

文章编号: 1001-4322(2006)07-1090-05

# 准分子激光等离子体开关控制脉宽研究\*

李红霞, 楼祺洪, 董景星, 魏运荣

(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 利用准分子激光等离子体技术,在紫外预电离 XeCl 准分子激光器上获得了最短 1.58 ns 的短脉冲激光输出。实验中分析了聚焦到薄膜表面的光束能量密度对所产生的等离子体密度的影响,并对不同等离子体密度及维持时间情况下脉冲压缩效果进行了讨论,给出了激光器谐振腔在稳定腔及非稳腔两种工作方式下的实验结果。激光器在稳定腔工作时,脉宽可压缩至 2.87 ns;采用非稳腔结构时,在脉冲能量不变情况下减小小聚焦光斑面积,提高入射到薄膜表面的能量密度,得到了最短 1.58 ns 的短脉冲激光输出。该技术适用于任何其它准分子器件。

**关键词:** 准分子激光; 等离子体; 脉冲压缩; 谐振腔

**中图分类号:** TN248.22 **文献标识码:** A

高功率紫外准分子激光在许多领域中已获得了广泛的应用,其中包括非线性光学、光化学、半导体工艺加工、材料处理及医学等。不同的应用对准分子激光脉冲宽度有不同的要求,而将放电型准分子激光器脉宽(通常为 15~60 ns)的输出脉冲缩短至 ns 量级也已成为满足激光驱动核聚变驱动源前级振荡器的需要。已发展的使准分子器件产生短脉冲的方法包括:主动锁模<sup>[1-2]</sup>或被动锁模<sup>[3]</sup>法,需要长的脉冲持续时间(大于 60 ns)来维持稳定增益;同频脉冲放大<sup>[4]</sup>或利用可饱和染料吸收体进行受激拉曼散射压缩脉冲法<sup>[5]</sup>、短微腔器件直接输出<sup>[6]</sup>等方法,器件系统复杂,价格较高;利用电光开关削波法<sup>[7]</sup>,存在紫外光波段对光学元件和传感元件的特殊要求及准分子激光脉冲相对短促对开关构成技术困难的问题,需特殊设计的同步方案控制电光开关时间。在以前的工作中,我们对准分子激光的光束波面、光束均匀性以及光束脉宽的控制做了些研究<sup>[8-10]</sup>,本文通过改变激光器谐振腔的结构及放电产生等离子体的材料及其厚度,在紫外预电离准分子器件上获得了 1.58 ns 的脉冲输出。

## 1 实验原理

一准分子激光光束经透镜会聚后入射到一薄膜材料上(通常为聚酰亚胺薄膜或涤纶薄膜),由于高能量密度激光的作用薄膜表面被刻蚀。在激光脉冲的前沿部分刚到达薄膜表面时,薄膜表面被激光电离而挥发的物质进入周围空气形成等离子体放电,致使激光脉冲后沿由于光电离放电等离子区的散射或吸收作用而无法通过,从而使透过薄膜的激光脉冲宽度得到了压缩。通过改变薄膜的材料及激光聚焦光斑的能量密度,可使产生的等离子体密度发生变化,以改变输出的压缩脉冲宽度。工作原理如图 1 所示,其中,(a)图对应激光脉冲前沿通过,而脉冲中后沿被等离子体削掉。实验中可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实现。(b),(c)图分别对应脉冲中间部分及后沿部分通过情形。实验中可利用分光镜将一光束分为两部分,一部分用于在薄膜表面产生等离子体,另一部分作为被控制光束通过此等离子体区域,调整两光路之间的光程差产生延迟以选择激光脉冲透过部分来实现。

光波能否在等离子体中传播存在一个临界频率,满足公式<sup>[11]</sup>

$$N_c = 1.2 \times 10^{-2} f^2 = 1.08 \times 10^{33} \lambda^{-2} \quad (1)$$

式中: $N_c$  为临界等离子体密度; $f$  为激光频率; $\lambda$  为激光波长,单位: nm。也就是说,对于某一给定频率  $\omega$  的微波,存在一个临界的等离子体密度  $N_c$ ,当等离子体密度大于  $N_c$  时,光波就在等离子体边界上出现强烈的反射和吸收,从而不能够透过该等离子体。波长为 308 nm 的 XeCl 准分子激光,利用等离子体控制压缩脉冲宽度所需的最小等离子体密度为  $1.138 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。

\* 收稿日期:2005-04-20; 修订日期:2005-07-21

基金项目:国家自然科学基金重点资助课题(10334110);国家 863 计划项目资助课题

作者简介:李红霞(1978—),女,山东人,博士生,主要从事紫外准分子激光的光束质量改善及相关技术研究;lihongxia@mail.siom.ac.cn。

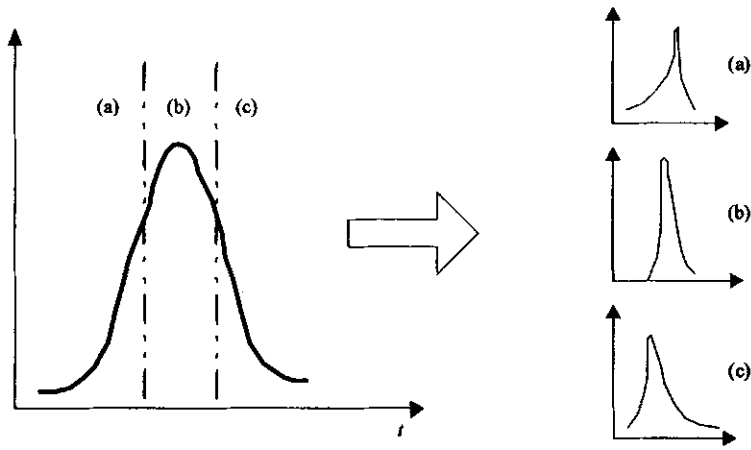


Fig. 1 Conceptual schematic diagram of pulse shorting using plasma switch

图 1 等离子体控制压缩脉宽原理图

## 2 实验及结果

实验采用图 1(a)方式,利用单个脉冲聚焦到薄膜表面,脉冲前沿通过并光电离产生等离子体而致使脉冲后沿无法通过,达到压缩脉宽的目的。器件为 308 nm 紫外预电离放电 XeCl 准分子激光器,单脉冲能量 100 mJ,原始脉宽为 30 ns;聚焦放电产生等离子体的材料采用聚酰亚胺薄膜和涤纶薄膜,聚焦透镜焦距为 10 cm,利用 Lecroy 9362 型示波器对脉冲信号进行观察分析,光路如图 2 所示。准分子激光输出光束经焦距 10 cm 透镜会聚后,入射到薄膜表面,光电离产生等离子体,致使脉冲后沿无法通过薄膜而使脉冲宽度被压缩。压缩后激光脉冲经平面镜反射,衰减片衰减后由光电管探测接收并进行转化,在示波器上输出并观察光脉冲波形。首先在光路中不放置薄膜材料,激光器输出原始光脉冲经平面镜反射,衰减,光电管接收转化,显示于示波器上,如图 3 所示,脉冲宽度 31 ns。

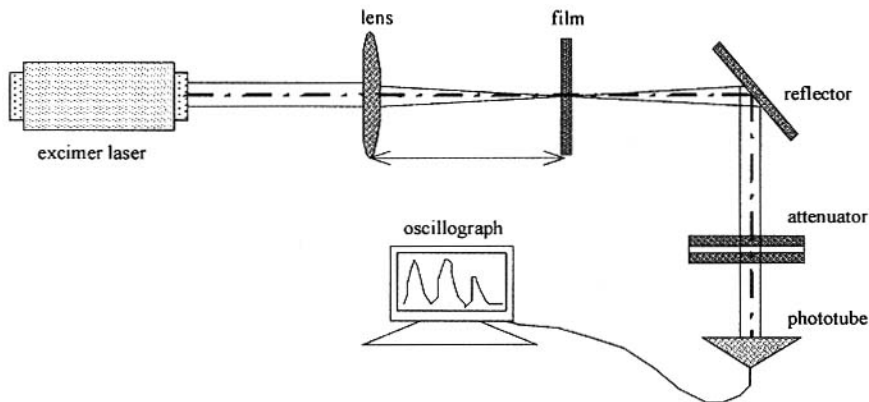


Fig. 2 Experimental setup

图 2 实验装置图

之后在光路中透镜焦点位置处分别放置聚酰亚胺薄膜和涤纶薄膜,调整薄膜在焦点附近区域的位置以改变聚焦到薄膜表面的光斑能量密度,可以获得压缩后的脉冲宽度分别为 2.87 ns 和 3 ns,此时聚焦到薄膜表面的光斑能量密度为  $192 \text{ mJ/mm}^2$ 。脉冲波形如图 4 和图 5 所示,压缩后的激光脉宽为压缩前的 1/11。

## 3 分析讨论

在实验中我们发现,脉冲宽度压缩效果不仅与产生的等离子体密度有关,还与高密度等离子体的维持时间有关。影响所产生的等离子体密度高低的因素是聚焦到薄膜表面上的光束能量密度,调整薄膜在焦点附近的位置改变聚焦光斑的大小,使聚焦到薄膜表面的光束能量密度发生变化,可获得不同等离子体密度及持续时间情况下的脉宽压缩效果。

图 6 为入射光束能量密度为  $192 \text{ mJ/mm}^2$ ,产生等离子体密度及持续时间均足够情况下压缩脉冲与原始脉冲波形比较。由此图可以看出,仅脉冲前沿部分通过,而且光束能量密度越高,产生高密度等离子体所需的时间就越短,压缩脉冲越窄,同时所对应的透过的相对能量越少,损耗越大。

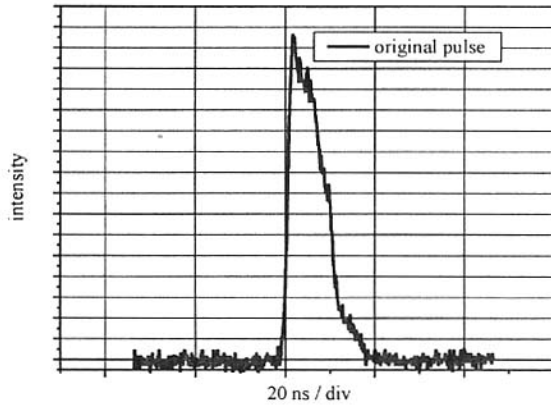


Fig. 3 Original pulse from stable cavity  
图 3 稳定腔原始脉冲波形图

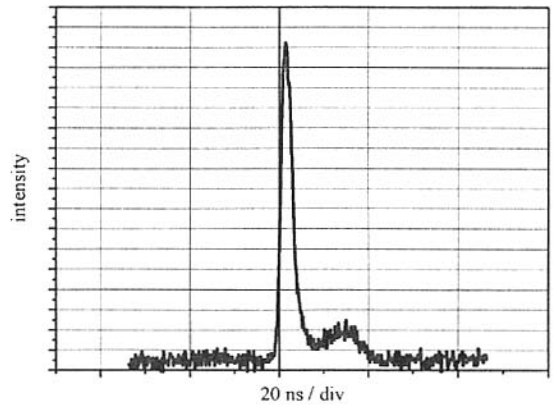


Fig. 4 Shortened pulse by polyimide film from stable cavity  
图 4 稳定腔聚酰亚胺薄膜压缩脉冲波形图

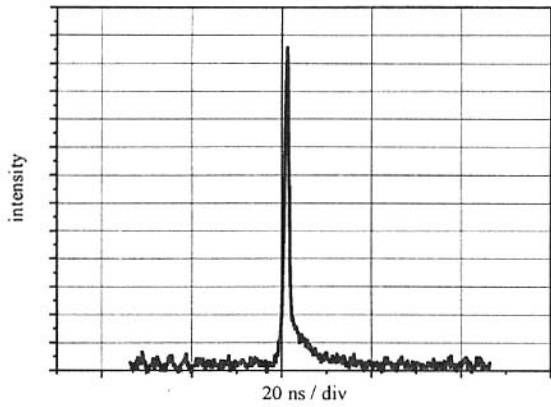


Fig. 5 Shortened pulse by polyester film from stable cavity  
图 5 稳定腔涤纶薄膜压缩脉冲波形图

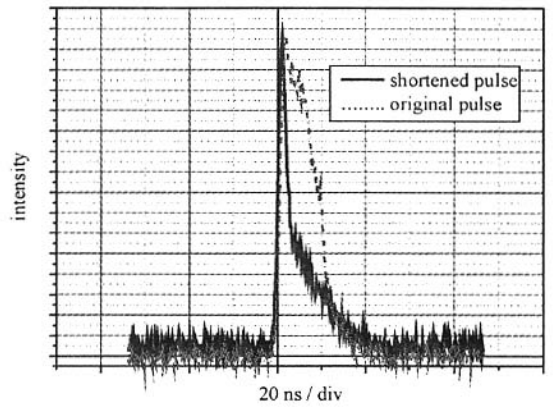


Fig. 6 Comparison of shortened pulse with original pulse with enough plasma density and hold time

图 6 等离子体密度及持续时间足够时压缩脉冲与原始脉冲比较

调整薄膜在焦点附近的位置,聚焦光斑为  $1 \text{ mm}^2$ ,入射光束能量密度为  $100 \text{ mJ/mm}^2$  时,观测到脉冲宽度压缩不完全而出现双峰结构如图 7 所示,此时对应等离子体密度足够,但维持高密度等离子体的时间不够的情况。图 8 对应等离子体密度和维持时间均不够的情况,压缩后的脉冲在出现一小尖峰后又缓慢变宽,压缩不完全。

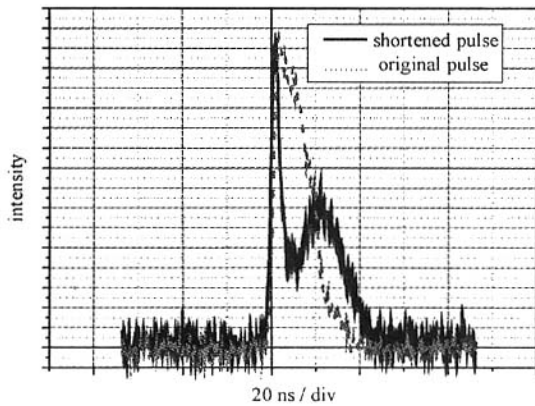


Fig. 7 Comparison of shortened pulse with original pulse with enough plasma density and insufficient hold time

图 7 等离子体密度足够持续时间不够时压缩脉冲与原始脉冲比较

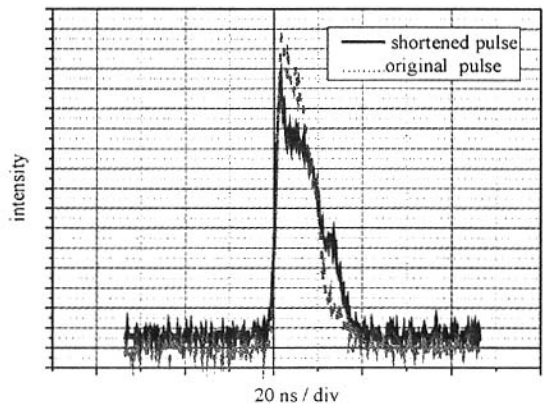


Fig. 8 Comparison of shortened pulse with original pulse with insufficient plasma density and hold time

图 8 等离子体密度及持续时间均不够时压缩脉冲与原始脉冲比较

#### 4 非稳腔结构

通过上面的分析可知,要获得窄的脉冲输出,需提高等离子体密度及维持高密度的时间,即聚焦到薄膜表面的激光光束能量密度;但由于激光器本身输出能量的限制,入射到薄膜上不能够单脉冲击穿,需多个脉冲重

复作用,因此在激光器输出能量一定的情况下,谐振腔采用非稳腔结构以减小聚焦光斑面积,来提高聚焦光束能量密度,从而使薄膜达到单脉冲激光击穿。光路采用图 2 方式,谐振腔采用非稳腔结构,输出的原始光脉冲如图 9 所示。

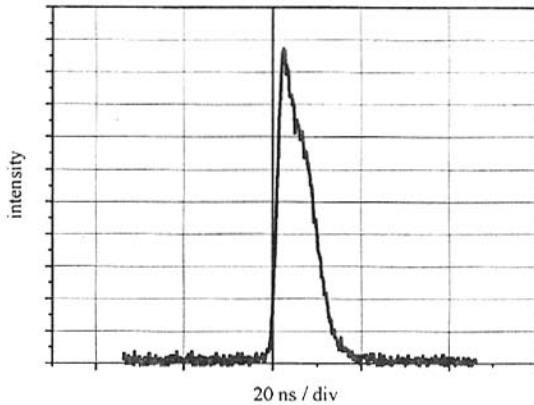


Fig. 9 Original pulse from unstable cavity

图 9 非稳腔输出脉冲波形图

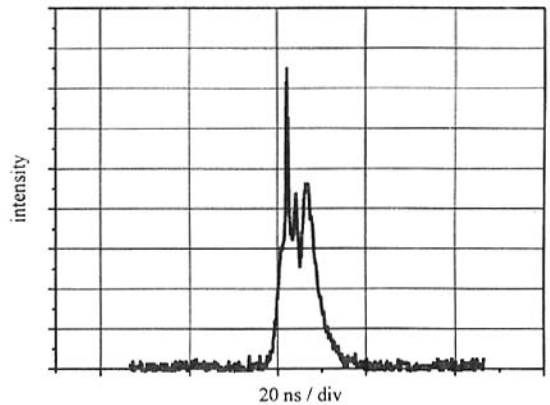


Fig. 10 Shortened pulse by air ionization from unstable cavity

图 10 非稳腔空气放电压缩脉冲波形图

当光路中未添加薄膜材料仅放置焦距 10cm 的透镜时,输出光束经透镜聚焦后在焦点处产生明亮的火花,使焦点位置处空气电离,产生等离子体,光脉冲通过后被压缩波形如图 10 所示,压缩后脉冲存在多峰结构。

在空气中放电产生等离子体压缩脉宽的基础上,在透镜焦点位置处再分别放置聚酰亚胺薄膜与涤纶薄膜材料,经空气中产生等离子体压缩的脉冲,再入射到薄膜表面,经薄膜表面激光电离产生的等离子体的作用,脉冲宽度得到进一步压缩。适当调整薄膜在焦点附近的位置,可得到稳定的窄脉冲输出,如图 11 和图 12 所示,最窄脉冲宽度可达 1.58 ns。

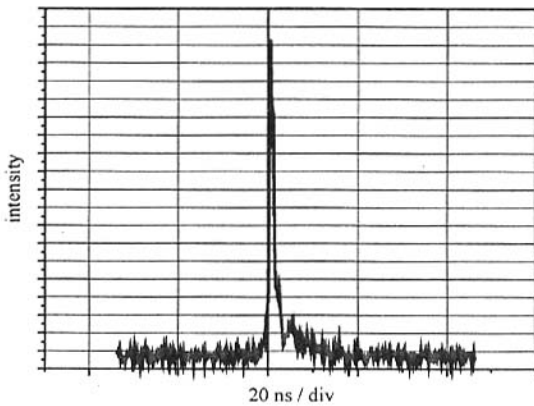


Fig. 11 Shortened pulse by polyimide film from unstable cavity

图 11 非稳腔聚酰亚胺薄膜压缩脉冲波形图

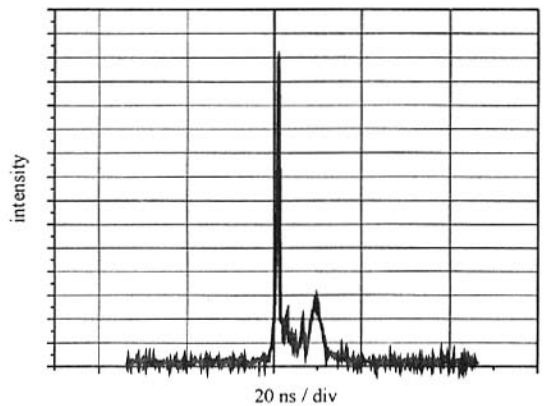


Fig. 12 Shortened pulse by polyester film from unstable cavity

图 12 非稳腔涤纶薄膜压缩脉冲波形图

在准分子激光等离子体控制压缩脉冲宽度实验中,激光器采用非稳腔结构可获得与稳定谐振腔结构相同的压缩效果,同时又可以减小聚焦光斑面积,提高聚焦到薄膜表面的光束能量密度,使薄膜击穿所需脉冲次数减少达到单脉冲击穿,获得稳定的窄脉冲输出。

## 5 结 论

利用准分子激光等离子体控制技术压缩脉冲宽度,具有光路系统简单,操作方便的优点。应用于 308 nm XeCl 准分子激光器上,通过改变激光器谐振腔的结构及产生等离子体的材料及厚度,并调整薄膜在焦点附近的位置,使聚焦到薄膜表面的光束能量密度发生变化,获得了 1.58 ns 的稳定窄脉冲输出,压缩后的激光脉宽为压缩前的 1/19。

## 参考文献:

- [1] Reksten G, Varghese T, Margulis W, et al. Active mode locking of a XeCl laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1981, **39**(2):129-131.
- [2] Shay T M, Sze R C, Maloney M, et al. 120 ps duration pulses by active mode locking of an XeCl laser[J]. *J Appl Phys*, 1988, **64**(7): 3758-3760.

- [3] Efthimiopoulos T, Banic J, Stoicheff B P. Passive mode-locking of a KrF excimer laser[J]. *Can J Phy*, 1979, **57**: 1437-1438.
- [4] Szatmari S, Schafer F P. Simiplified laser system for the generation of 60 fs pulses at 248nm[J]. *Opt Commun*, 1988, **68**:196-202.
- [5] Christov C G, Tomov I V, Chaltakov I V. Shorting of excimer laser pulses with saturable absorbers[J]. *Opt Commun*, 1984, **52**(3): 211-214.
- [6] Xia Z M, Ballik E A. Investigations of a compact short-pulse discharge-excited XeCl laser[J]. *Opt Commun*, 1993, **98**(1,2,3):172-180.
- [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**(9):675-680. (Xiang S 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. *Chinese J Lasers*, 1995, **22**(9):675-680)
- [8] 叶震寰, 董景星, 魏运荣, 等. 准分子激光的光束波面测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(5):619-622. (Ye Z H, Dong J X, Wei Y R, et al. Beam profile diagnosis technology for excimer laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(5):619-622)
- [9] 李红霞, 楼祺洪, 叶震寰, 等. 准分子激光光束均匀性的评价指标研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(6):729-732. (Li H X, Lou Q H, Ye Z H, et al. Research on evaluating norm of excimer laser beam uniformity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):729-732)
- [10] 李红霞, 楼祺洪, 董景星, 等. 激光诱导等离子体开关控制脉宽实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(6):899-902. (Li H X, Lou Q H, Dong J X, et al. Pulse duration control by laser induced plasma switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(6):899-902)
- [11] 项志遴, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海:上海科学技术出版社. 1982: 28. (Xiang Z L, Yu C X. Temperature plasmas diagnostic techniques. Shanghai: Shanghai Sientific and Technical Publishers, 1982: 28)

## Excimer laser plasma switch controlling laser pulse duration

LI Hong-xia, LOU Qi-hong, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Acadaemy of Sciences,*

*P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)*

**Abstract:** Using a laser created plasma switch, a 1.58 ns short output pulse from a UV-preionized XeCl excimer laser is obtained. The influence of the beam energy intensity focused on the film surface for the generated plasma density is analyzed. The pulse shorting effects of different plasma density and hold time are discussed, and the experimental results are presented with the resonant cavity operating in stable cavity and unstable cavity modes separately. Working in stable cavity mode, the pulse width can be narrowed to 2.87 ns. While in an unstable cavity mode, by reducing the focused beam area to improve the energy intensity, a 1.58 ns short output pulse is obtained. This technique can applied to any other excimer laser.

**Key words:** Excimer laser; Plasma; Pulse shorting; Resonant cavity