

基于电光开关的增益控制法准分子激光 ASE 抑制技术研究

胡 云 赵学庆 朱永祥 王大辉 张永生

(西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要 在高功率准分子激光系统中,由于介质的高增益和非存储特性,自发辐射放大(ASE)成为影响系统输出对比度的关键因素。在角多路主振荡功率放大器(MOPA)激光放大链中,为抑制 ASE,采用了电光开关和增益控制相结合的方式,在第一放大级后置入了电光削波开关,并利用检偏器另一偏振分量作为控制光束,对下一放大级进行增益控制。构建了光路,进行了原理性实验研究,并在第二预放大级中获得了 40300:1 的信号对比度。采用该方法的优点是在主光路中引起的能量损耗小,且降低了对破坏阈值的要求。电光开关和增益控制相结合共同实现了前两级预放大器的 ASE 抑制。

关键词 高功率激光;准分子;自发辐射放大;电光开关;增益控制

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0402002

Study of Gain Control Method Based on Electro-Optical Switch for ASE Suppression of Excimer Laser

Hu Yun Zhao Xueqing Zhu Yongxiang Wang Dahui Zhang Yongsheng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract In high power excimer laser system, due to high gain and nonstorage medium, amplified spontaneous emission (ASE) is the key factor impacting on the signal contrast of the system output. In angular multiplexing master oscillator power amplifier (MOPA) laser amplifier chain, combination of the electro-optical switch and gain control method is used to suppress ASE. An electro-optical (E-O) switch is plugged after the first amplifier, and the other polarizer component of the analyzer is used for controlling the light beam and as gain controlling beam of the next amplifier. The optical path is constructed, principle experiments are carried out, and signal contrast up to 40300:1 is obtained in the second pre-amplifier. The advantages of this method are less energy loss and lower damage threshold request. The combination of E-O switch and gain control method gives a good solution to the ASE suppression of the first two pre-amplifiers.

Key words high power laser; excimer; amplified spontaneous emission; electro-optical switch; gain control

OCIS codes 140.2180; 140.3280; 140.3540

1 引 言

在高功率准分子激光系统中,由于放大介质的高增益和非存储特性,自发辐射放大(ASE)成为影响系统输出信号对比度的关键因素^[1-3]。对于高功率准分子激光系统,编码前的小口径预放大器占空比较

低,所产生的 ASE 经后续放大器放大到足够程度后,不仅影响放大器的能量提取效率,而且会在主激光信号之前产生很强的预脉冲,严重影响系统输出激光信号对比度,从而影响精密物理实验的顺利开展。近年来,本课题组利用电光削波开关对 ASE 抑制技术进

收稿日期: 2013-09-06; **收到修改稿日期**: 2013-10-24

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1007)

作者简介: 胡 云(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光光学及激光器等方面的研究。

E-mail: huyun@mail.ustc.edu.cn

行了一系列研究^[4-9],采用该技术在主振荡功率放大器(MOPA)系统第一级预放大器后进行了 ASE 抑制,获得了良好的窄脉冲输出。但根据能量放大水平的要求,在该放大器与编码环节之间还应该存在低占空比小口径放大器。实验发现电光削波获得的高对比度信号,经单级放大器放大后,信号对比度下降很快。当然,在编码前可以直接采用电光削波开关控制 ASE,但会存在较大的能量损耗。因此,单纯使用电光削波开关控制 ASE 受到一定的限制。

增益控制也是一种有效的 ASE 抑制方法^[4-13],被用来压缩脉宽,获得窄脉宽波形,国内外都曾对此进行过相应的研究。在电光开关削波实验中发现,被削掉的波形部分恰好与电光开关输出波形在时间上互补,正好可以应用于输出波形的前后沿的 ASE 抑制。利用这个特点,结合电光开关削波,发展了一种增益控制 ASE 抑制方法。该方法与电光开关一起共同实现了前两级预放大器的 ASE 抑制,取得了良好的效果。

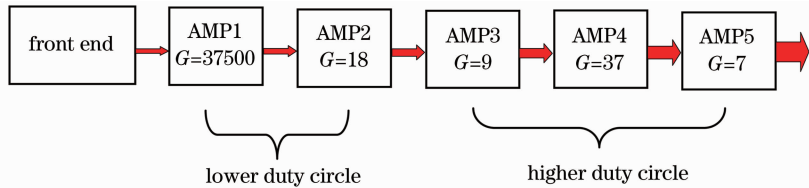


图 1 角多路 MOPA 系统框架图及各级增益

Fig. 1 Block diagram of angular multiplexing MOPA system and gain of each amplifier

3 电光削波与增益控制结合 ASE 抑制原理

3.1 电光开关原理

电光开关削波是一种直接有效的 ASE 抑制方法,其工作原理是基于偏振光的特性,如图 2 所示^[4-9]。起偏器 P_1 和检偏器 P_2 垂直放置;电光晶

2 激光放大链 ASE 情况分析

图 1 是角多路 MOPA 系统构成框图及各放大级的增益情况^[14]。从图中看到,第一预放大级增益达到 10^5 量级($G=37500$),该处能导致较大的 ASE 份额。各放大器放电脉宽均在 200 ns 左右,前端种子光脉宽不超过 10 ns。前两个放大级占空比和填充率较低,这也是引起系统 ASE 的原因。系统从第三个放大级在角多路编码成为 18 束后,时间占空比和空间填充率都得到了较大的提升,能有效减小 ASE 份额。对第一放大级,可采用电光削波开关进行 ASE 抑制。对第二放大级,也可继续置入电光开关进行 ASE 抑制,但带来两个问题:连续削波使得能量损失较大;第二放大级处能量增大,对削波元器件破坏阈值要求较高。经分析,此处可以采用电光削波开关削波后的另一偏振分量作为控制光束,采用对主光束增益控制的方法进行 ASE 抑制。

体光轴与入射光平行,感应轴与起偏方向成 45° 角。若电光晶体不加电,则入射光不能通过电光开关。晶体上加半波电压后,偏振光的偏振面将旋转 90° 角,从检偏器透出。这样,晶体对光路相当于一个开关,受电光晶体上的电压控制,控制脉冲电压的宽度就能控制输出光的脉宽。

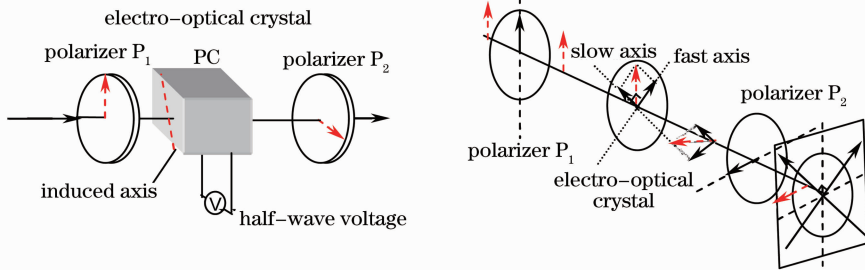


图 2 电光开关原理图

Fig. 2 Principle diagram of electro-optical switch

图 3 是电光开关结构示意图。输出激光脉冲经分束镜 BS_1 分为两束:一束为主光路激光,另一束

用于产生同步触发信号。主光路经过起偏器 P_1 、检偏器 P_2 和电光晶体 PC 构成的电光开关后被削波

成为短脉冲。检偏器同时输出被削除的部分 (clipped wave), 波形与主光路削波波形互补。由光电管产生的触发信号, 经同步延时器同步触发高压

脉冲电源, 输出高压脉冲电信号, 驱动晶体工作。该驱动脉冲电信号与主光路激光脉冲同步到达电光晶体, 产生削波效果。

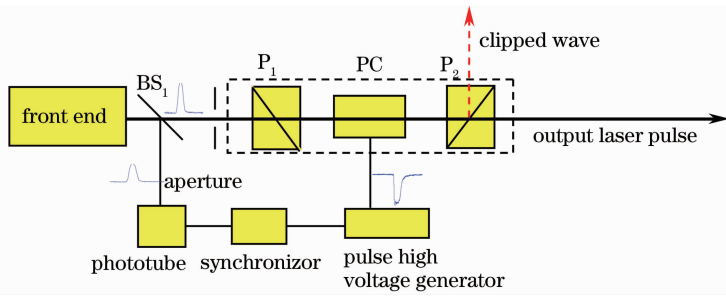


图 3 单电光开关结构图

Fig. 3 Structure diagram of single electro-optical switch

3.2 增益控制原理

增益控制法是指引入另一光束, 通过同步调节, 使之在主光束脉冲前沿或后沿, 淬灭掉增益介质的上能态粒子数, 降低该时刻介质增益, 从而使得被放大主光束脉冲前沿或后沿的 ASE 受到抑制, 获得较好的输出信号对比度^[10-12]。引入的光束称为控制光束, 在增益控制过程结束后被隔离或导出主光路, 不对主光路产生影响。一般增益控制法仅控制主光束脉冲前沿或后沿, 若该方法与电光开关相结合, 利用电光开关被削波的光束作为控制光束, 则可同时

实现主光束脉冲前后沿的增益控制, 原理如图 4 所示。设电光开关输出为 P 光, 则被削除部分为 S 光。P 光为单脉冲, 而 S 光为双峰, 双峰之间的凹陷在时间上正好与 P 光对应。故将 S 光和 P 光同步同光路输入下一级放大器, S 光的前后峰正好位于 P 光的前后沿, 可以同时淬灭其前后沿的上能态粒子数, 使得此处增益下降, ASE 受到抑制, 从而使 P 光在放大过程中保持较高的信号对比度。增益控制过程结束后, 再采用适当方法将 S 光去除, 就完成了 P 光的高保真放大。

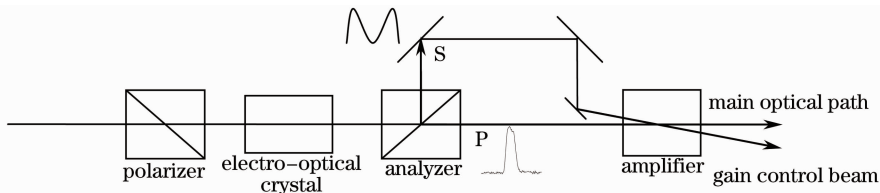


图 4 增益控制法 ASE 抑制原理图

Fig. 4 Principle diagram of gain control method

4 实验系统设计

图 5 为增益控制法 ASE 抑制实验系统设计图。实验系统包括激光放大链、ASE 抑制光路、激光参数测量等几个方面, 下面分别进行介绍。

4.1 激光放大链

实验系统主光路由准分子激光前端、放电抽运准分子激光放大器 AMP1 和 AMP2 共同构成的激光放大链。系统采用无阶梯诱导空间非相干 (EFISI) 技术, 由前端和散射源产生部分非相干光束, 再通过 $4f$ 像传递光路结构进行传输。其中 AMP1 采用三程放大, AMP2 采用双程放大。放大器均置于 $4f$ 系统傅里叶面处, 以减小放电不均匀性带来的影响。

4.2 ASE 抑制光路结构

ASE 抑制光路包括电光开关和增益控制光路两部分。在放大器 AMP1 三程像面后构造了由透镜 L_1 和 L_2 构成的 $4f$ 光路系统, 电光开关置于傅里叶面处, 以提高性能和减小光路的影响。增益控制光束由电光开关检偏器格兰棱镜 P_3 的 S 光产生, 波形与 P 光互补, 偏振方向相互垂直。由反射镜 M_1 、 M_2 和偏振立方 P_3 将增益控制光束进行准直、传输并耦合入主光路。其中, 耦合方式利用了控制束与主光路偏振方向垂直, 且偏振立方对 P 光高透, 对 S 光高反的特点, 能大大提高耦合效率, 减小主光束和控制光束的能量损失。耦合时控制束和主光路保持微小偏距 Δ , 这样利用格兰棱镜 P_4 及孔阑 3 可将控制光束从主光束中去除, 以保证主光路光

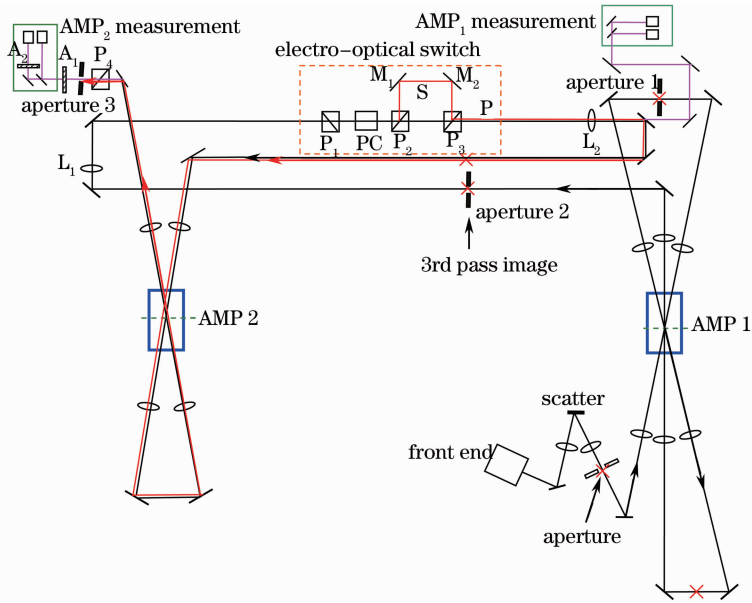


图 5 增益控制法 ASE 抑制光路

Fig. 5 Optical layout of gain control method for ASE suppressing

束能量和波形的测量。

4.3 激光参数测量

激光参数测量系统为 AMP1 和 AMP2 测量单元。测量单元从主光路进行取样测量,在像传递透镜后的取样光束具有会聚传输特性,滤除增益光束后在像面附近进行能量和波形的测量。由于 AMP2 将涉及高信号对比度的测量,测量光路中采用衰减片 A_1 和 A_2 来匹配不同的信号强度,其中 A_1 首先匹配能量计测量范围,再由 A_2 匹配光电管测量范围。

5 增益控制 ASE 抑制实验

采用图 5 的光路布局进行了增益控制 ASE 抑制实验。实验首先测量了对前端削波后的削波波形和 S 光波形,然后采用第一级放大器进行了光路调试,最后在上述基础上进行了 AMP2 的增益控制 ASE 抑制实验,测量了采用增益控制后 AMP2 的信号对比度。

5.1 削波波形和控制束波形测量

首先进行了电光削波开关的调试,获得了削波波形及控制束波形。前端波形如图 6 所示,上升沿 1.5 ns,下降沿 9.0 ns,半峰全宽为 6.2 ns。电光开关削波电源波形如图 7 所示,下降沿 1.0 ns,上升沿 3.9 ns,半峰全宽为 5.7 ns。采用该脉冲电源对前端波形进行削波,获得削波波形(偏振方向 P)和控制束波形(偏振方向 S),分别如图 8 和图 9 所示。削波波形为主光路激光脉冲,上升沿 0.87 ns,下降

沿 3.8 ns,半峰全宽为 3.9 ns。控制束波形双峰距为 5.6 ns。将控制束耦合入主光路中,主光路波形恰好位于控制束双峰之间,控制束峰 1 位于主光路波形前沿,峰 2 位于主光路波形后沿。这样,在第二级放大级放大的时候,控制束峰 1 和峰 2 将淬灭前后沿的上能态光子数,使得激光介质对主光路增益下降,抑制了前后沿 ASE 的贡献,从而达到了对主光路 ASE 抑制和对输入信号保真放大的目的。

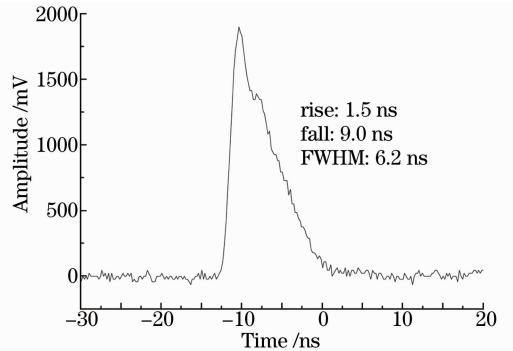


图 6 前端波形

Fig. 6 Waveform of front end

通过 AMP2 的主光束和控制束之间的偏距为 3 mm,光斑直径为 18 mm,可计算两者光斑的空间重合率为 99.2%,可很好满足 ASE 控制要求。在像面处再将控制光束进行孔阑滤波,并采用格兰棱镜进行检偏。控制光束偏振度很高,且格兰棱镜消光比为 $10^6:1$,可以保证控制束在放大完成后被很好地滤除。

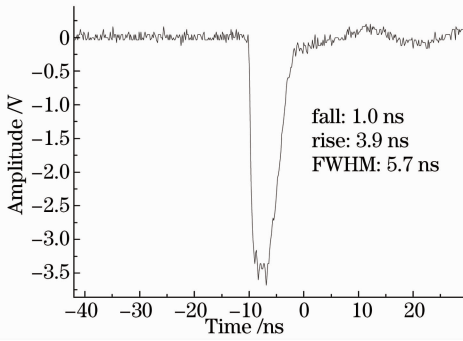


图 7 削波电源波形

Fig. 7 Waveform of power supply for wave clipping

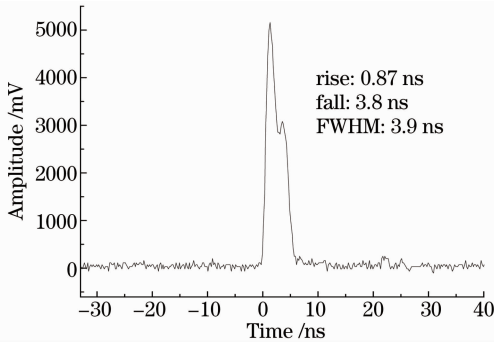


图 8 削波波形

Fig. 8 Clipped waveform

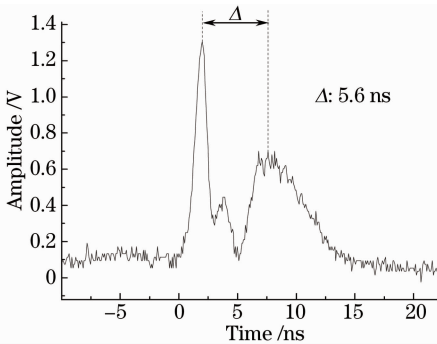


图 9 控制束波形

Fig. 9 Waveform of control beam

5.2 AMP1 放大输出的电光开关削波

首先进行了 AMP1 三程放大输出信号的电光削波实验,以确定下一放大级的输入波形参数。利用 AMP2 测量单元对 AMP1 输出信号进行测量。图 10 是 AMP1 放大削波波形,幅值为 3.66 V,上升沿为 1.0 ns,下降沿 4.5 ns,半峰全宽为 4.2 ns。将电光开关关闭,并移去光电管前的 7000 倍衰减 (A_2)。由于开关关闭后对信号之外的本底波形没有影响,所以可测得本底波形如图 11 所示。本底幅值为 1.74 V,宽度为 109.2 ns,其中前沿本底宽度为 65.3 ns,后沿本底宽度为 22.5 ns,主脉冲幅值为 8.12 V。由此可以估算 AMP1 放大削波后的信号

对比度为:

$$R_s = \frac{A_s}{A_b} \cdot D = 14724 : 1, \quad (1)$$

式中 A_s 为削波波形幅值, A_b 为本底幅值, D 为衰减倍数。经过削波后的 AMP1 信号对比度达到了较高的水平,该信号同时为 AMP2 的输入信号。

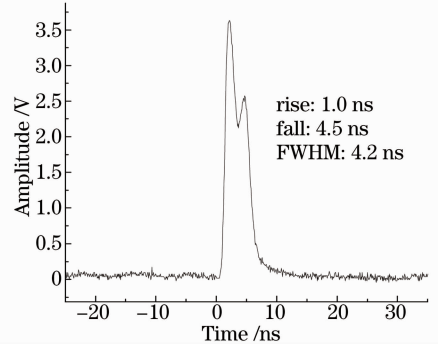


图 10 AMP1 放大削波波形

Fig. 10 Amplified waveform of AMP1 after clipped

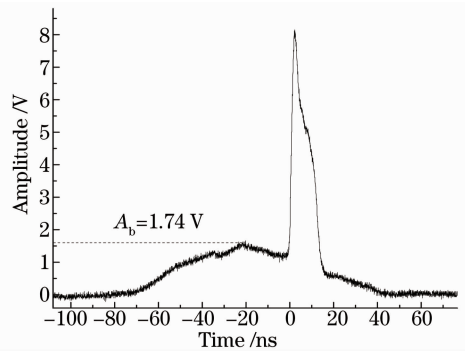


图 11 AMP1 放大削波本底波形

Fig. 11 Background waveform of AMP1 after amplified and clipped

5.3 AMP2 放大器 ASE 抑制实验

经 AMP1 放大削波后的激光脉冲注入到 AMP2 进行放大。此过程中若不采用 ASE 抑制措施,那么已经提升的信号对比度将会因为受到来自 AMP2 的 ASE 影响而再次下降。本实验中进一步采用增益控制的方法进行第二放大级的 ASE 抑制。表 1 给出了若干次放大实验中放大波形幅值和本底幅值。其中,本底幅值是关闭电光开关并去掉 7000 倍衰减 (A_2) 测得,本底是指去掉主峰之外的波形最大值。典型放大波形和本底波形分别如图 12 和图 13 所示。表 1 中给出了两者 3 次测量的平均幅值,根据平均值计算 AMP2 的信号对比度为:

$$R_s = \frac{A_s}{A_b} \cdot D = 40300 : 1. \quad (2)$$

表 1 AMP2 放大波形幅值和本底幅值

Table 1 Amplitude of amplified waveform and background waveform of AMP2

Counts	Amplified waveform amplitude /V	Background waveform amplitude /V
1	4.3	0.83
2	4.0	0.72
3	3.8	0.55
Average	4.03	0.70

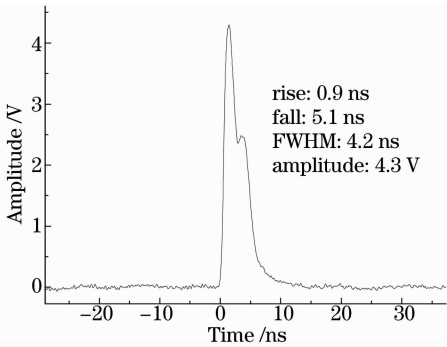


图 12 AMP2 放大全波形

Fig. 12 Amplified waveform of AMP2

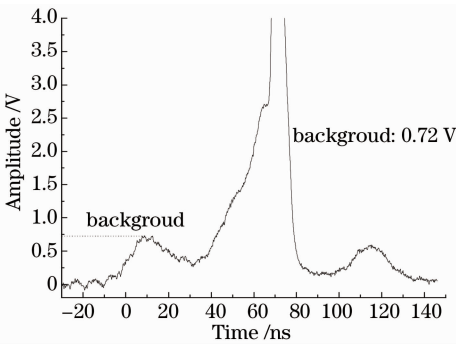


图 13 AMP2 本底波形

Fig. 13 Background waveform of AMP2

6 结 论

在电光开关基础上,发展了一种增益控制法准分子激光 ASE 抑制技术,并针对准分子激光 MOPA 系统中占空比较低的第二预放大级进行了 ASE 抑制原理性实验。实验中该放大级输入波形信号对比度为 14724:1,经增益控制放大后,信号对比度提高到 40300:1,系统中的信号对比度得到保持和提高,有利于信号在系统中的保真放大。该方法利用电光开关产生控制光束,可以同时实现波形前后沿的 ASE 抑制,能量损失小,易于实现,且无破坏阈值的风险。

参 考 文 献

1 A V Deniz, S P Obenschain. A KrF oscillator system with

uniform profiles[J]. Opt Comm, 1994, 106(1-3): 113-118.

2 Akira Sasaki, Kenichi Ueda, Hinoshi Takuma, *et al.*. Amplified spontaneous emission in high power KrF lasers[J]. J Appl Phys, 1989, 65(1): 231-236.

3 R H Lehmborg, J L Giuliani. Simulation of amplified spontaneous emission in high gain KrF laser amplifiers[J]. J Appl Phys, 2003, 94(1): 31-43.

4 Xiang Shiqing, Dong Jingxing, Mang Yanping, *et al.*. Generation of 2~10 ns XeCl laser pulses by direct wave clipping with an electro-optical Q-switching[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(9): 675-680.

向世清,董景星,莽燕萍,等.电光开关削波产生 2~10 ns 准分子激光输出脉冲[J].中国激光,1995,22(9):675-680.

5 Meng Shaoxian, Gu Zhongmin, Mang Yanping, *et al.*. Chopped waveshape of electro-optic gates and shorten pulses in laser amplification process[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(10): 930-934.

孟绍贤,谷忠民,莽燕萍,等.电光开关削波和激光放大过程中的脉冲变窄[J].中国激光,1998,25(10):930-934.

6 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. BBO electro-optical switch for UV laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 111401.

胡云,赵学庆,薛全喜,等.用于紫外激光的 BBO 电光削波开关[J].激光与光电子学进展,2010,47(11):111401.

7 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. High contrast ratio ultraviolet electro-optical switch [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 561-564.

胡云,赵学庆,薛全喜,等.高对比度紫外电光削波开关[J].强激光与粒子束,2013,25(3):561-564.

8 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. Suppression of ASE from excimer laser using cascaded UV electro-optical switch [J]. Optic and Precision Engineering, 2013, 21(1): 13-19.

胡云,赵学庆,薛全喜,等.由级联紫外电光开关控制准分子激光的自发辐射放大[J].光学精密工程,2013,21(1):13-19.

9 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. ASE Suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102008.

胡云,赵学庆,薛全喜,等.基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制 [J]. 中国激光,2013,40(1): 0102008.

10 Xiang Yihuai, Shan Yusheng, Gao Zhixing, *et al.*. Shortening of KrF excimer laser pulses by optical gain switching method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(2): 192-195.

向益淮,单玉生,高智星,等.用饱和增益开关法压缩 KrF 准分子激光脉冲[J].原子能科学技术,2006,40(2):192-195.

11 Liu Chunbo. Research on KrF ASE Short Pulse Obtained by Laser Oscillation Quenching[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

刘春波.激光振荡淬灭法获得 KrF ASE 短脉冲研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

12 Xiang Yihuai, Tang Xiuzhang, S Szatmari, *et al.*. Pulse compression method for amplified spontaneous emission smooth beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1381-1384.

向益淮,汤秀章,S Szatmari,等.适用于放大自发辐射平滑光束的脉宽压缩方法[J].强激光与粒子束,2012,24(6):1381-1384.

13 Y Owadana, I Okuda, Y Matsumoto, *et al.*. Performance of the ASHURA KrF laser and its upgrading plan [J]. Laser and Particle Beams, 1993, 11(2): 347-351.

14 Zhao Xueqing. Study on Propagation Amplification of Angular Multiplexed High Power Excimer Laser with Beam Smoothing [D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2012.

赵学庆.平滑化角多路高功率准分子激光传输放大技术研究 [D].西安:西北核技术研究所,2012.

栏目编辑:张 腾