

文章编号 1004-924X(2013)01-0013-07

# 由级联紫外电光开关控制准分子激光的自发辐射放大

胡 云\*, 赵学庆, 薛全喜, 王大辉, 郑国鑫

(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:**考虑高功率准分子激光系统的自发辐射放大(ASE)会导致主脉冲信号对比度下降,引起波形展宽和畸变,本文开展了级联双电光开关的研究来抑制 ASE 的产生并提高激光脉冲信号的信号对比度。探讨了电光开关的级联工作模式,分析了影响电光开关削波对比度的因素,进而提出采用级联工作方式来大幅度地提高削波对比度。在单电光开关的基础上,设计了级联电光削波的光路布局。其中,前一级电光开关的检偏器作为后一级的起偏器,电路则采用分立式以避免相互之间的串扰。采用级联双电光开关对低占空比预放大器进行了 ASE 控制实验。实验结果显示,级联双电光开关的削波对比度达到了  $10^4$  量级,而预放大器的放大输出信号对比度提高到  $10^6$  量级,此结果有利于激光脉冲信号在系统中后续放大级的进一步放大。

**关键词:**高功率激光器;准分子激光器;级联电光开关;自发辐射;对比度

**中图分类号:**TN248.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0013

## Suppression of ASE from excimer laser using cascaded UV electro-optical switch

HU Yun\*, ZHAO Xue-qing, XUE Quan-xi, WANG Da-hui, ZHENG Guo-xin

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

\* Corresponding author, E-mail: huyun@mail.ustc.edu.cn

**Abstract:** A cascaded electro-optical(E-O) switch was studied to suppress Amplified Spontaneous Emission (ASE) and promote the signal contrast of the laser pulse, because the ASE could decrease the signal contrast ratio and widen the waveform and distortion in a high power excimer laser severely. The cascaded mode of the E-O switch was explored, the factors that effect on signal contrast ratio of the E-O switch were analyzed, then the work mode using the E-O switch cascaded was proposed to promote the contrast ratio of the switch. On the basis of a single switch, the cascaded E-O switch layout was designed. The analyzer of the first switch was used as the polarizer of the following one, and the driving power supply was installed discretely to avoid the crosstalk. An experiment on ASE suppression for the low duty cycle of a pre-amplifier was performed using a cascaded double E-O switch. The results show that the contrast ratio of the cascaded switch reaches  $10^4$  level and the signal contrast ratio of the pre-amplifier output pulse reaches  $10^6$  level, which is beneficial to the amplification of laser pulse signals in following amplifier stages of the system.

**Key words:** high power laser; excimer laser; cascaded electro-optical switch; spontaneous emission; contrast ratio

收稿日期:2012-06-08;修订日期:2012-08-29.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM1007)

## 1 引言

高功率准分子激光系统中采用光学角多路技术放大,其预放大器 and 主放大器均是长脉冲放大器。经过编码后各级放大器的占空比较高,而编码前的小口径预放大器占空比则较低,前级产生的自发辐射放大(Amplified Spontaneous Emission, ASE)经放大器后被持续放大,不仅影响放大器的能量提取效率,而且会严重影响系统输出激光的信号对比度,进而影响精密物理实验的顺利开展<sup>[1-6]</sup>。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>[1-2]</sup>,这些方法比较复杂,且对放大过程中 ASE 的抑制能力有限。

在激光技术中,电光开关削波常作为一种产生短脉冲的方法。紫外波段的电光开关在国外准分子激光系统中已有所用,而在国内应用较少,且仅限于单台激光器的短脉冲控制<sup>[7-11]</sup>。本课题组曾利用一级电光削波开关研究了准分子激光系统种子光脉冲控制及放大链 ASE 的抑制方法,获得了良好的结果<sup>[12]</sup>。

在电光削波开关的研制过程中发现,电光开

关的削波对比度与所采用的起偏器、检偏器和电光晶体的品质有关,并且还受到系统光路的准直精度和光束质量的影响<sup>[12]</sup>。由于受晶体生长和切割技术的限制,电光开关的参数与理想设计存在一定偏差,而且在实际应用中晶体上施加的电场难以做到非常均匀,系统的准直精度、光束质量等也不可能是理想状态。综合考虑各种因素优化后,单个电光开关的削波对比度虽有较大提高,但对于具有多个放大级的准分子放大链来说,其削波能力仍显不足。为获得更高的削波对比度,本文探讨了电光开关的级联工作模式,并结合编码前占空比低的预放大器进行了相关的实验研究。

## 2 电光削波开关工作原理和结构

### 2.1 电光削波开关工作原理

电光开关的工作原理基于偏振光的特性,如图 1 所示。起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_2$  垂直放置;电光晶体光轴与入射光平行,感应轴与起偏方向成  $45^\circ$ 。若电光晶体不加电,则入射光不能通过电光开关。在晶体上加半波电压后,偏振光的偏振面将旋转  $90^\circ$ ,从  $P_2$  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。

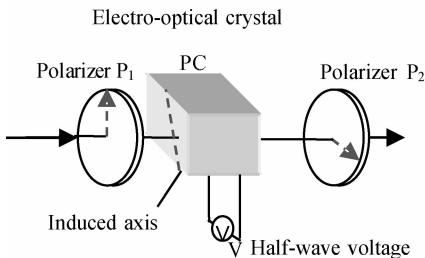


图 1 电光开关原理图

Fig. 1 Principle of electro-optical switch

### 2.2 级联双电光削波开关结构

电光开关级联工作模式下的削波对比度理论上应等于各级削波开关对比度之乘积,这可大大提高电光开关的削波对比度;但其总的能量透过率会随级数的增加而下降,同时其复杂度和调试难度也会相应增加。综合考虑各因素可知,级联电光开关以 2~3 级为宜,本文构建了两级电光开关以研究级联技术。

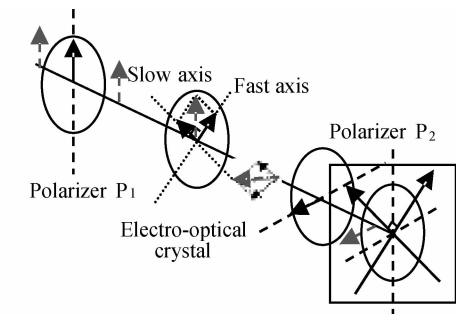


图 2 为级联电光削波双开关的结构示意图。起偏器  $P_1$ 、检偏器  $P_2$  和电光晶体  $PC_1$  构成第一级电光开关;检偏器  $P_2$ 、检偏器  $P_3$  和电光晶体  $PC_2$  构成第二级电光开关。其中,检偏器  $P_2$  作为第二级的起偏器,将两级开关级联起来。光电管  $PD_1$ 、延迟器 Delay regulator 1 和高压脉冲电源 HV pulse driver 1 构成第一级电光开关的同步触发和高压脉冲驱动系统;光电管  $PD_2$ 、延迟器 Delay regula-

tor 2 和高压脉冲电源 HV pulse driver 2 构成第二级电光开关的同步触发和高压脉冲驱动系统。P<sub>1</sub> 和 P<sub>3</sub> 均固定于电控平移台上,可以分别或同时移出移入光路并与其他开关元件构成不同的工作模式:检偏器 P<sub>3</sub> 单独移出时为单开关 S<sub>1</sub>,起偏器 P<sub>1</sub> 单独移出时为单开关 S<sub>2</sub>,当起偏器 P<sub>1</sub> 和检偏器 P<sub>3</sub> 均移入时为级联双开关 S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub>。系统调试时,分别对单开关 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 进行调试,调试过程中应保持检偏器 P<sub>2</sub> 状态不变,以便两级开关能同时调节至最佳工作状态。调试完成后,在工作时根据需要使系统在单开关和双开关模式之间切换。

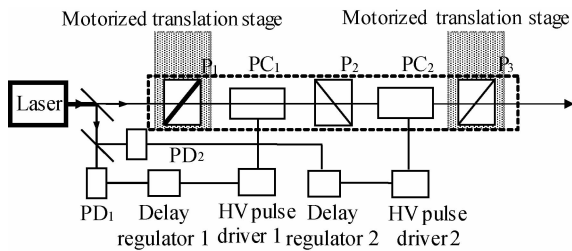


图 2 级联双电光开关结构示意图

Fig. 2 Schematic of cascaded double electro-optical switch for waveform clip

### 3 级联双电光开关削波实验研究

#### 3.1 实验光路布局

图 3 为级联双电光开关在单路高功率准分子激光 MOPA 系统前端到预放大器 AMP<sub>1</sub> 的光路

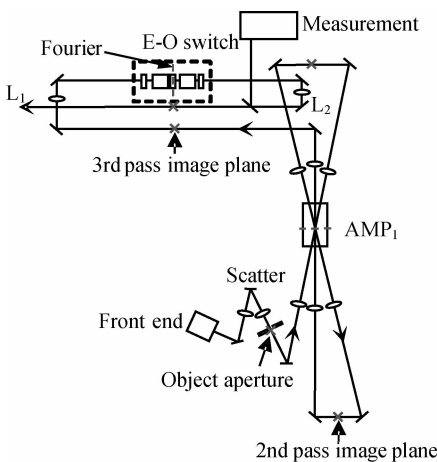


图 3 级联双电光开关预放大器削波实验光路布局图

Fig. 3 Optical layout of cascaded double electro-optical switch

图。激光系统采用无阶梯诱导非相干技术和像传递技术,在预放大器 AMP<sub>1</sub> 后的三程像面后增加了由透镜 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 构造的 4f 像传递光路。级联双电光开关置于像传递结构的傅里叶面,有利于提高电光开关的工作性能。电光开关对小口径预放大器 AMP<sub>1</sub> 的放大波形进行削波,在像传递透镜 L<sub>2</sub> 后监测削波后的激光参数。前端种子光源激光波形脉宽约 7 ns,AMP<sub>1</sub> 放电波形脉宽约 180 ns,三程放大模式的时间占空比约为 11.7%。

#### 3.2 高对比度信号测试方法

由于双电光开关的削波对比度较大(约上万倍),触发和关闭时其能量输出将相差很大,这给其测试带来一定难度。实验用衰减片将激光脉冲幅值衰减至适当的量级,使能量计工作在合适的量程,光电管工作在线性范围。这样,削波对比度 = (开关开启时幅值 / 开关关闭时幅值) × 衰减倍数,可以测量对比度的极大值。

为测量削波后的信号对比度,采用线性范围较大、响应时间较快的光电管。首先通过衰减片测量经削波后激光脉冲的全波形;再去掉衰减片测量 ASE 本底幅值,即可得到信号对比度:信号对比度 = (主脉冲幅值 / ASE 本底幅值) × 衰减倍数。

测试装置的光路布局如图 4 所示。分束镜 BS<sub>1</sub> 从主光路取样进入测量单元,取样率为 50%。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 构成测量单元的引导光路,光束由 BS<sub>2</sub> 分束进入能量计和光电管,BS<sub>2</sub> 的分束比为 1 : 1。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 之间的衰减片 1 先保证能量计工作在合适的量程,在光电管前的衰减片 2 将信号衰减至光电管的线性范围。实验中,根据系统运行参数将衰减片 1 设置为 6 661 倍,衰减片 2 设置为 15 倍。

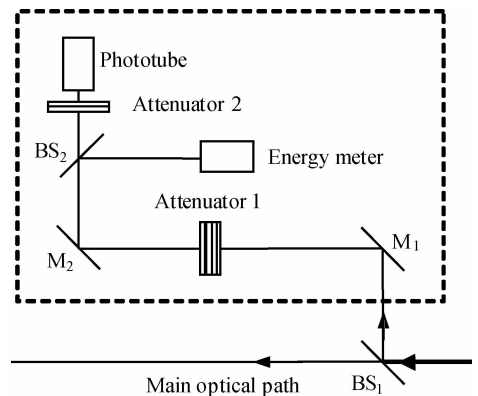


图 4 测量单元光路图

Fig. 4 Optical layout of measurement unit

### 3.3 低占空比预放大器 ASE 控制

针对准分子激光前端种子光经第一级预放大器 AMP<sub>1</sub> 三程放大后的激光脉冲信号,进行了单开关 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 和级联双开关 3 种工作模式下的放大削波实验。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。采用图 4 所示测试单元测量削波后电光开关的削波对比度和信号对比度。电光开关处于工作状态时,相当于一个选通开关,在驱动脉冲电压加载期间,开关达到最大透过率,让信号通过,其余时间则处于高阻尼的截止状态,可抑制噪声;电光开关处于关闭状态时,在整个时间段对信号光保持高阻尼状态,相当于一个大倍数的衰减器。图 5 是电光开关处于不同工作模式和工作状态下的削波波形。其中图 5(a)、(b)、(c) 是不同模式下开关打开时的削波波形。单开关 S<sub>1</sub> 削波后波形半宽为 5.0 ns, 上升沿

为 1.5 ns, 下降沿为 3.7 ns; 单开关 S<sub>2</sub> 削波后波形半宽为 5.7 ns, 上升沿为 2.0 ns, 下降沿为 3.9 ns; 双开关 S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub> 削波后波形半宽为 4.2 ns, 上升沿为 1.9 ns, 下降沿为 2.1 ns。双开关削波的脉宽较单开关的窄, 下降沿明显变陡, 这是经双开关两次削波作用, 波形尾部被“削掉”的结果。图 5(d)、(e)、(f) 是不同模式下开关关闭时的输出波形。从图中看到, 输出波形均较宽, 没有明显的削波效果, 可以视为对输入波形的衰减作用。

电光开关对比度的测试结果如表 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。所给出的测量结果均为直接测量值, 计算时还考虑了衰减倍数。表 1 计算了不同开关工作模式下的削波对比度, 单开关的削波对比度均为数千倍, 而在级联双开关模式下提高了一个数量级。

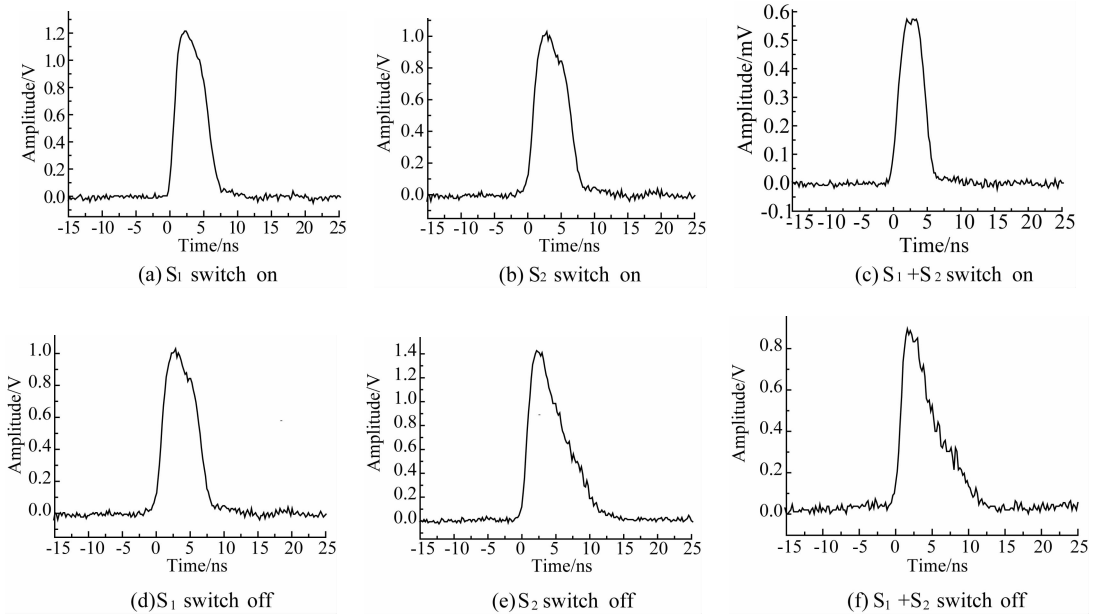


图 5 不同工作条件下电光开关输出波形

Fig. 5 Output waveforms of switch under different working conditions

表 1 电光开关削波对比度测试

Tab. 1 Measurement of contrast ratios in different electro-optical switch modes

Switch mode	Switch on		Switch off		Contrast ratio
	Amplitude/mV	Width/ns	Amplitude/mV	Width/ns	
S <sub>1</sub>	1 215	5.0	1 590	7.6	5 090
S <sub>2</sub>	1 029	5.7	1 427	7.5	4 803
S <sub>1</sub> + S <sub>2</sub>	574	4.2	895	5.5	64 080

应用电光削波开关所要达到的理想状态是激光主脉冲有较高的透过率,而主脉冲之外的 ASE 成分或其它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号的重要参数,它反应了 ASE 被抑制的程度和信号质量的好坏。表 2 是测量得到的不同工作条件下的激光信号和 ASE 幅值以及相应的信号对比度,图 6 为相应条件下削波后的 ASE 波形。由图见,ASE 在主峰两侧造成了一个约 100 ns 左右的本底,其最大值出现在主峰后侧约 10 ns 左右,图中给出了其幅值测量值。为保证主脉冲的高保真放大,必须抑制该本底。

从表 2 中看到,单开关  $S_1$  和单开关  $S_2$  工作时,削波后的信号对比度均达到了  $10^5$  量级,而采用双开关时削波对比度则超过了  $10^6$ ,提高了一个量级,信号质量得到了很好的改善。

实验还对电光开关在放大削波时的能量透过率进行了直接测量,测量结果见表 2。实验测得电光开关在不同的工作模式下的透过率分别为:单开关  $S_1$  为 17.7%,单开关  $S_2$  为 17.0%,双开关  $S_1 + S_2$  为 7.3%。由此可知,虽然双开关较单开关的能量透过率有所下降,但大于两单开关透过率之乘积(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。

表 2 削波后测量结果

Tab. 2 Parameters after clipping

Switch mode	Amplitude/mV		Signal contrast ratio	Signal energy/mJ	Energy transmittance/%
	Signal	ASE			
$S_1$	1 215	61.5	131 595	1.45	17.7
$S_2$	1 029	33.5	204 602	1.39	17.0
$S_1 + S_2$	574	44	1 303 436	0.60	7.3

注:不加开关时能量为 8.20 mJ

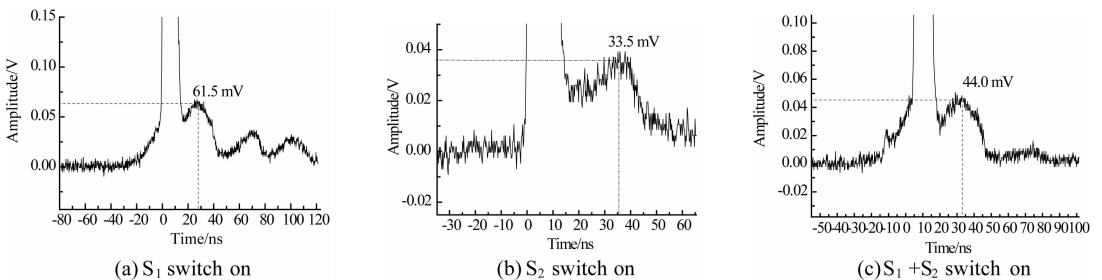


图 6 不同工作模式削波后的 ASE 波形

Fig. 6 Clipped ASE waveforms under different switch modes

## 4 分析与讨论

从实验结果看来,级联双电光开关的削波对比度较单开关提高了一个数量级,对 ASE 的抑制能力大大增加,但是较理论值即两个开关单独使用时的削波对比度之积小了两个数量级。其原因可能来自两个方面:其一为电光开关并不是理想开关,晶体中的一些微量杂质、缺陷会给偏振光带来一定的退偏效果;另一方面,

起偏器和检偏器的消光比为  $10^6 : 1$ ,且起偏、检偏器的消光比对其相对位置较为敏感,很小的误差将导致其消光比低于此值。通过优化级联双电光开关参数还有望进一步提高其削波性能。

能量透过率是关系电光开关实际应用的一个重要参数。能量透过率越高,损失的能量越小,电光开关对激光系统主光路增益造成的影响越小。不过,由于在激光放大器中,非饱和放大时激光介质增益随光强的减小而增大,故当输入信号幅值略

有差别时,经过多级放大器后,此差别将逐渐被“抹平”。因此,输入信号幅值的小量衰减对系统的输出能量影响并不大。

## 5 结 论

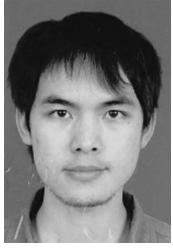
为获得更高的信号对比度,本文结合高功率准

分子激光 MOPA 系统前端及第一级预放大器 AMP<sub>1</sub> 光路设计,对级联双电光开关性能及其应用进行了实验研究。研究表明,该工作模式下电光开关削波对比度达到了 10<sup>4</sup> 量级,比单开关模式下提高了一个数量级;AMP<sub>1</sub> 放大削波后的信号对比度达到了 10<sup>6</sup> 量级,为激光脉冲信号的后续放大提供了有利条件。

## 参考文献:

- [1] LEHECKA T, LEHMBERG R H, DENIZ A V, *et al.*. Production of high energy, uniform focal profiles with the Nike laser [J]. *Optics, Comm*, 1995, 117 :485-491.
- [2] OBENSCHAIN S P. The Nike KrF facility. proc of excimer lasers for fusion & industrial application [C]. *Erice-Sicily, Italy, Nov. 29-Dec. 4, 1997*.
- [3] DENIZK P M S, GOLDHAR Y V. Nanosecond switching, high-contrast Pockels cell with plasma electrodes [C]. *CLEO'96*, 1996, 122:435-436.
- [4] DENIZ A V, OBENSCHAIN S P. A KrF oscillator system with uniform profiles[J]. *Optics, Comm*, 1994, 106:113-118.
- [5] 赵学庆,刘晶儒,易爱平,等. 平滑化窄脉冲高功率准分子激光放大技术[J]. *光学精密工程*, 2011(2): 397-406.  
ZHAO X Q, LIU J R, YI A P, *et al.*. Amplification of high power short pulse excimer laser with beam smoothing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011 (2):397-406. (in Chinese)
- [6] 薛全喜,赵学庆,华恒祺,等. 高功率 XeCl 准分子激光系统前端平滑实验[J]. *光学精密工程*, 2011(2): 332-339.  
XUE Q X, ZHAO X Q, HUA H Q, *et al.*. Seed beam smoothing for high power XeCl excimer laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011(2):332-339. (in Chinese)
- [7] 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):675-680.  
XIANG SH Q, DONG J X, MANG Y P, *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, 22:675-680. (in Chinese)
- [8] 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(10): 930-934.  
MENG SH X, GU ZH M, MANG Y P, *et al.*. Chopped waveshape of electro-optic gates and short-en pulses in laser amplification process[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998(10):930-934. (in Chinese)
- [9] 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):95-98.  
LI SH CH, NI W J, YANG T X, *et al.*. Studies on crystal KPT(KTiPO<sub>4</sub>) electro-optic switch[J]. *Journal of Opto-Electronics • Laser*, 1999(10):95-98. (in Chinese)
- [10] 卢秀权,陈绍和. KTP 电光开关[J]. *中国激光*, 1999, 26:321-324.  
LU X Q, CHEN SH H. KTP electro-optical switch [J]. *Chinese J • Lasers*, 1999, 26:95-98. (in Chinese)
- [11] 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):59-62.  
REN G, ZHENG J G, CAI B W, *et al.*. Influence of off-axis-light on depolarization loss of electro-optical crystal [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004(16):59-62. (in Chinese)
- [12] 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(11): 111401-1-111401-5.  
HU Y, ZHAO X Q, XUE Q X, *et al.*. BBO electro-optical switch for UV laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010 (11): 111401-1-111401-5. (in Chinese)

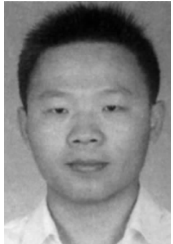
## 作者简介:



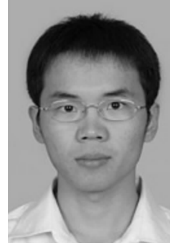
胡云(1983—),男,四川广汉人,助理研究员,2005年,2008年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士学位,主要从事高功率激光技术和激光等离子体物理方面的研究。E-mail: huyun@mail.ustc.edu.cn



赵学庆(1966—),男,河北衡水人,博士,高级工程师,1989年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高功率激光技术和激光等离子体物理方面的研究。E-mail: zxq.hb@163.com



薛全喜(1980—),男,山东日照人,博士研究生,助理研究员,2004年于兰州大学获得学士学位,2007年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高功率激光技术和激光等离子体物理方面的研究。E-mail: quanxixue@163.com



王大辉(1986—),男,河南商丘人,助理研究员,2007年于清华大学获得学士学位,2010年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: chsslw@163.com



郑国鑫(1979—),男,陕西安康人,硕士,助理研究员,2003年于兰州大学获得学士学位,主要从事高功率激光技术的研究。E-mail: zgxlean@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)