

文章编号: 1001-3806(2010)01-0017-03

## 1064nm 激光诱导等离子体开关控制 355nm 脉宽可调输出

张芳沛<sup>1</sup>, 楼祺洪<sup>2</sup>, 李红霞<sup>2</sup>, 韩文杰<sup>1</sup>, 邢宇华<sup>1</sup>, 董景星<sup>2</sup>, 沈 严<sup>1</sup>, 薛海中<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047; 2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 为得到脉宽可控的 355nm 紫外脉冲激光输出, 采用 1064nm 脉冲激光诱导等离子体开关技术, 控制 355nm 激光脉冲宽度, 在激光电离 Cu 小孔内壁表面及空气击穿共同作用下, 获得了 2.8ns ~ 10ns 的脉宽可调输出。讨论了 1064nm 单脉冲输出能量对脉宽压缩的影响, 在无延时情况下得到了脉宽最短达 2.8ns 的脉冲激光输出。在此基础上, 保持 1064nm 单脉冲输出能量不变, 采用延时装置改变两光路间的光程差, 以控制等离子体开关相对于 355nm 激光脉冲的形成时间, 最终得到脉宽可调的脉冲激光输出。结果表明, 等离子体开关结构简单、操作方便、适用范围广, 是一种较好的脉冲整形手段。

**关键词:** 激光技术; 脉宽可调; 等离子体开关; 脉冲压缩

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.005

### Controlling the width-tunable 355nm pulses by means of 1064nm laser-induced plasma shutter

ZHANG Fang-pei<sup>1</sup>, LOU Qi-hong<sup>2</sup>, LI Hong-xia<sup>2</sup>, HAN Wen-jie<sup>1</sup>, XING Yu-hua<sup>1</sup>, DONG Jing-xing<sup>2</sup>, SHEN Yan<sup>1</sup>, XUE Hai-zhong<sup>1</sup>

(1. No. 27 Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China; 2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** In order to obtain the width-tunable 355nm pulses, a 1064nm laser-induced plasma shutter was used to control the pulse width of 355nm pulses. The width tunable from 2.8ns to 10ns was obtained under the interaction of ionization of the Cu pinhole and the atmospheric breakdown. Firstly, the effect of 1064nm pulse energy on pulse compression was discussed, and the shortest output pulse with a width of 2.8ns was obtained without delay time between two laser paths. Subsequently, adopting the device for delay-time to vary the optical differences between two paths, the width-tunable 355nm laser pulses were obtained. Experimental results indicate that laser-induced plasma shutter is a better pulse-shaping means with simple configuration, convenient operation, and widespread applications.

**Key words:** laser technique; width-tunable pulse; plasma shutter; pulse compression

## 引 言

脉冲整形技术在非线性光学、激光加工及激光惯性约束核聚变等领域中有广泛的应用。在非线性光学中, 激光脉冲波形对利用非线性晶体进行倍频的转换效率有很大的影响, 激光脉冲前后沿的扩展部分不仅不能转换成 2 次谐波, 而且还会对晶体产生严重损伤。因此, 有必要对倍频用激光进行脉冲整形, 压缩脉冲宽度, 提高峰值功率。在激光加工领域, 加工的条件与脉冲能量、脉冲宽度、脉冲个数、聚焦参量及输出光束质量等因素有关<sup>[1]</sup>。采用高峰值功率、窄脉宽和高光束

质量的激光脉冲可获得较好的激光打孔、切割、开槽和雕刻效果。为了对激光脉冲的宽度和形状进行控制, 人们已经进行了大量的研究<sup>[2-4]</sup>。

目前应用较广泛的几种获得短脉冲的激光脉冲整形技术主要包括: 电光开关<sup>[5]</sup>、激光诱导等离子体开关、锁模<sup>[6-7]</sup>、调 Q 和自感应衰变。用电光开关对激光脉冲进行削波, 由于只利用了驱动电脉冲的前沿, 对电脉冲的要求大大降低, 既降低了对驱动电脉冲的要求, 而且提高了信噪比, 因此, 电光开关已成为激光系统的重要单元<sup>[5]</sup>。但是, 为控制电光开关时间, 获得较好的脉冲压缩效果, 需设计特殊的同步方案以解决激光放电系统与电光开关驱动电路的精确同步控制问题, 这是一项难度相对较高的工作。此外, 经锁模和自感应衰变技术整形后输出的脉冲能量太低, 因此, 需对其进行放大才能应用。而等离子体开关结构简单、操作

作者简介: 张芳沛(1977-), 男, 博士, 主要从事脉冲整形、激光雷达和全光纤化脉冲光纤放大器的研究。

E-mail: zhangfangpei@163.com

收稿日期: 2008-12-01; 收到修改稿日期: 2008-12-16

方便,且脉冲整形效果好,是获得高质量短脉冲比较好的方法<sup>[8-9]</sup>。

## 1 原理与装置

激光经透镜聚焦后引起空气击穿,在焦点区域等离子体开始形成,气体被快速加热。在入射光方向上,激光的辐射能极快地注入焦点区,被等离子体吸收,产生的等离子体沿着激光传播方向不断快速地增长并向四周扩散。等离子体波前沿传播速率是依靠激光的强度和等离子体的传播机制来确定的。因此,激光通过局部瞬时变化的等离子体区域时被强烈的吸收了,其折射率将发生快速的变化。折射率为:

$$n(x,t) = [1 - N(x,t)/N_c]^{1/2} \quad (1)$$

$$N_c = m_e \omega_0^2 / (4\pi e^2) \quad (2)$$

$$\Omega_p = (4\pi N_c e^2 / m_e)^{1/2} \quad (3)$$

式中, $N(x,t)$ 表示等离子体中电子的密度, $N_c$ 表示等离子体的频率 $\Omega_p$ 达到激光频率 $\omega_0$ 时的临界密度, $N_c$ 和 $m_e$ 分别表示电子的密度和电子的质量。当 $N(x,t) \ll N_c$ 时,等离子体对于激光是透明的,光束可以传输;当达到临界密度时,等离子体对于激光是不透明的,入射激光被截断。因此,对于一定脉宽的激光,脉冲前沿能够顺利通过;脉冲后沿则被阻挡,从而达到截断脉冲、压缩脉宽的目的。

实验装置如图1所示。SL454G型Nd:YAG脉冲

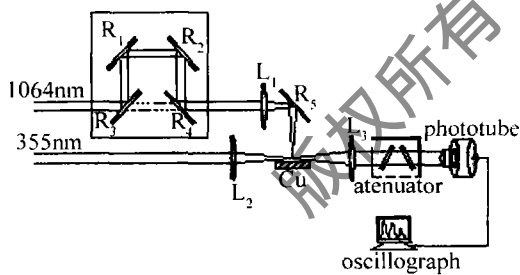


Fig. 1 Experimental setup

固体激光器(波长1064nm,重复频率30Hz,光束直径8mm,发散角1.5mrad)3倍频后剩余的1064nm脉冲激光,经透镜 $L_1$ ( $f=200\text{mm}$ ), $45^\circ$ 355nm全反射片 $R_5$ ,在透镜 $L_1$ 焦点处聚焦。如果在该透镜聚焦区域的激光功率密度超过355nm脉冲激光的空气击穿阈值,在该区域的大气分子将会产生迅速的电离,气体分子温度迅速升高,最终导致聚焦区域内的气体完全电离而形成等离子体。为抑制等离子体的扩散、提高等离子体密度,在焦点位置放置一厚度约1mm的Cu靶。由于Cu靶蒸气的一次电离势比空气的电离势低,并且在Cu靶表面形成激光吸收区所需要的光强比环境气体单纯的光学击穿所需的光强低2个~3个量级<sup>[10]</sup>,因此,在激光脉冲电离空气产生等离子体的同时,Cu靶

表面吸收激光能量,熔融气化电离也迅速形成等离子体,这些等离子体被一起约束于Cu靶范围内,缩短了到达临界等离子体电子密度的时间。同时,Nd:YAG脉冲固体激光器发出的3倍频355nm激光经透镜 $L_2$ ( $f=100\text{mm}$ )聚焦后沿着Cu靶表面通过等离子体开关,精密调节 $L_2$ ,使透镜 $L_1, L_2$ 两焦点完全重合。经等离子体开关压缩后的激光脉冲经透镜 $L_3$ ( $f=300\text{mm}$ )准直后由光电管(Thorlabs Det210)探测并输入Lecroy 9362型示波器。同光路连续可调衰减器用于控制激光光强,保护光电探测器。

## 2 实验结果

### 2.1 1064nm单脉冲能量对355nm脉宽的影响

在光路中未放置任何光学元件,355nm脉冲激光经衰减器衰减后,直接由光电探测管接收并输入示波器,得到355nm激光脉冲波形(见图2),脉冲宽度

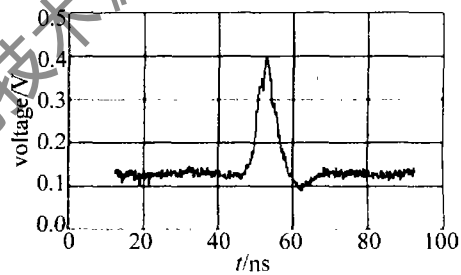


Fig. 2 Laser pulse of 355nm Nd:YAG laser

13.42ns。在能量逐渐增大的过程中,脉冲波形产生很多毛刺,并有双峰甚至多峰出现。这样的脉冲严重影响激光器的性能和应用,故需要对其进行整形。

在1064nm脉冲激光光路中未放置延时装置(如图1所示,由4片1064nm全反射片 $R_1 \sim R_4$ 组成),由小到大调节1064nm激光单脉冲输出能量,同时通过示波器监测接收到的脉冲信号的波形及脉宽的变化。在能量低于83mJ时,空气中始终未出现电火花,脉冲信号波形也未发生明显的变化。这说明,聚焦后的能量密度相对较低,在焦点区域无法达到激光表面空气击穿阈值。当输出能量达到83mJ时,在焦点区域的空气中出现若隐若现的电火花,并且伴有断断续续的“啪啪”声,表明此刻正处于等离子体产生的临界状态,产生的等离子体并不稳定。穿过等离子体的脉冲波形较先前并没有发生明显的改善,脉宽13.21ns,并没有出现明显的变窄。继续增大激光器输出能量,在焦点区域出现耀眼的闪光,表明此时空气已被完全击穿而产生稳定的等离子体,脉冲波形得到明显的改善,整个曲线变得十分平滑,先前的双峰现象也随之消失,后沿逐渐前移并出现很陡的下降沿。同时透过的激光脉冲能量逐渐下降,压缩后的脉宽随能量的增加逐渐

缩短。当单脉冲能量增加到 1064nm 脉冲激光的最大输出能量 367mJ 时,获得最短脉宽 2.8ns,脉冲波形如图 3 所示,355nm 单脉冲能量透过率约为 30%。图 4 为经等离子体开关压缩后的 355nm 脉冲宽度与 1064nm 单脉冲输出能量关系。

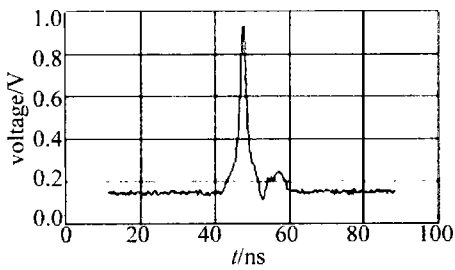


Fig. 3 Laser pulse corresponding to the shortest pulse width

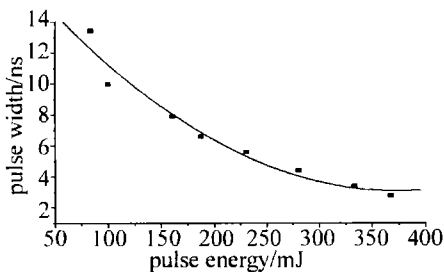


Fig. 4 Relationship between the shortened 355nm pulse widths and the 1064nm pulse energy

### 2.2 光路延时对脉宽控制的影响

在此基础上,保持 1064nm 单脉冲输出能量不变,在 1064nm 脉冲激光光路中放置一延时装置。由于 355nm 脉冲激光脉宽约 13ns,故调节全反片  $R_1, R_3$  及  $R_2, R_4$  之间的距离在 1.8m 范围内变化,以保证 1064nm 激光光路相对于 355nm 激光光路的延时控制在一个激光脉冲宽度范围内。图 5 为 1064nm 脉冲激光诱导等离子体开关控制 355nm 激光脉宽示意图。3

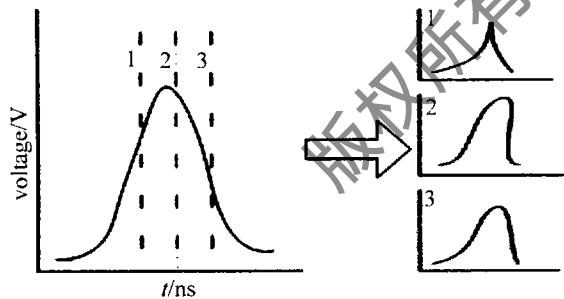


Fig. 5 Sketch map of 1064nm laser-induced plasma shutter to control 355nm pulse width

倍频 355nm 激光穿过 1064nm 脉冲激光击穿空气而产生的等离子体区域,调整两光路之间的光程差使 1064nm 激光相对于 355nm 激光产生延时,通过控制等离子体开关的形成时间以控制脉冲宽度。1,2,3 分别表示在脉冲的不同位置削波后的脉冲波形。其中,1 对应两光路之间无延时情况,脉冲前沿通过,而中、后沿被等离子体削掉,这与利用单个脉冲自身光电离产生等离子体并同时脉冲后沿削波方法相似<sup>[9]</sup>。2 对应等

离子体开关形成时间相对于脉冲滞后情形,脉冲前、中沿通过,而后沿则被截断。3 对应于两光路间的光程差接近一个脉冲宽度,几乎整个脉冲都可从等离子体中无损耗地穿过,此时得到的脉冲近似为原始脉冲。

首先,将全反片  $R_1, R_2$  分别紧靠全反片  $R_3, R_4$  放置,之后同时缓慢移动全反片  $R_1, R_2$ ,使得全反片  $R_1, R_3$  以及  $R_3, R_4$  之间的距离由 0 开始逐渐增大,即 1064nm 脉冲激光相对于 355nm 脉冲激光落后的光程差逐渐增大。作者发现,在两光路之间的光程差由 0 逐渐增大的过程中,355nm 激光脉冲前沿逐渐扩展,脉宽相应增加。当全反片之间距离超过 1m(即两光路间光程差超过 2m)后,355nm 脉冲波形变化趋于缓慢,接近原始脉冲形状,脉宽约 10ns。经分析,认为此时 1064nm 激光光路相对于 355nm 激光光路的延迟已接近 355nm 激光脉冲宽度,并且把脉冲激光击穿空气形成等离子体所需要的时间考虑在内,因此,355nm 脉冲激光在等离子体开关形成之前已经通过该区域,脉冲宽度并未发生变化。图 6 为两光路间延时逐渐增大时经等离子体开关控制的 355nm 脉冲激光波形变化,4

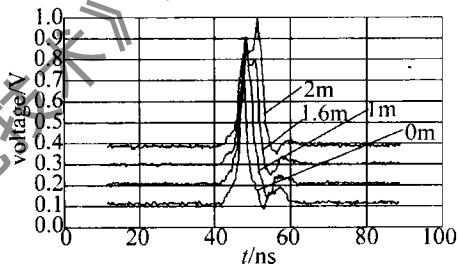


Fig. 6 Comparison of the shortened 355nm pulses at different time delays. 个波形分别对应于光程差为 0m, 1m, 1.6m 和 2m 时的脉冲波形。通过调整两光路之间延时,得到 355nm 脉冲激光 2.8ns ~ 10ns 的脉宽可调输出。

### 3 结论

利用 1064nm 脉冲激光诱导等离子体开关技术,控制 355nm 激光脉冲宽度,得到两光路在无延时情况下 355nm 压缩脉宽随 1064nm 单脉冲输出能量的变化关系,获得 2.8ns 的窄脉冲激光输出。通过调整 1064nm 光路中 4 个全反片的位置改变两光路间光程差,以控制等离子体开关相对于 355nm 激光脉冲的形成时间,得到 355nm 脉冲激光在 2.8ns ~ 10ns 范围内的可调输出。

该方法具有对待压缩激光要求低、结构简单易于研制、高重复频率运转的特点,且利用激光器 3 倍频转换后所剩余的 1064nm 抽运光产生等离子体开关控制 355nm 激光脉冲宽度,提高了激光器的利用率,因此,特别适用于倍频产生短波长激光的固体激光器件。

(下转第 40 页)

是因为电磁波被强烈地束缚在阱光子晶体中,只要阱光子晶体的厚度起了非常微小的变化就能导致电磁波位相的改变,这样就改变了束缚态的透射状态。同样从图6还可以看出,阱中的介质C的厚度变化对束缚态频率的移动大于阱空气层,这是因为阱中介质C的厚度变化导致电磁波位相变化大于阱空气层。

### 3 结 论

用传输矩阵法计算了不同介电常数和介质厚度对光子量子阱结构的传输特性。由于光子的束缚效应,在光子量子阱结构中出现了束缚态。通过微小地改变阱区和垒区介质的介电常数和厚度可改变束缚态的频率。

光子量子阱结构的各介质介电常数变化与束缚态频率的变化都呈良好的线性关系,但阱介质介电常数变化对束缚态频率的移动大于垒介质。各介质的介电常数变化越大,束缚态的频率偏移越大。

光子量子阱结构的各介质厚度变化与束缚态频率的变化也都呈良好的线性关系,阱介质厚度变化对束缚态频率的移动也大于垒介质,但不管是垒层还是阱层,介电层厚度的变化对束缚态频率的移动都大于空气层。各介质的厚度变化越大,束缚态的频率也偏移越大。

### 参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localities of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] CHEN H B, HU S M, GAO Y J. Properties of mirror symmetrical 1-D photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 531-533 (in Chinese).
- [4] YIN J L, HUANG X G, LIU S H. Photonic crystal field-sensitive polarizer and switch modulated by nematic liquid crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10): 5268-5275 (in Chinese).
- [5] CHOW E, LIU S Y, JOHNSON S G, *et al.* Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Nature*, 2000, 407(6807): 983-986.
- [6] YANIKM F, FAN S. All-optical transmittor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(24): 2506-2508.
- [7] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, *et al.* Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 48-51 (in Chinese).
- [8] XIE Y M, LIU Zh D, WANG H Q. Local defect modes in photonic crystals with negative refractive index structural defects [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 195-197 (in Chinese).
- [9] QIAO F, ZHANG C, WANG J, *et al.* Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena [J]. *A P L*, 2000, 77(23): 3698-3702.
- [10] DU Sh L, XU X M, YU T B. The single filtering and multiple channeled switches in photonic quantum-well structures [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 1004-1006 (in Chinese).

(上接第19页)

### 参 考 文 献

- [1] HAMOUDI W K, RASHEED B G. Parameters affecting Nd:YAG laser drilling of metals [J]. *International Journal for the Joining of Materials*, 1995, 7(2): 63-69.
- [2] GAO Y K, JIANG Y T, LI X C. Laser pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(12): 1619-1622 (in Chinese).
- [3] KANG J, ZHANG W, WEI H, *et al.* Pulse re-shaping by using a liquid crystal spatial light modulator and deflector for producing a specific waveform [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(3): 184-186.
- [4] PAN Y Y, CUI R Z, CHEN G, *et al.* Beam-shaping technique for laser diode bars with prism group [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 370-372 (in Chinese).
- [5] XIANG S Q, DONG J X, MANG Y P, *et al.* Generation of 2ns ~ 10ns XeCl laser pulses by direct wave clipping with an electro-optical Q-switching [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, A22(9): 675-680 (in Chinese).
- [6] REKSTEN G, VARGHESE T, MARGULIS W, *et al.* Active mode locking of a XeCl laser [J]. *A P L*, 1981, 39(2): 129-131.
- [7] SHAY T M, SZE R C, MALONEY M, *et al.* 120ps duration pulses by active mode locking of an XeCl laser [J]. *J A P*, 1988, 64(7): 3758-3760.
- [8] REN D M, HU X Y, ZHOU B, *et al.* The development of plasma shutter pulse shaping technique for TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(6): 449-453 (in Chinese).
- [9] LI H X, LOU Q H, DONG J X, *et al.* Pulse duration control by laser-induced plasma switch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 899-902 (in Chinese).
- [10] SUN C W. Laser irradiation effect [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 100-102 (in Chinese).