

# 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制

胡 云 赵学庆 薛全喜 王大辉 郑国鑫 华恒祺 张永生 朱永祥 肖伟伟

(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** 高功率准分子激光系统中的放大自发辐射(ASE)会引起主脉冲信号对比度下降,从而导致放大过程中激光脉冲信号对比度下降以及波形展宽和畸变,影响精密物理实验的开展。基于电光开关产生短脉冲的原理,对紫外波段电光开关进行了研究,建立了一种抑制准分子激光放大链 ASE 的方法。在对主振荡功率放大(MOPA)系统第一级预放大器的削波实验中,单电光开关和双电光开关消光比分别达到了  $10^3$  和  $10^4$  量级,削波后的激光脉冲信号对比度由原来的几十倍分别提高到  $10^5$  和  $10^6$  量级。在单路 MOPA 系统放大实验中,采用级联双电光开关进行了系统的 ASE 控制,并最终在靶面获得了良好的窄脉宽放大激光脉冲,为高功率准分子激光系统中波形放大问题提供了一个有效的解决方案。

**关键词** 激光光学;电光开关;自发辐射;准分子激光;对比度

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0102008

## ASE Suppression in the High Power Excimer Laser MOPA System Based on Electro-Optical Switch

Hu Yun Zhao Xueqing Xue Quanxi Wang Dahui Zheng Guoxin

Hua Hengqi Zhang Yongsheng Zhu Yongxiang Xiao Weiwei

(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, the signal contrast ratio is decreased severely by the amplified spontaneous emission (ASE), which decreases the laser pulse signal contrast severely, leads to waveform broadening and distortion, and impacts on the accurate physical experiment. In this paper, based on the principle of the short pulse generation by electro-optical switch, study on ultraviolet electro-optical switch is made, and a method for ASE suppression of the laser amplifier chain is established. In the waveform clipping experiment of the first pre-amplifier in master oscillator power amplifier (MOPA) system, the extinction ratios of the single and cascaded dual electro-optical switches reach  $10^3$  and  $10^4$  level, and the laser pulse signal contrast ratios are promoted to  $10^5$  and  $10^6$  level after clipping, respectively. In the experiment of single channel MOPA system, the cascaded dual electro-optical switch is adopted to control the ASE, and an amplified narrow pulse is obtained on the target surface, providing an effective solution to the problem of waveform amplification in the high power excimer laser system.

**Key words** laser optics; electro-optical switch; spontaneous emission; excimer laser; contrast ratio

**OCIS codes** 140.2180; 140.0140; 140.3280; 140.3540

## 1 引 言

XeCl 高功率准分子激光主振荡功率放大(MOPA)系统的输出激光脉冲信号对比度是一个

关键性指标<sup>[1,2]</sup>。但由于 XeCl 准分子激光上能级寿命短(十几纳秒),存在较强的放大自发辐射(ASE)现象,导致激光脉冲信号对比度下降,波形展

**收稿日期**: 2012-08-01; **收到修改稿日期**: 2012-09-15

**基金项目**: 激光与物质相互作用国家重点实验基金(SKLLIMT007)资助课题。

**作者简介**: 胡 云(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

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

宽和畸变,影响精密物理实验的开展。当输入信号脉宽与放电脉宽不匹配,占空比较低时,情况尤为严重。本实验室的 MOPA 系统由一个窄脉冲准分子激光振荡器前端、四级预放大器和一级主放大器构成,要求在靶面处获得有一定信号对比度的窄脉冲输出。实验中发现,前端窄脉宽信号传输放大至第二级预放大器时,波形就因 ASE 发生了明显的畸变,出现了一个约 100 ns 的本底,主峰与本底幅值之比即信号对比度已下降了 3 倍,已不可能通过后续放大级在靶面处获得窄脉冲输出。为在靶面处获得良好的窄脉冲输出,必须对系统中的 ASE 加以抑制。

为在靶面上得到高信号对比度的放大脉冲,需要对系统中的 ASE 进行有效的控制。一般在惯性约束聚变(ICF)驱动器中使用非线性光学(包括受激拉曼散射和受激布里渊散射)、饱和增益开关和饱和吸收体等方法压缩脉宽<sup>[1~5]</sup>。但上述方法往往很复杂,对放大过程中 ASE 抑制能力有限。

在激光技术中,电光开关常被用来产生短脉冲<sup>[6~14]</sup>。本文基于该原理,建立了一种抑制准分子激光放大链 ASE 的方法。针对高功率准分子激光 MOPA 系统,对紫外波段电光开关进行了一系列的研究,研制出适用于该系统的高消光比电光开关,并应用于单路 MOPA 系统的 ASE 控制,最终在靶面获得了良好的窄脉宽放大激光脉冲。

## 2 电光削波开关

### 2.1 电光开关结构设计

电光开关的工作原理如图 1 所示。起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_2$  正交放置。若在电光晶体 PC 上加载半波电压,光束偏振面将旋转  $90^\circ$ ,从检偏器透出。通过控制晶体电压可以控制光路的通断。

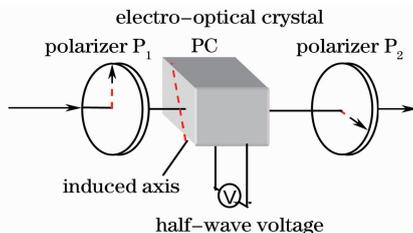


图 1 电光开关原理图

Fig. 1 Principle of electro-optical switch

图 2 是电光开关的结构示意图。利用一台放电抽运 308 nm XeCl 准分子激光器进行电光削波原理性实验研究,光束发散角为 5 mrad。主光路通过起偏器  $P_1$ 、检偏器  $P_2$  和电光晶体 PC 构成的电光开关。光电管、同步延时器和高压脉冲电源共同构成晶体驱动电路。驱动电路采用光触发,以减小抖动。电光削波开关输出激光脉冲经分束片后由能量计和光电管分别测量其能量和波形,用于开关状态调节和监测。

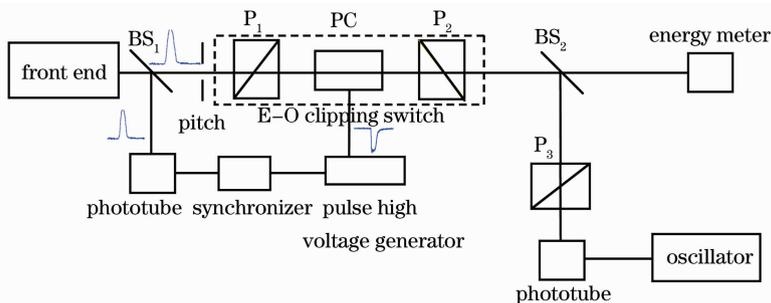


图 2 单电光开关结构图

Fig. 2 Schematic diagram of single electro-optical switch

电光晶体是电光开关中的关键部件,其性能对电光开关各项指标有决定性作用。KD\*P 晶体口径可以做得较大,易加工出合适纵横比,有利于消光比的提高和实际应用。实验中选取 KD\*P 晶体尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ ,半波电压为 3120 V,电容值约为 3 pF。KD\*P 晶体采用真空密封技术防止潮解,同时采用环状电极、纵向加电模式,电极引出技术合理,减小电极引起的电脉冲波形畸变。起偏器采用 BBO 晶体格兰-泰勒棱镜,口径为  $\Phi 15 \text{ mm}$ 。高压脉冲电源输出电阻为  $50 \Omega$ ,输出波形(图 2)半宽为

5.5 ns,上升沿 3.1 ns,下降沿 0.9 ns,抖动低于 1 ns。电光开关响应速度为 0.15 ns。

实验中测得了 KD\*P 电光开关对准分子激光脉冲在同步延时器示数 11.5~22.5 ns 范围、间隔 0.5 ns 下的削波波形,如图 3 所示。图 3(a)为未经削波的准分子激光器输出脉冲,其半宽为 6.4 ns,上升沿为 1.5 ns,下降沿为 8.3 ns;图 3(b)为输出脉冲被削波后的波形。从图中看到,输入波形已被电光开关削波成为短脉冲。随着延时的增大,输出脉冲幅值先增大后减小,在 16.5 ns 处达到最大值。

此时输出波形半宽为 4.1 ns, 上升沿为 0.9 ns, 下降沿为 1.3 ns. 与输入波形相比, 波形明显变窄, 上升沿和下降沿变陡, 更接近于平顶脉冲. 实验中测得消光比  $R$  为

$$R = \frac{A_M}{A_0} = 2073.2, \quad (1)$$

式中  $A_M$  为削波后波形最大幅值,  $A_0$  为零电压时输出波形幅值.

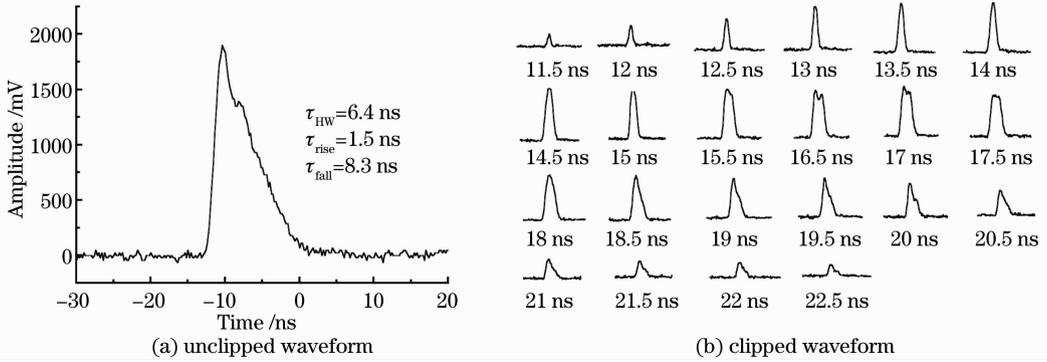


图 3 KD\*P 晶体电光开关削波波形

Fig. 3 Clipped waveform of KD\*P crystal electro-optical switch

### 2.2 级联双电光削波开关

单级 KD\*P 电光开关虽然较 BBO 晶体电光开关削波性能有较大提高<sup>[15]</sup>, 但对 MOPA 系统中 ASE 控制来说仍显不足. 若将多个电光开关级联起来工作, 其消光比理论上应等于各级削波开关对比度之乘积, 可望大大提高电光开关的消光比.

图 4 为级联电光削波双开关的结构示意图. 上一级电光开关的检偏器  $P_2$ , 同时作为下一级电光开

关的起偏器, 将两级电光开关级联起来. 两级电光开关分别采用独立的驱动电路, 以防止串扰. 起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_3$  均固定于电控平移台上, 可以分别或同时移入移出光路, 检偏器  $P_3$  单独移出时为单开关  $S_1$ , 起偏器  $P_1$  单独移出时为单开关  $S_2$ , 当起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_3$  均移入时为级联双开关  $S_1 + S_2$ . 这样既方便每一级电光削波开关光路调试, 又可以在单开关和双开关模式之间切换.

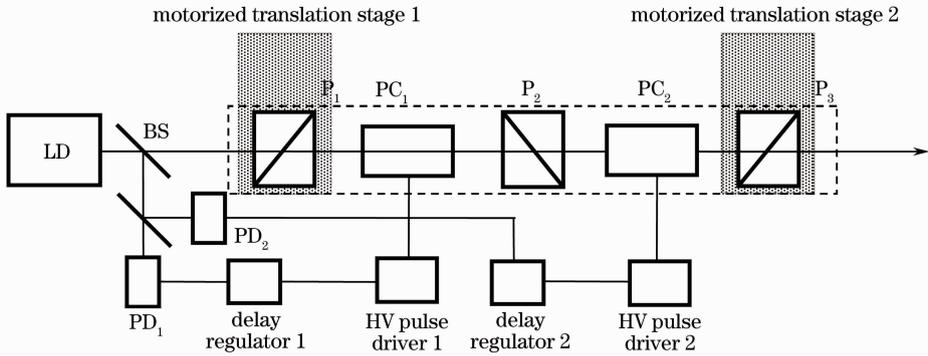


图 4 级联双电光削波开关结构示意图

Fig. 4 Schematic of cascaded double electro-optical switch for waveform clipping

## 3 电光削波开关在单路 MOPA 系统中的应用

### 3.1 系统光路布局

将电光削波开关应用于单路 MOPA 系统中, 用以抑制因 ASE 所造成的脉宽展宽现象, 从而保证前端种子光信号在 MOPA 系统中得到高保真放大, 以期在靶面得到高信号对比度的窄脉宽脉冲. MOPA 系统中采用无阶梯诱导非相干技术和像传

递技术, 图 5 是前两个放大级的光路布局. 在预放大器 AMP1 后的三程像面后增加了由  $L_1$  和  $L_2$  构造的  $4f$  像传递光路, 电光开关置于傅里叶面处. 此处光束发散角较小, 为 1 mrad, 有利于提高电光开关工作性能, 且可以减小对像面处光束质量的影响. 电光开关对小口径预放大器 AMP1 的放大波形进行削波, 在像传递透镜  $L_2$  后监测削波后的激光参数. 预放放电 AMP1 抽运脉宽为 180 ns, 采用三程放大模式, 对半宽约 7 ns 的前端信号来说, 占空比

约为 11.7%。已经过削波的激光脉冲波形将传输至后续放大级进一步放大。

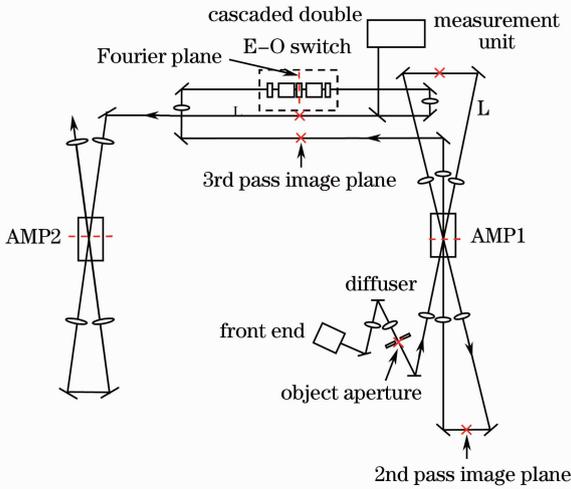


图 5 级联双电光开关预放大器削波实验光路布局图  
Fig. 5 Optical layout of clipping experiment of cascaded double electro-optical switch pre-amplifier

### 3.2 高对比度信号测试方法

由于双电光开关消光比较大(约上万倍),导通和关闭时其能量输出相差很大;同时 ASE 受到抑制后,信号对比度变得很高,这给其测试带来一定难度。实验中采用固定的测试光路,通过改变衰减片倍数来匹配不同大小的测量信号。测试单元光路布局如图 6 所示。分束镜  $BS_1$  从主光路取样进入测量单元, $M_1$  和  $M_2$  构成测量单元的引导光路,光束由

$BS_2$  分束进入能量计和光电管。实验中根据系统运行参数,将衰减片 1 设置为  $6661\times$ ,衰减片 2 设置为  $15\times$ 。

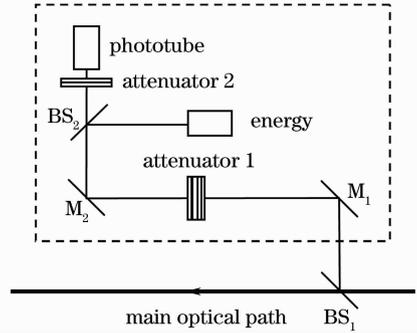


图 6 测量单元光路图

Fig. 6 Optical layout of measurement unit

### 3.3 低占空比预放大器 ASE 控制

首先针对准分子激光前端种子光经第一级预放大器 AMP1 三程放大后的激光脉冲信号,进行了单开关  $S_1$ 、 $S_2$  和级联双开关  $S_1 + S_2$  三种工作模式下的放大削波实验,分别测试了电光开关消光比和削波后的激光脉冲信号对比度。电光开关触发信号均由准分子激光器前端产生,与主光路激光脉冲信号同步。图 7 是不同工作条件下的削波波形。单开关  $S_1$  削波后波形半宽为 5.0 ns,上升沿 1.5 ns,下降沿 3.7 ns;单开关  $S_2$  削波后波形半宽为 5.7 ns,上升沿 2.0 ns,下降沿 3.9 ns;双开关  $S_1 + S_2$  削波后波形半宽为 4.2 ns,上升沿 1.9 ns,下降沿 2.1 ns。

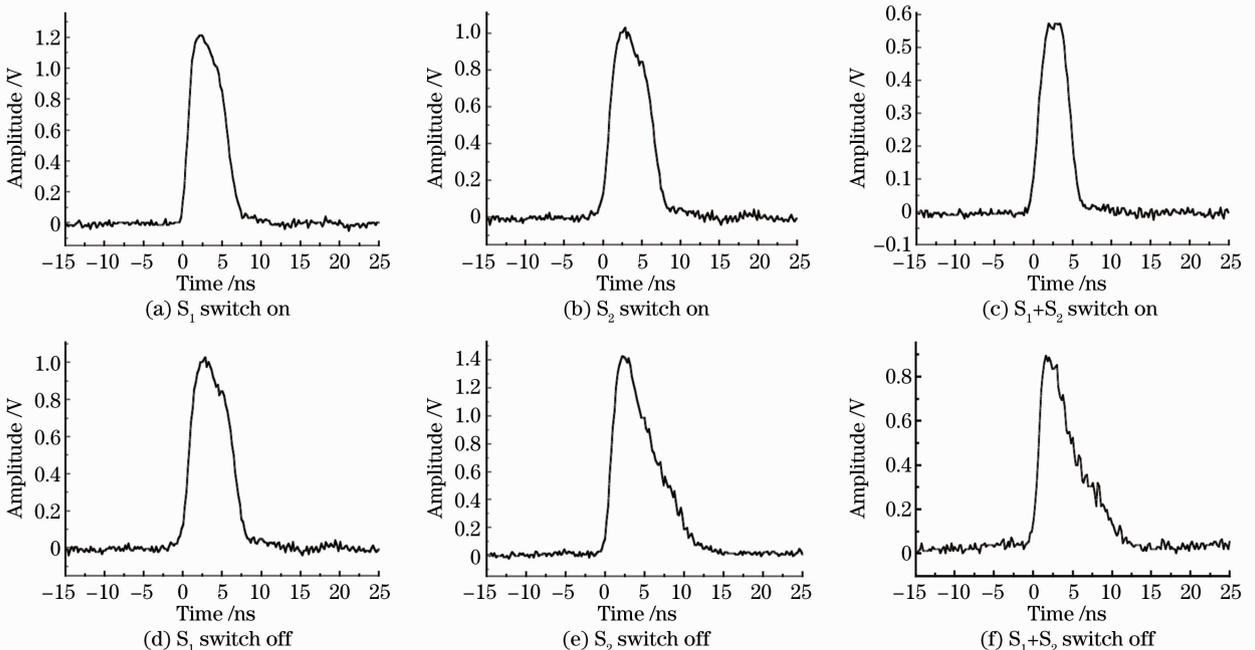


图 7 不同工作条件下电光开关输出波形

Fig. 7 Output waveforms of the electro-optical switch under different working conditions

双开关削波后脉宽较单开关为窄,下降沿变陡,这是双开关两次削波作用的结果。

电光开关消光比的测试结果如表 1 所示,在开关开启时同时使用衰减片 1 和衰减片 2;开关关闭时单开关仅使用衰减片 2,双开关不使用衰减片。

表 1 电光开关消光比测试

Table 1 Contrast ratio measurement of electro-optical switch

Switch mode	Switch on		Switch off		Switch contrast ratio
	Amplitude /mV	Width /ns	Amplitude /mV	Width /ns	
S <sub>1</sub>	1215	5.0	1590	7.6	5090
S <sub>2</sub>	1029	5.7	1427	7.5	4803
S <sub>1</sub> + S <sub>2</sub>	574	4.2	895	5.5	64080

电光削波开关应用所要达到的理想状态应是激光主脉冲有较高的透射率而主脉冲之外的 ASE 成分或其他光信号则应尽可能地被抑制,这样才能有利于后续放大级的放大,并最终在靶面获得高信号对比度的激光脉冲。信号对比度是衡量激光脉冲信

所给出的测量结果均为直接测量值,计算时则考虑了衰减倍数。表中计算了不同开关工作模式下的消光比,单开关的消光比均为数千倍,而采用级联双开关模式时提高了一个数量级,达到数万倍。

号的重要参数,它反映了 ASE 被抑制的程度和信号质量的好坏,定义为激光脉冲幅值与 ASE 本底幅值之比。表 2 是测量得到的各不同工作条件下的激光信号和 ASE 幅值以及计算所得相应的信号对比度,图 8 为相应条件下削波后的 ASE 波形。

表 2 削波后测量结果

Table 2 Parameters measured after clipping

Switch mode	Signal amplitude /mV	ASE amplitude /mV	Signal contrast ratio	Signal energy /mJ	Energy transmittance /%
S <sub>1</sub>	1215	61.5	131595	1.45	17.7
S <sub>2</sub>	1029	33.5	204602	1.39	17.0
S <sub>1</sub> + S <sub>2</sub>	574	44	1303436	0.60	7.3

Note: energy of 8.20 mJ without switch

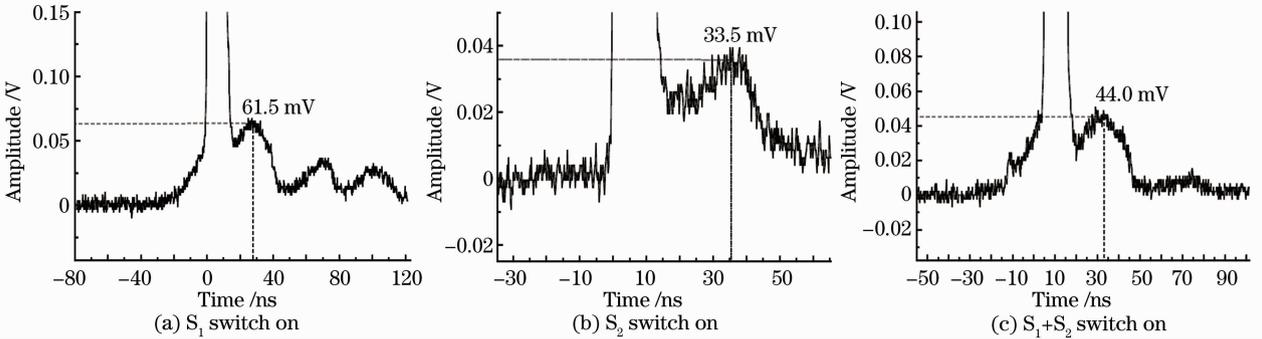


图 8 不同工作模式下削波后的 ASE 波形

Fig. 8 Clipped ASE waveforms under different switch modes

从表 2 中看到,单开关 S<sub>1</sub> 和单开关 S<sub>2</sub> 工作时,削波后的信号对比度均达到了 10<sup>5</sup> 量级,而采用双开关时消光比则超过了 10<sup>6</sup>,提高了一个量级,信号质量得到了很好的改善,十分有利于在后续放大级的进一步放大。

实验中同时对电光开关在放大削波时的能量透射率进行了直接测量,测量结果如表 2 所示。实验测得电光开关在不同工作模式下的透射率分别为:单开关 S<sub>1</sub> 为 17.7%,单开关 S<sub>2</sub> 为 17.0%,双开关

S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub> 为 7.3%。虽然双开关较单开关能量透射率有所下降,但大于两单开关透射率之乘积(2.9%)。这是因为第一级的检偏器同时作为第二级的起偏器,减少了第二级电光开关因起偏而损失的能量。

### 3.4 单路 MOPA 系统 ASE 控制

图 9 是准分子激光单路 MOPA 系统框图。从以往实验结果看来,由于 AMP1 采用三程放大,激光信号能量由纳焦量级放大到毫焦量级,增益达到 10<sup>6</sup>,ASE 对激光信号影响较大。故将电光开关置

于预放大器 AMP1 与 AMP2 之间,对 ASE 进行控制,提高激光脉冲信号对比度。同时考虑到在后续放大级处,激光脉冲已放大至较高能量,在光路中继续放置电光开关进行 ASE 控制有一定困难,故在此处信号对比度应提高到可以克服后续放大级引起的

对比度下降的程度,从而在靶面处得到放大的窄脉冲信号输出。这就对电光开关的削波性能提出了很高的要求。单开关削波性能略显不足,故采用级联双开关进行整个系统的 ASE 控制。

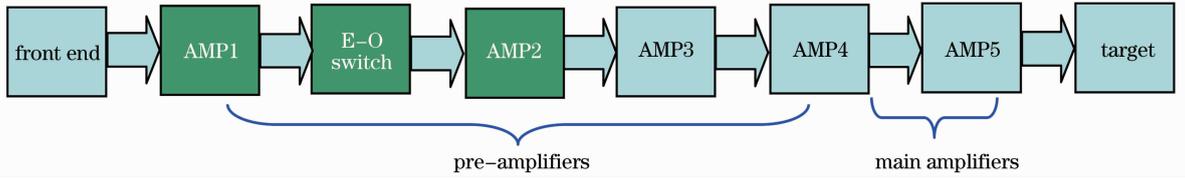


图 9 单路 MOPA 系统框图

Fig. 9 Schematic of single channel MOPA system

采用上述的光路设置进行了单路 MOPA 系统实验,图 10 为某次实验中各放大级的典型输出波形,图 10(a)为 AMP1~AMP4 的输出波形,图 10(b)为 AMP5 输出波形。表 3 给出了 3 个发次的单路 MOPA 系统的输出参数,各发次输出激光脉

宽因放大情况不同而略有差别。系统输出脉宽最大为 10.17 ns,最小为 9.02 ns,相比输入脉冲略有展宽,这是由放大介质对激光信号的放大特性造成的。各放大级直至靶面均获得了良好的窄脉冲激光输出,系统中的 ASE 已得到有效的抑制。

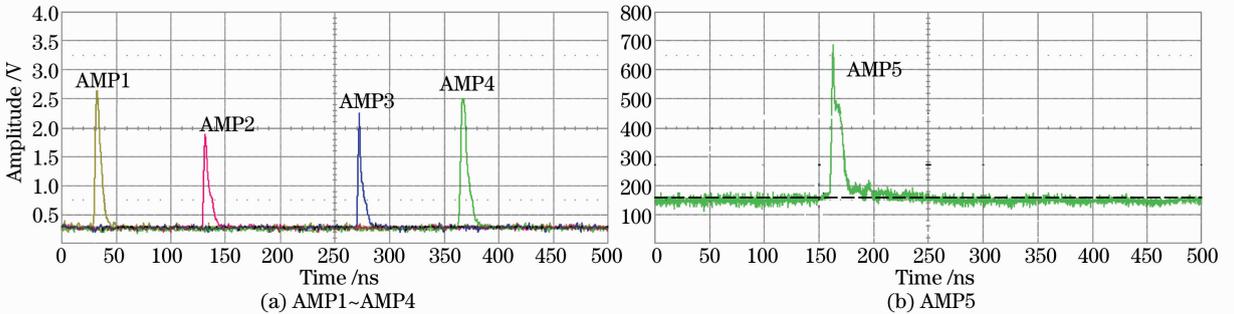


图 10 单路 MOPA 系统典型输出波形

Fig. 10 Typical output waveform of single channel MOPA system

表 3 单路 MOPA 系统输出参数

Table 3 Output parameters of single channel MOPA system

Round	Half width of laser pulse / ns				
	AMP1	AMP2	AMP3	AMP4	AMP5
1	5.23	3.98	4.19	5.41	9.02
2	5.59	4.65	3.67	6.73	10.17
3	5.20	4.57	3.52	6.98	9.39

## 4 结 论

为抑制高功率准分子单路 MOPA 系统中的 ASE 现象,在靶面上输出高保真放大激光脉冲信号,研制了高对比度的紫外电光削波开关。实验中采用 KD\*P 晶体电光开关,并进行了原理性实验,获得了单开关最高  $10^3$  量级和双开关  $10^4$  量级的消光比。将电光开关应用于 MOPA 系统中小口径预放大器 AMP1 的 ASE 控制,使得其输出信号对比

度由原来的几十倍提高到  $10^6$  量级。在高功率准分子单路 MOPA 系统放大实验中,各级放大器直至靶面都获得了良好的窄脉冲信号输出,为系统波形控制问题提供了一个有效的解决方案。

## 参 考 文 献

- 1 T. Lehecka, R. H. Lehmborg, A. V. Deniz *et al.*. Production of high energy, uniform focal profiles with the Nike laser[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(5-6): 485~491
- 2 A. V. Deniz, S. P. Obenschain. A KrF oscillator system with uniform profiles[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **106**(1-3): 113~118
- 3 M. S. Pronko, A. V. Deniz, V. Yun *et al.*. Nanosecond switching, high-contrast Pockels cell with plasma electrodes[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1996. 435~436
- 4 S. P. Obenschain. The Nike KrF laser facility performance and initial target experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 1996, **3**(5): 2098~2107
- 5 Guan Haibing, Ye Yunxia, Lu Jinzhong *et al.*. Effect of amplified spontaneous emission on residual stress of 7050 aluminum alloy by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2121~2125

管海兵, 叶云霞, 鲁金忠 等. 放大自发辐射对激光强化 7050 铝

- 合金残余应力的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2121~2125
- 6 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun *et al.*. Research on repetition rate plasma Pockels cell with 20 mm aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1772~1775  
张雄军, 吴登生, 张君等. 20 mm 孔径重复频率等离子体电光开关研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1772~1775
- 7 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
- 8 Meng Shaoxian, Gu Zhongming, 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
- 9 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zheng Kuixing *et al.*. Electro-optical switch with 280 mm×280 mm aperture driven by one-pulse process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 254~258  
张雄军, 吴登生, 郑奎兴等. 280 mm×280 mm 口径单脉冲过程电光开关[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 254~258
- 10 Lan Xinju. *Laser Technology* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. 6~21  
蓝信钜. 激光技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1995. 6~21
- 11 He Zhongwu. *Research on High Extinction Rate Electro-Optical Switch Technology* [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2002  
何忠武. 高消光比电光开关技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2002
- 12 Li Shichen, Ni Wenjun, Yang Tianxin *et al.*. Studies on crystal KTP(KTiPO<sub>4</sub>) electro-optic switch[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(2): 95~98  
李世忱, 倪文俊, 杨天新等. KTP(KTiPO<sub>4</sub>)晶体电光开关研究[J]. 光电子·激光, 1999, **10**(2): 95~98
- 13 Lu Xiuquan, Chen Shaohu. KTP electro-optic switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(4): 321~324  
卢秀权, 陈绍和. KTP 电光开关[J]. 中国激光, 1999, **26**(4): 321~324
- 14 Ren Gang, Zheng Jianguang, Cai Bangwei *et al.*. Influence of off-axis-light on depolarization loss of electro-optical crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 59~62  
任钢, 郑建刚, 蔡邦维等. 离轴光线对电光晶体退偏的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 59~62
- 15 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

栏目编辑: 宋梅梅