

文章编号: 1001-4322(2006)06-0899-04

激光诱导等离子体开关控制脉宽实验研究*

李红霞, 楼祺洪, 董景星, 李立波, 魏运荣

(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 利用激光诱导等离子体开关技术, 在 1 064 nm 的 Nd:YAG 固体激光器上获得了脉宽 4.4~6.4 ns 的短脉冲激光输出。激光电离空气产生的等离子体开关控制脉冲宽度时, 聚焦透镜焦距越短, 压缩后的脉宽越窄, 但激光能量损耗越大。压缩后的激光脉宽与激光能量近似成双曲线关系。在控制脉宽光路的焦点处放置带孔的 Cu 薄片可抑制等离子体的扩散, 得到了脉宽最短可达 4.4 ns 的激光输出。

关键词: 等离子体; 激光放电; 脉冲压缩

中图分类号: TN248.22 **文献标识码:** A

在激光加工领域, 加工的结果与脉冲能量、脉冲宽度、脉冲数、聚焦参数和输出光束质量等因素有关。采用高峰值功率、窄脉宽的激光脉冲, 可获得较好的激光打孔、切割、开槽和雕刻效果^[1-3]。已发展的获得短脉冲的激光脉冲整形技术有锁模^[4-6]、调 Q^[7]和电光开关^[8]等方法。其中, 锁模技术在激光脉冲整形后输出的脉冲能量太低, 需要对其放大后才能应用; 电光开关技术则需特殊设计的同步方案来控制电光开关时间; 利用激光诱导等离子体开关控制压缩脉冲宽度, 具有系统简单、操作方便等优点。

本文首先分析了激光电离空气等离子体开关控制脉冲宽度时, 聚焦透镜焦距及激光器输出能量对脉冲宽度的影响, 并在此基础上, 在焦点处放置带孔的 Cu 薄片以抑制等离子体扩散, 利用激光在空气中及 Cu 小孔表面共同激发产生的等离子体开关的作用, 在 Nd:YAG 固体激光器上获得 4.4 ns 的脉冲输出。

1 实验原理

频率为 ω 的激光入射到频率为 ω_p 的等离子体中, 当 $\omega < \omega_p$ 时, 激光被等离子体反射; 当 $\omega > \omega_p$ 时, 激光在等离子体中传播^[9]。

激光经透镜聚焦后将焦点处的空气电离击穿, 等离子体开始形成并向四周扩散, 入射光方向上激光的辐射能极快地注入焦点区, 被等离子体吸收导致等离子体密度快速增加。等离子体频率 ω_p 与等离子体密度 n 满足

$$\omega_p = [(e^2 n) / (m \epsilon_0)]^{1/2} \quad (1)$$

式中: m 为电子质量; ϵ_0 为介电常数; e 为电子电荷。由式(1)可知, 随着等离子体密度 n 的增加, 等离子体频率 ω_p 增大, 当 $\omega < \omega_p$ 时, 激光脉冲的后沿部分被反射而无法通过等离子体开关, 入射激光脉冲被截断, 从而实现了对激光脉冲宽度的控制。当 $\omega_p = \omega$ 时, 等离子体密度为临界等离子体密度, 对于 1 064 nm 的 Nd:YAG 固体激光, 利用等离子体开关控制脉冲宽度时, 临界等离子体密度为 $9.538 8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。

2 实验及结果

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, L 为透镜, A 为其焦点位置。压缩后的激光脉冲经反射镜反射后由光电管探测并转换成信号输入示波器进行观察分析, 功率计 P_1 和 P_2 用于对激光脉冲压缩前后能量的实时观测; 衰减器用于控制激光光强, 保护光电探测器; 采用 SL454G 型 Nd:YAG 脉冲激光器, 波长 1 064 nm, 重复频率 30 Hz, 光束直径约 $\phi 8 \text{ mm}$, 发散角 2 mrad, 输出激光用光

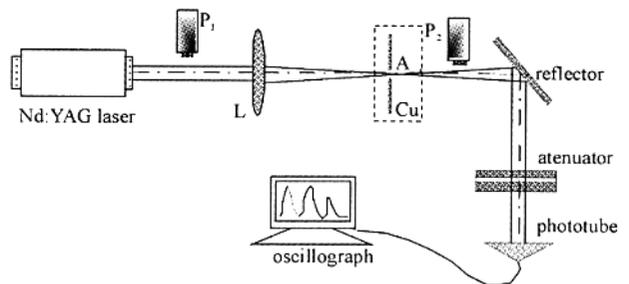


Fig. 1 Experimental setup

图 1 实验装置图

* 收稿日期: 2005-10-28; 修订日期: 2006-04-05

基金项目: 国家自然科学基金重点资助课题(10334110)

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

电管探测并输入 Lecroy 9362 型示波器,得到激光原始脉冲波形如图 2 所示,脉宽为 18.8 ns。

2.2 实验方法

实验首先保持激光器输出能量不变,改变聚焦透镜 L 的焦距,观察压缩后的激光脉宽与透镜焦距的关系,得到最佳脉宽压缩效果的透镜焦距;然后固定此聚焦透镜并调节激光器输出能量,得到压缩后的脉宽与激光器输出能量的关系。

为了抑制等离子体的扩散,使得激光辐照产生的等离子体在更短的时间内达到临界等离子体密度,在透镜焦点处放置一带小孔的 Cu 板。保持透镜焦距不变及最佳激光器输出能量,调节 Cu 板的位置使激光束经透镜后的聚焦点处于小孔的中心,使得小孔能抑制激光产生的等离子体的扩散,并利用激光电离 Cu 孔内壁表面产生的等离子体与激光电离空气产生的等离子体共同作用,可以获得更短脉宽的激光输出。

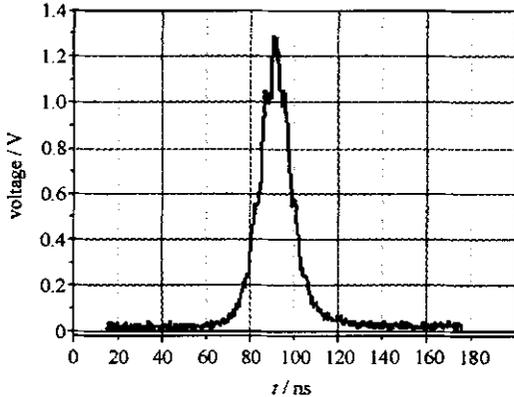


Fig. 2 Laser pulse of Nd:YAG laser
图 2 Nd:YAG 激光器脉冲波形

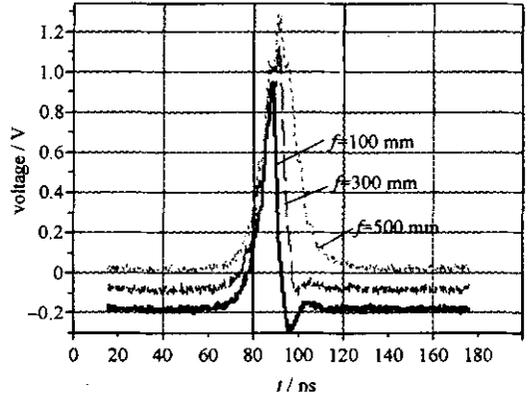


Fig. 3 Shortened laser pulses using lens with different focal length
图 3 不同焦距透镜下压缩脉冲波形

2.3 实验结果

2.3.1 聚焦透镜焦距对脉宽的影响

激光器输出单脉冲能量 220 mJ,在距离激光器 30 cm 处分别放置焦距为 500,300,100 mm 的透镜,以电离空气产生的等离子体开关控制脉宽,激光被压缩后的脉冲波形见图 3。

透镜焦距为 500 mm 时,激光脉宽从 18.8 ns 被压缩至 15.2 ns,脉冲能量 150 mJ,约为压缩前的 70%;当透镜焦距为 300 mm 时,压缩后脉宽为 11.2 ns,脉冲能量 90 mJ,能量透过率为 40%;而采用焦距 100 mm 的透镜时,压缩后脉冲宽度可达 9.6 ns,脉冲能量 60 mJ,透过率约 30%。由此可知,产生等离子体开关所用的透镜焦距越短,压缩后脉冲宽度越窄,但相应能量损耗增大。这是因为采用短焦距透镜,减小了聚焦光斑面积,在相同激光脉冲能量下,提高了焦点处的能量密度,缩短了达到临界等离子体密度所需的时间,从而改善了脉宽压缩效果,但同时通过等离子体开关的激光脉冲能量减小,因此能量损耗增大。

2.3.2 激光脉冲能量对脉宽的影响

在光路中距激光器30cm处放置焦距为100 mm的透镜,激光器发出的激光光束束腰直径 ϕ_1 mm,激光器窗口到束腰位置距离 600 mm,计算可得放入透镜后焦点位置处光斑面积约为 0.049 mm²。由小到大调节激光器输出能量,观测放电前后激光脉冲能量。当激光器输出能量较小时,不能使焦点处空气电离,激光脉冲无损耗地通过,前后能量近似相等;增大激光器输出能量,焦点区域的空气中逐渐出现火花,说明在此区域开始形成等离子体,随着激光器输出能量的增大,焦点区域的空气被击穿,发出耀眼的闪光及响亮的“啪啪”声。

激光器输出能量不同时,经等离子体开关控制后的脉冲波形如图 4 所示。实验中发现,激光器输出能量为 60~300 mJ 时,经过等离子体后的激光脉冲波形的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

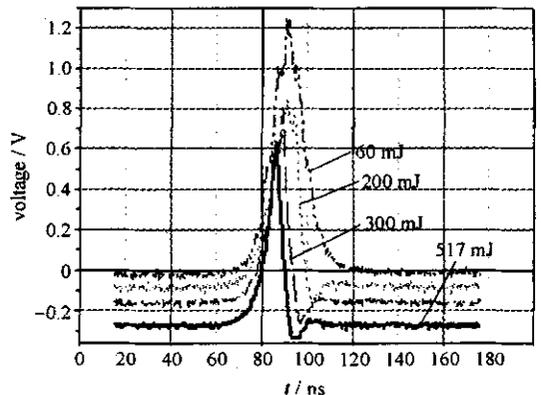


Fig. 4 Shortened pulses using different laser energy
图 4 不同激光能量下压缩脉冲波形比较

降；激光器输出能量为 300~517 mJ 时，经等离子体开关控制后激光脉冲波形变化缓慢，且透过脉冲能量近似保持不变。利用空气中放电产生等离子体开关控制脉冲宽度可达到 6.4 ns。

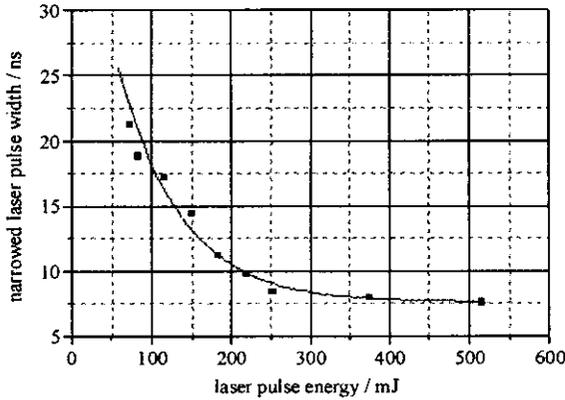


Fig. 5 Relationship between the shortened pulse width and the pulse energy

图 5 压缩脉冲宽度随激光能量变化关系

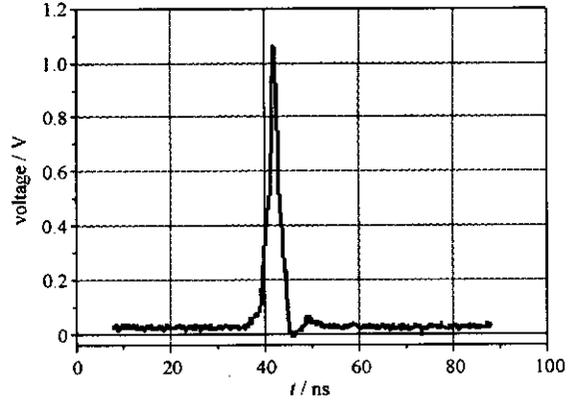


Fig. 6 Shortened pulse using plasma switch generated by laser discharge in atmosphere and on the surface of Cu pinhole

图 6 Cu 小孔表面电离及空气放电电离共同产生等离子体开关控制脉冲波形

图 5 为经过等离子体开关压缩后，激光脉宽与激光器输出脉冲能量的关系。由图 5 可以看出，压缩后脉冲宽度与激光输出能量近似成双曲线关系。在激光器输出能量增大的开始阶段，压缩后脉宽随能量增大而逐渐减小；随着激光能量继续增大，脉宽减小的趋势减缓，脉冲宽度近似保持不变，这是因为随着等离子体密度的增加，电离过程的扩散吸附和复合等作用相应增强，等离子体中的电离与扩散复合逐渐达到平衡，使等离子体密度达到临界密度所需的时间保持稳定而不再随脉冲能量的增加而缩短，从而使压缩后脉宽近似不变。

2.3.3 放置 Cu 板控制激光脉宽

为了抑制等离子体的扩散，在光路中焦点位置 A 处放置一块带小孔的 Cu 板，Cu 板小孔直径 $\phi 1$ mm，厚度 2 mm，调节 Cu 板的位置使激光束经透镜后聚焦于 Cu 板小孔的中心。由于 Cu 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 2~3 个量级^[10]，因此在激光脉冲电离空气产生等离子体的同时，Cu 小孔内壁表面吸收激光能量，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小孔的范围内，缩短了到达临界等离子体密度的时间。

激光脉冲能量为 520 mJ， $f=100$ mm 时，利用激光电离 Cu 小孔内壁表面及空气共同作用产生等离子体开关控制脉冲宽度可达 4.4 ns，脉冲波形如图 6 所示，而相同实验条件下激光仅在空气中放电产生等离子体开关压缩脉宽为 6.4 ns。

2.4 波面分析

实验中我们还利用阵列透镜波面分析装置对放电产生等离子体前后的激光脉冲波面进行了对比，装置如图 7。用透镜阵列将入射光束波面分割成很多不同小段，然后通过位于阵列透镜后焦面上的 CCD 所观测到的会聚光斑的位置来确定每小段波面的形状。图 8 为激光脉冲放电前后在透镜阵列后焦面上得到的光斑分布图，结果显示激光波面在放电前后未发生很大的变化，即激光在空气中放电产生等离子体后激光波面未发生大的畸变。

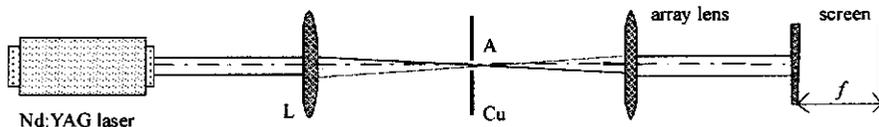


Fig. 7 Experimental setup of array lens

图 7 透镜阵列装置

3 结 论

在 1 064 nm Nd:YAG 固体激光器上，分析了在激光电离空气产生等离子体开关时，聚焦透镜焦距及激光脉冲能量对压缩后脉宽的影响，并将空气中放电与带孔的 Cu 薄片内壁表面放电电离产生的等离子体相结合，利用小孔的约束作用抑制了等离子体的扩散，在相同脉冲能量下缩短了等离子体达到临界密度所需的时间，获

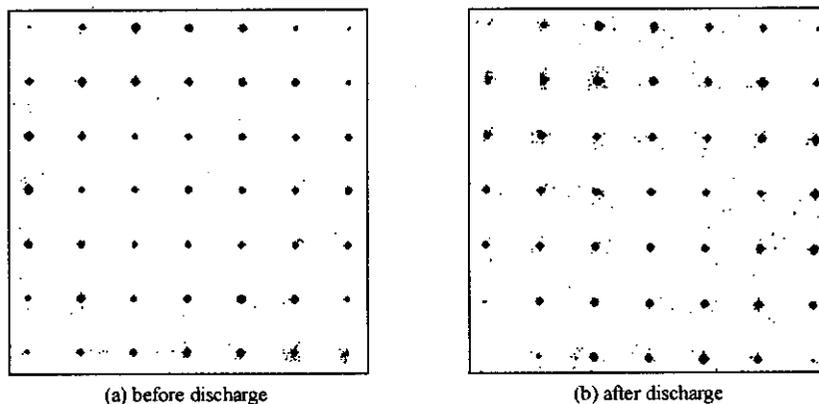


Fig. 8 Beam spot distributions on the focal surface of array lens before and after laser discharge

图 8 激光放电前后透镜阵列后焦面上光斑分布

得了最短脉宽为 4.4 ns 的稳定的脉冲输出。

参考文献:

- [1] Chen K, Yao Y L. Process optimization in pulsed laser micromachining with applications in medical device manufacturing[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2000, **16**:243-249.
- [2] French P W, Hand D P, Peters C, et al. Investigation of the Nd:YAG laser percussion drilling process using high speed filming[C]//Proc of ICALEO. 1998:162-166.
- [3] Lou Q H. Excimer laser plasma to control laser pulse duration[J]. *Laser and Particle Beams*, 1997, **15**(1):235-240.
- [4] Reksten G, Varghese T, Margulis W. Active mode locking of a XeCl laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1981, **39**(2):129-131.
- [5] 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.
- [6] Efthimiopoulos T, Banic J, Stoicheff B P. Passive mode-locking of a KrF excimer laser[J]. *Can J Phy*, 1979, **57**: 1437-1438.
- [7] 蓝信钜. 激光技术[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1981: 306. (Lan X J. Laser Technology. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1981: 306)
- [8] 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, **A22**(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 of Lasers*, 1995, **A22**(9):675-680)
- [9] 徐家骊,金尚宪. 等离子体物理[M]. 北京:原子能出版社, 1981:306. (Xu J L, Jin S X. Plasma physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1981: 306)
- [10] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002: 100. (Sun C W. Laser irradiation effect. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 100)

Pulse duration control by laser induced plasma switch

LI Hong-xia, LOU Qi-hong, DONG Jing-xing, LI Li-bo, WEI Yun-rong
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

Abstract: Based on laser induced plasma switch technology, the output pulse width of 4.4 ns of the solid-state Nd:YAG laser is obtained. The influences of the focal length of the lens and the laser beam energy on the shortened laser pulse width are presented. The shorter the focal length is, the narrower the shortened pulse duration is, the greater the laser energy loss is. A hyperbola relationship between the pulse duration and the laser pulse energy is obtained. The laser pulse width is shortened to 6.4 ns by the plasma switch generated by the laser discharge in atmosphere. Placing a Cu pinhole on the focus of the lens to prevent the plasma from diffusing, a short output pulse with a width of 4.4 ns is obtained.

Key words: Plasma; Laser discharge; Shortened pulse