激光的增益介质上能级有效寿命为 2 ns, 激光经过时泵浦一直在持续, 无法有效提取能量。电子束泵浦的 KrF 激光器的泵浦时间一般超过百 ns, 用于放大 1 ps 的单激光脉冲时会经历这样的过程: 激光脉冲经过 KrF 增益介质提取上能级储存的能量, 2~3 ns 后 KrF 介质的增益就会由于持续的泵浦而恢复, 上能级储能转化为 ASE 输出, 因此激光的提取效率很低。要充分利用上能级的储能, 提高激光的提取效率, 有效的方法是采用多脉冲放大, 将激光脉冲组成固定时间间隔的脉冲串, 充分利用增益介质的泵浦时间。采用多脉冲放大有利于提高输出的激光脉冲对比度: 一是输入激光被分束降低放大过程的饱和度降; 二是采用多脉冲放大会抑制 ASE 输出的能量。

* 收稿日期: 2019-11-28; 修订日期: 2019-12-31

基金项目: 国家稳定支持研究项目(WDJC-2019-02)

作者简介: 王 钊(1981—), 男, 副研究员, 从事准分子激光与物质相互作用研究; wangz@ciae.ac.cn。

紫外短激光的多脉冲放大技术一直是国际上的一个难题。英国 Rutherford 的研究人员做过基于角多路和拉曼组束技术的短激光多脉冲放大组束实验^[1], 获得了非常好的结果, 但是拉曼池窗口的阈值限制了同时到达拉曼池泵浦脉冲的个数。德国哥根廷激光研究所的研究人员采用空间相干角多路结构解决了调整精度的问题, 利用两束结构并应用于放电泵浦 KrF 准分子激光放大短脉冲, 已经获得 100 mJ, 500 fs 的 248 nm 紫外短脉冲激光输出^[12]。

本文采用放电泵浦的 KrF 激光放大器对紫外短激光脉冲的多脉冲放大和组束技术进行了验证。

1 延时对脉冲放大的影响

为研究脉冲时间间隔对脉冲输出能量的影响, 进行了双脉冲实验, 实验光路如图 1 所示。其中 S1 和 S2 是分束镜, M1 和 M2 是可以调节位置的 45°高反镜。F1 是焦距为-1 500 mm 的扩束透镜, F2 和 F3 分别是焦距为 1 100 mm 和-800 mm 的透镜, 用于缩束。通过调节高反镜 M1 和 M2 的位置改变两个脉冲的延迟时间。直径 10 mm 的激光束经过 F1 扩束后进入放电泵浦 KrF 放大器 LLG50, 在 LLG50 的出口处光束直径为 40 mm, 经过 F2, F3 两个透镜缩束后, 距离 LLG50 输出窗镜 15 m 处的能量计上的光斑直径为 5 mm。

调节分束片 S2, 使在 15 m 后的接近焦点处的两个光斑上下分开 10 mm, 此时在 LLG 出口处两个光斑的错位在 2 mm。两个脉冲在放电泵浦 KrF 放大器 LLG50 的激光腔内可以认为是重合的。分别测量两个脉冲的能量, 与单脉冲放大时的输出能量比对, 获得延迟时间对总输出能量的影响。

图 2 中黑点为实验数据, 红线为拟合曲线, 横坐标是两个脉冲的延迟时间, 纵坐标是双脉冲放大时两个脉冲的总能量与单脉冲放大时脉冲能量的比值。由曲线可以看出, 双脉冲的总输出能量随着延迟时间的增加而增大, 当延迟时间在 2.85 ns 时, 总输出能量可以达到单脉冲放大时能量的 1.75 倍。双脉冲的总能量小于两倍的单脉冲能量是由于上能态粒子数在被激光提取能量后需要一定时间进行恢复。当前序脉冲经过增益介质时提取上能级的储能, 上能级粒子个数下降, 造成增益的下降。前序脉冲过后, 由于泵浦过程持续, 上能级粒子数逐渐增加, 直到增加的速度和退激的速度相同时, 上能级粒子数重新达到稳定状态, 增益完全恢复。因此多脉冲放大时, 脉冲之间的延时受上能态粒子数恢复时间的制约。延时过小, 增益介质未恢复, 从而降低后续脉冲的能量。延时过大则无法有效抑制 ASE。

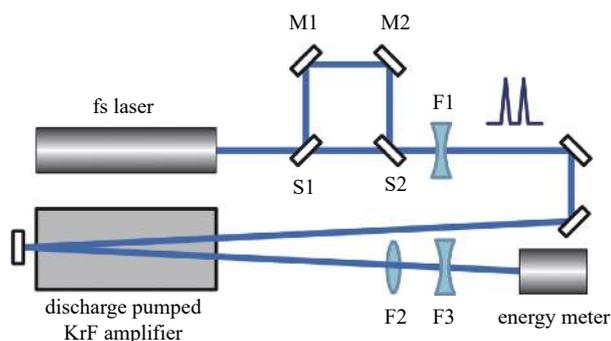


Fig. 1 Schematic of the dual pulse experimental setup

图 1 双脉冲实验光路图

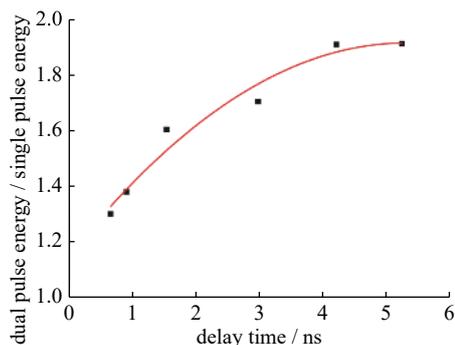


Fig. 2 Energy ratio between dual pulses and single pulse vs delay time

图 2 延迟时间对总输出能量的影响

2 多脉冲放大

采用一台放电泵浦的 KrF 激光器研究紫外超短脉冲序列的放大, 其放电时间为 24 ns, 增益介质有效区域长度为 450 mm。为充分利用放电泵浦时间, 并考虑到脉冲延时对放大的影响, 将紫外飞秒脉冲分束为 4 个脉冲组成序列输入激光器进行双程放大, 光路图如图 3 所示。

其中 S1, S2 和 S3 分束镜, 其余是高反镜。其中 M1 和 M2 组成的延时光路的光程为 5.70 ns, M3 和 M4 组成的延时光路的光程为 2.85 ns。因此注入放电泵浦 KrF 激光器的 4 个脉冲分别为: S1 透过 S2 透过 S3 透过, 延迟 0 ns; S1 透过 S2 反射 S3 反射, 延迟 2.85 ns; S1 反射 S2 反射 S3 透过, 延迟 5.70 ns; S1 反射 S2 透过 S3 反射, 延迟 8.55 ns。将产生的时

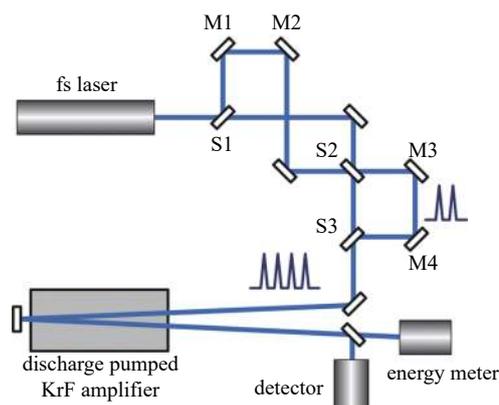


Fig. 3 Schematic of sequence pulses generation

图 3 序列脉冲的产生光路

间间隔为 2.85 ns 的激光脉冲序列注入放电泵浦 KrF 激光器进行放大, 输出总能量为 (180 ± 20) mJ, 如表 1 所示。

由实验结果证实, 采用多脉冲放大技术可以成倍提高 KrF 输出的紫外短脉冲的能量, 四个脉冲的总能量接近单脉冲放大输出能量的 4 倍。由于大规模的电子束泵浦 KrF 激光放大器的泵浦时间通常为百 ns 量级, 采用多脉冲放大技术可以获得每个脉冲能量基本一致的高功率紫外短脉冲序列, 可以大幅提高短脉冲紫外激光的输出能量。

3 光学角多路组束

为获得高功率的紫外激光脉冲, 需要紫外激光脉冲序列经过组束并同时叠加照射至靶面。光学角多路是组束的一种结构, 如图 4 所示。

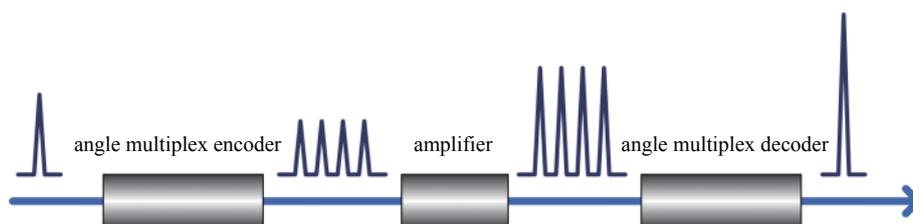


Fig. 4 Schematic of MOPA angle multiplex

图 4 MOPA 角多路的放大结构

首先将入射光束分成多束并编码延时, 脉冲序列依次进入放大器进行放大, 随后进行解码消延时, 最后同时聚焦至靶面, 此种结构的关键问题在于消延时光程的调节精度。

设计了包含两个脉冲的脉冲串光学角多路组束方案, 光路如图 5 所示。方案的原理是进入放大器的序列脉冲有一个微小的角度, 近似同轴, 可以采用同一个光学系统对两个脉冲进行传输。在放大腔内, 由于空间距离接近且光束直径大, 两个脉冲可以近似重合。当序列脉冲传输至放大腔外, 随着传输距离增加, 光束开始分离, 在一定位置两束光完全分离就可以进行脉冲串的消延时。消延时后的激光脉冲同时并叠加照射至靶面, 完成序列脉冲的组束。

图 5 中 S1 和 S2 是分束镜, M1 和 M2 是可以调节位置的 45°高反镜。脉冲的延迟时间通过调节高反镜 M1 和 M2 的位置来改变, 实验中延迟时间设置为 2.85 ns。调节分束片 S2, 使在 15 m 后的消延时光路处的两个光斑上下分开 12 mm, 光斑直径 10 mm, 用高反镜将前序脉冲引出, 通过消延时光路延时 2.85 ns, 两个脉冲分别通过 f 为 400 mm 的透镜聚焦至靶面。通过精确调节光路, 使两个脉冲焦点在空间上重合。实验验证中, 使用放置于靶位的紫外自相关仪对空间重合后的脉冲时间宽度进行测量, 通过改变消延时光路的光程, 确定两个脉冲的时间同步情况。图 6 是实验测得的脉冲时间宽度和延时关系。

两个脉冲在时间上完全同步后脉冲宽度为 (700 ± 50) fs, 随着延时增加, 脉冲宽度逐渐变大。当两个脉冲的延时达到 1 500 fs 时, 脉冲宽度达到最大的 $(1\ 700 \pm 50)$ fs。随后脉冲宽度随着延时增加而开始减小, 当延时达到 3 000 fs 时, 脉冲宽度为 (700 ± 50) fs。图 7 是脉冲延时为 0 时的脉冲宽度测量结果。

组束前和组束后激光脉冲宽度都为 (700 ± 50) fs, 未发现明显变宽。此外, 系统比较稳定, 未观察到脉冲重合的抖动。

4 结 论

本文验证了多脉冲放大技术可以成倍提高 KrF 紫外短脉冲的能量。由于增益介质恢复的原因, 脉冲时间间隔会影响双脉冲输出总能量, 测量结果显示当脉冲延时大于 2.85 ns 时增益基本恢复, 输出能量达到增益下降前输出能量的 75% 以上, 过长的脉冲延时则不利于对 ASE 的抑制。采用包含 4 个脉冲的脉冲序列双程放大的方案, 获得

表 1 脉冲能量

Table 1 Pulse energy

pulse No.	input energy/ μ J	output energy/mJ
1	70 ± 10	40 ± 5
2	55 ± 10	50 ± 5
3	62 ± 10	40 ± 5
4	61 ± 10	50 ± 5

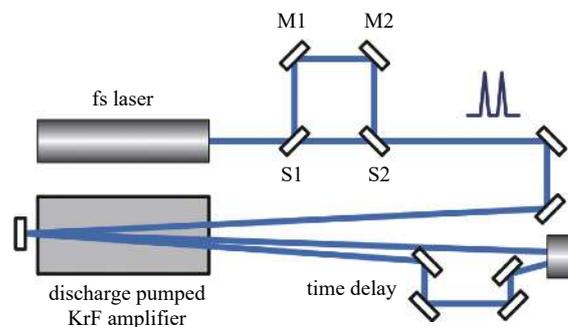


Fig. 5 Beam combination based on angular multiplexing

图 5 基于角多路的组束方案

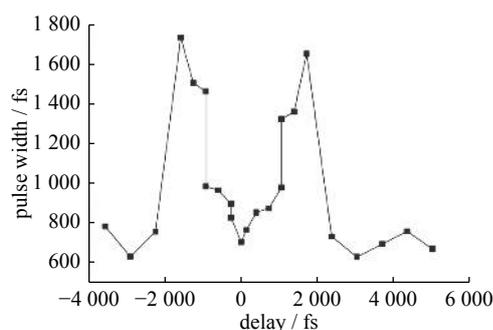


Fig. 6 Pulse duration versus delay time

图 6 脉冲时间宽度和延时的关系

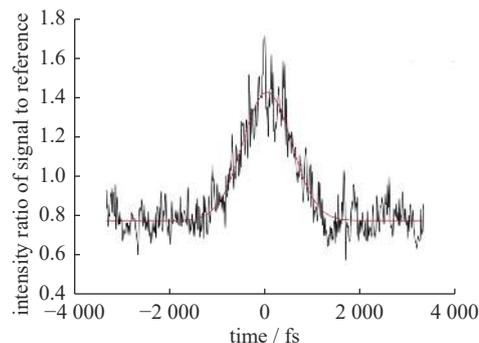


Fig. 7 Pulse duration

图 7 脉冲宽度

了 180 mJ 的总能量输出, 接近单脉冲放大输出能量的 4 倍, 证实了多脉冲放大技术在 KrF 激光放大飞秒脉冲中的有效性。采用光学角多路的方法进行两个脉冲的组束实验, 组束后的脉冲宽度为 700 fs, 脉冲之间的抖动小于 50 fs。如采用本文方法进行更多脉冲的光学角多路组束, 同时利用电子束泵浦 KrF 激光器进行放大, 则有望获得数十 TW 的高功率紫外超短脉冲激光。

参考文献:

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt Commu*, 1985, 55(3): 447-449.
- [2] Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[J]. *Science*, 1994, 264(5161): 917-924.
- [3] Joshi C J, Corkum P B. Interaction of ultra-intense laser light with matter[J]. *Physics Today*, 1995, 48(1): 36-43.
- [4] Mourou G, Barry C P, Perry M D, et al. Ultrahigh-intensity lasers: physics of the extreme on a tabletop[J]. *Physics Today*, 1998, 51(1): 22-28.
- [5] Cowan T E, Hunt A W, Phillips T W, et al. Photonuclear fission from high energy electrons from ultraintense laser-solid interactions[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(5): 903-906.
- [6] Zweiback J, Smith R A, Cowan T E, et al. Nuclear fusion driven by Coulomb explosions of large deuterium clusters[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(12): 2634-2637.
- [7] Ledingham K W, Spencer I, Mccanny T, et al. Photonuclear physics when a multiterawatt laser pulse interacts with solid targets[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(5): 899-902.
- [8] Ewald F, Schwoerer H, Dusterer S, et al. Application of relativistic laser plasmas for the study of nuclear reactions[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2003, 45(12A): A83.
- [9] 汤秀章, 张海峰, 龚堃, 等. 电子束泵浦KrF激光器进行超短脉冲的单束放大实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(5): 641-645. (Tang Xiuzhang, Zhang Haifeng, Gong Kun, et al. Amplification of UV ultrashort pulse laser in e beam pumped KrF amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5): 641-645)
- [10] Sztatmari S, Almasi G, Feuerhake M, et al. Production of intensities of $\sim 10^{19}$ W/cm² by a table-top KrF laser[J]. *Applied Physics B*, 1996, 63(5): 463-466.
- [11] Barr J R, Everall N J, Hooker C J, et al. High energy amplification of picosecond pulses at 248 nm[J]. *Opt Commu*, 1988: 127-132.
- [12] Sztatmari S. High-brightness ultraviolet excimer lasers[J]. *Appl Phys B*, 1994, 58(3): 211-223.