

doi: 10. 3788/gzxb20124103. 0263

# 纳秒脉冲激光诱导水等离子体屏蔽的实验研究

李明<sup>1</sup>, 张宏超<sup>2</sup>, 陆建<sup>2</sup>

(1 淮海工学院 理学院, 江苏 连云港 222005)

(2 南京理工大学 理学院, 南京 210094)

**摘 要:** 基于激光阴影法测量原理, 建立了一个记录纳秒脉冲激光诱导等离子体屏蔽现象的实验光路系统, 探索了一种等离子体屏蔽图像的记录方法, 对纳秒脉冲激光诱导水击穿形成等离子体的现象进行了研究. 记录了在不同能量状态下出现的激光诱导等离子体屏蔽图像, 发现了激光诱导水介质的等离子体屏蔽效应随作用光能量呈增强趋势, 首次观测到了在纳秒脉冲激光作用下液体中出现的线型击穿现象. 本文研究结果可为水下激光加工研究、医疗以及激光在液体中的传播特性研究提供实验依据.

**关键词:** 激光等离子体; 水; 击穿; 屏蔽效应

**中图分类号:** O434. 14

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)03-0263-4

## 0 引言

当较强激光脉冲聚焦于水或水溶液中时, 一旦在焦点区域里光强超过某一数值即击穿阈值时会导致该液体击穿. 当激光脉冲维持在聚焦区域时, 击穿形成的等离子体会为逆韧致辐射效应所加热. 液体击穿时的主要物理特征表现为: 等离子体的温度可达  $6\ 000\sim 15\ 000\text{ K}$ <sup>[1-3]</sup>, 压强可达  $20\sim 60\text{ kbar}$ <sup>[4]</sup>. 国内外已有学者对激光诱导等离子体的这些物理特性进行了研究<sup>[2-5]</sup>.

在高自由电子密度出现以后, 由于等离子体吸收可见辐射比透明物质要强, 所以等离子体会进一步强烈吸收激光能量, 导致等离子体加热和膨胀, 因此, 等离子体的出现, 在相当的程度上阻碍了进入的激光, 这种现象即称等离子体屏蔽效应<sup>[6]</sup>. 广义上等离子体屏蔽包括吸收、反射和散射, 其结果造成了传输激光能量的减少或者激光传播方向的偏转, 导致激光与靶材耦合效率的大大降低.

等离子体屏蔽也有其有利的方面, 由于屏蔽可以使光束发生畸变, 在聚焦区域从光轴上把能量移开, 增加等离子体边缘的能量传输, 或者使传输能量散焦, 在聚焦区域产生一个大的焦斑. 这一点在医学上例如眼外科手术中有很好的用途, 等离子体屏蔽可以减少传输到视网膜上的能量, 最大限度地减少激光造成的视网膜损伤, 另外激光在液体中的传递还涉及材料、通讯、军事等领域<sup>[8-9]</sup>. 所以对激光等离

子体屏蔽研究有较强的应用价值.

目前, 国内外对于激光在固体领域的应用研究比较广泛, 但对于激光在液体中的作用及其机理研究相对较少<sup>[6-7, 10]</sup>, 特别是由于技术上的原因, 等离子体屏蔽的图像还难以采集<sup>[6, 10]</sup>. 对等离子体屏蔽的实验研究在国内外还较少见诸报导<sup>[6-7, 10]</sup>. 本文试图从实验的角度出发, 基于阴影法测量原理, 搭建适当的记录等离子体屏蔽现象的光路, 对激光诱导水击穿形成的等离子体的屏蔽机制进行研究. 通过此实验, 发现了激光诱导水介质的等离子体屏蔽效应随作用光能量呈增强趋势, 并且在试验中首次观测到了在纳秒脉冲激光作用下液体中出现的线型击穿现象. 本文研究结果可为水下激光加工研究、激光在液体中的传播特性研究提供实验依据.

## 1 实验装置及原理

为了研究激光诱导水击穿形成的等离子体的屏蔽机制, 本文采用如图 1 所示的实验装置, 调 Q-Nd: YAG 激光器输出波长为  $1\ 064\text{ nm}$ , 脉宽为  $7\text{ ns}$ , 最大作用单脉冲能量为  $600\text{ mJ}$ . 输出脉冲首先通过低效率工作的倍频晶体, 其倍频效率约为  $15\%$ , 然后利用双色分光镜将倍频光 ( $\lambda = 532\text{ nm}$ ) 和基频光 ( $\lambda = 1\ 064\text{ nm}$ ) 分离.

基频光作为作用光用来诱导空气击穿, 而倍频光作为探测光对激光等离子体进行诊断. 为了实现

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60578015)和江苏省海洋资源开发研究院基金(No. HK10019)资助

第一作者: 李明(1958—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光与物质相互作用. Email: lygliming@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-10-09; 修回日期: 2011-12-20

必须保证探测光与作用光的等光程,使两者能够同时到达激光作用区域,图中的光路布置能够满足这样的条件.

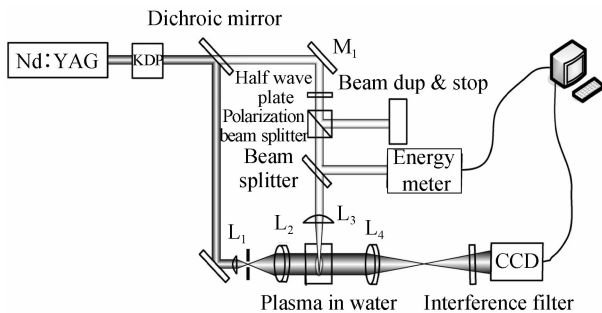


图1 水击穿形成等离子体初始阶段实验诊断装置  
Fig. 1 Experimental equipment for measure laser induced plasma

图1中,由透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 组合成扩束镜,扩束比例约为10倍,是为了将探测光扩束覆盖探测区域.在 $L_1$ 和 $L_2$ 之间放置一小孔光阑,目的是为了对探测光进行滤波,获取较均匀的光强分布.与实验相关的几个关键参量为:激光的输出直径约为7 mm,透镜 $L_3$ 的焦距为60 mm,成像透镜的焦距为100 mm.

为了实现激光能量的精确控制,本文采用半波片和偏振分光镜组合装置对激光脉冲能量进行精确控制衰减.

由于实验中调Q-Nd:YAG激光器输出激光是线偏振的,因此,只需要一片半波片和偏振分光镜就可以实现对作用激光能量进行连续的精确衰减.

线偏振光垂直入射到半波片后,透射光仍然为线偏振光,但是偏振方向发生了转动.设入射光的振动面和晶体主截面之间的夹角为 $\theta$ ,则透射的线偏振的振动面从原来的方位转动 $2\theta$ 角.设入射光的偏振方向和偏振分光镜的振动方向的夹角为 $\delta$ ,入射的激光为 $E_0$ ,则出射激光 $E_1$ 可表示为

$$E_1 = E_0 \sin(2\theta + \delta) \quad (1)$$

设入射激光的光强为 $I_0$ ,于是出射激光的光强 $I_1$ 可表示为

$$I_1 = I_0 \sin^2(2\theta + \delta) \quad (2)$$

其实,通过旋转半波片,总是可以找到一位置,使得当 $\theta = \varphi + \epsilon$ 时,满足 $2\epsilon + \delta = \pi$ .于是出射激光的光强可以简单的表示为

$$I_1 = I_0 \sin^2(2\varphi) \quad (3)$$

则该半波片和偏振分光镜组合装置的透过率可表示为

$$T = \frac{I_1}{I_0} = \sin^2(2\varphi) \quad (4)$$

依据上面公式可以估计该装置的控制准确度.采用角度调节架来控制半波片主轴的角度,最小分辨率为 $\Delta\varphi = 5'$ .从式(4)可以得到透过率随 $\theta$ 的变

化率为

$$dT/d\theta = -2\sin(4\varphi) \quad (5)$$

当 $\theta = \pi/8$ 时, $dT/d\theta$ 取极值 $(dT/d\theta)_{\max} = -2$ ,则装置可达到的最小准确度为

$$\Delta T = \Delta\varphi |(dT/d\varphi)_{\max}| \approx 0.3\%$$

然而,事实上,激光器输出的能量的波动大约是 $\Delta I = 5\%$ ,远大于该准确度.在不超过该数值的情况下,半波片最小分辨率必须小于

$$\Delta\varphi = 5\% / |(dT/d\varphi)_{\max}| = 0.025(\text{rad}) \approx 1.43^\circ$$

因此在实际的操作中,调节的角度准确度只需要小于 $1.43^\circ$ 即可,由于激光能量的波动,在每个位置测量一定数量的干涉图,总可以获得两幅能量误差满足一定条件的干涉图.

另外,由于探测光的脉冲非常短,约为5 ns,为了使CCD能够稳定地捕捉到瞬态光信号,可以通过两种方法来实现,一种是可以使用激光器来触发CCD,使CCD快门打开一段时间,探测脉冲达到CCD探测器后,然后CCD快门关闭,这样就可以实现瞬态图像的采集.另外一种是采用软触发的方式,CCD在不停地拍摄,通过判断曝光阈值,然后挑选出包含瞬态图像的那一帧,此时要注意CCD采集频率与激光器频率要合拍,不然很容易漏采集.两者相比,最好的方法还是通过软触发的方法,因为该方法简单易行,且不需要额外的硬件支持.然而实验中还有注意一个问题,CCD的快门时间不能过长,否则,由于背景光的累积效应,很容易使采集的图像严重受到背景光的干扰,但是CCD快门时间太短,又不能采集到瞬态图像,因而,实验中要根据实际情况进行适当的选择.本文中CCD的曝光时间约为1 ms,在背景光很弱的情况下,基本能够采集到比较满意的图像.

## 2 实验结果与分析

根据上面的实验方法,通过改变激光输出功率,得出了一组在不同输出能量状态下的激光诱导液体等离子体的屏蔽图像.

图2为激光诱导水击穿形成等离子体初始阶段实验结果.图中激光从左向右入射.由于图2(a)中激光没有击穿水而形成等离子体,因此在图中观察不到明显的等离子体屏蔽区域.实验过程中,当激光能量为0~8.5 mJ附近时,实验中获得图像高度一致,并且在激光焦点区域肉眼观察不到等离子体闪光,说明此时激光没有达到水的击穿阈值.当激光作用能量约处于8.5~10.5 mJ之间时,实验中观察到的等离子体闪光的出现具有一定的概率.并且在观察到等离子体闪光时,获得了与图2(b)类似的图像.

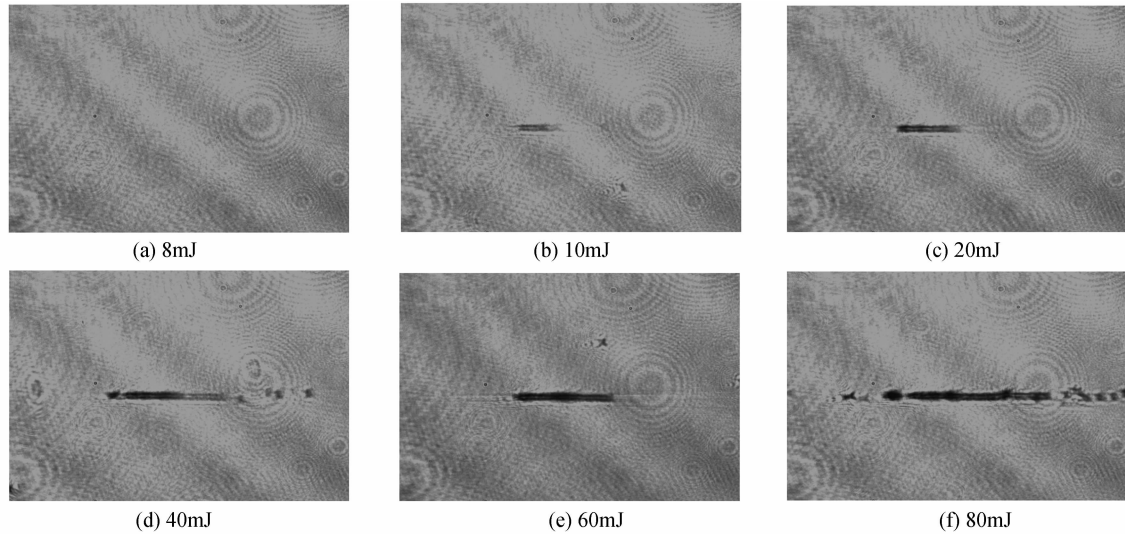


图2 激光诱导水击穿形成等离子体初始阶段实验结果  
Fig.2 The experimental results for laser induced plasma

实验中发现,在激光能量达到 9.2 mJ 左右附近,发现水的击穿概率约为 50%,我们认为这就是水的击穿阈值.实验中发现,激光与水作用的过程中会形成自聚焦,其焦点半径不易准确获得,因此,本文中给出的是激光击穿阈值能量.从图 2 中可以明显地看出由于激光等离子体对探测激光(波长为 532 nm)的屏蔽,激光诱导水击穿形成的等离子体区域的透射光强明显要比其他区域暗得多.从图中可以观察到,当作用激光能量较弱时,等离子体区域还有部分透射光,随着激光能量的增大,水击穿区域的等离子体的亮度明显变暗.

同时,我们可以观察到激光诱导水击穿形成了线型的区域,说明了激光与水作用的过程中会形成自聚焦现象.从图 2(a) ~ (e) 可以看出,激光形成的等离子体外观上都比较平直,然而从图 2(f) 看出,当激光能量比较大时,等离子体的右端具有一定的弯曲和变形.说明纳秒激光的等离子体通道不易维持太长的距离,使得从右边出射的激光的光路受到扰动,最终造成弯曲和变形.

### 3 结论

根据脉冲激光在液体中诱导等离子体的特点,基于阴影法测量原理,搭建了能够测量和记录等离子体屏蔽的实验光路系统,探索了一套可行的等离子体屏蔽图像记录方法.根据此光路系统,对纳秒脉冲激光诱导水等离子体屏蔽现象进行了研究,得出以下结论:

1) 激光诱导水介质的等离子体屏蔽效应随作用光能量呈增强趋势,作用光能量越大,屏蔽效应越显著;

2) 随着作用光能量的增大,在液体中会出现线

型击穿现象;

3) 发生线型击穿时,实际光束的直径小于入射光束直径.

#### 参考文献

- [1] CHEN J, BIAN B, WANG Y. Laser-induced plasma shock wave and cavity on metal surface underwater[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, **25**(5): 307-311.
- [2] MAZHUKIN V I, NOSSOV V V. Modeling of plasma dynamics at the air-water interface. Application to laser shock processing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **90**(2): 608-616.
- [3] BIAN Bao-min, CHEN Xiao, XIA Ming, *et al.* The investigation of laser-induced plasma shock wave propagation in liquids[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 508-513.  
卞保民, 陈笑, 夏铭, 等. 液体中激光等离子体冲击波波前传播特性研究及测试[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 508-513.
- [4] LENZNER M, KRUGER J, SARTANIA S, *et al.* Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. *Physical Review Letters*, 1998, **80**(18): 4076-4079.
- [5] DOCCHIO F, SACCHI C, MARSHALL J. Experimental investigation of optical breakdown thresholds in ocular media under single pulse irradiation with different pulse durations [J]. *Lasers Ophthalmol*, 1986, **39**(1): 83-93.
- [6] LI Ming, LIU Jun, SHEN Zhong-hua, *et al.* Elimination of the diffraction effect in exploring plasma and shock wave produced by high-power laser [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2005, **34**(6): 684-686.  
李明, 刘骏, 沈中华, 等. 高功率激光等离子体冲击波探测中的衍射效应的消除[J]. *南京理工大学学报*, 2005, **34**(6): 684-686.
- [7] LI Ming, ZHANG Hong-chao, SHEN Zhong-hua, *et al.* Physical analyses of optical breakdown and plasma formation in water induced by laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1610-1614.  
李明, 张宏超, 沈中华, 等. 激光导致水击穿和等离子体形成过程的物理分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1610-1614.
- [8] FAN C H, SUN J P. Longtin plasma absorption of femtosecond laser pulses in dielectrics [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, **42**(2): 224-275.
- [9] ZHENG Zhen, LÜ Bai-da. Far-field properties of ultrashort pulsed gaussian beams in a linear dispersive medium [J]. *Acta*

*Photonica Sinica*, 2006, **5**(9): 1404-1407.

郑振, 吕百达. 短脉冲高斯光束在线性色散介质中的远场特性[J]. 光子学报, 2006, **35**(9): 1404-1407.

- [10] LI Sheng-yong, ZHU Qiang-hua, ZHAO Rui, *et al.*  
Properties of laser-induced cavitation bubble sound waves in

viscous fluid[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2082-2086.

李胜勇, 朱强华, 赵瑞, 等. 粘性液体中激光空泡辐射声波的特性研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 2082-2086.

## Experimental Studies on NS Pulse Laser Induced Liquid plasma Shadowgraphy

LI Ming<sup>1</sup>, ZHANG Hong-chao<sup>2</sup>, LU Jian<sup>2</sup>

(1 School of Science, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)

(2 School of Science Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Based on the measurement principle of laser hatched method, an equipment for measure plasma shield was set up. The shielding of NS pulse laser induced breakdown in water was studied. Laser induced plasma shield images were recorded. Linear relation between the effect and laser energy was found. Linear break phenomenon by the NS pulse laser was observed for the first time. These research results will provide the theoretical and experimental references for laser processing underwater, laser medicine and corresponding hydromechanics.

**Key words:** Laser plasma; Water; Breakdown; Shield