

文章编号: 0253-2239(2009)05-1384-07

# 不同光聚焦状态的光击穿声辐射特性

宗思光<sup>1,2</sup> 王江安<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>海军工程大学电子工程学院; <sup>2</sup>海军工程大学兵器工程系 湖北 武汉 430033)

**摘要** 强激光通过光学系统聚焦于水下时, 击穿水介质辐射强声波信号。光学聚焦特性的不同, 使得激光击穿区域形状的差异, 导致辐射的声信号在强度、频谱特征上具有较大的差异性。为研究不同光聚焦状态对激光击穿形成的空泡辐射声波的影响, 推导了不同聚焦状态下激光空泡壁的运动方程及声辐射模型, 构建了激光声实验测量系统, 实验研究了不同聚焦状态下光击穿导致的空泡脉动参数、辐射声信号特征的差异性。结论: 激光声信号强度与激光能量成线性关系, 在激光能量高于一定参数情况下, 声信号强度变化不大; 在低激光功率下, 扩束聚焦与非扩束聚焦, 辐射的声信号特性差异不大; 在高激光功率条件, 扩束聚焦击穿形成的空泡半径大于非扩束聚焦击穿, 辐射的声信号强度高于非扩束聚焦; 为提高激光击穿辐射声信号效率, 应对激光束进行扩束聚焦。

**关键词** 激光物理; 激光声; 光击穿; 水听器

中图分类号 TB936

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20092905.1384

## Laser Breakdown-Generated Sound in Different Optical Focusing Lens Systems

Zong Siguang<sup>1,2</sup> Wang Jiangan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Electron Engineering Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)  
(<sup>2</sup>Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract** When high-power laser is focused in water through an optical focusing lens system, the water is broken down and high-power acoustic wave is emitted. The different optical focusing lens system relates to different acoustic waveform characteristic, such as the sound pressure intensity, frequency. In order to analyze the relation between the pressure signal and optical focusing characteristic, we simulate the dynamic process of the laser-induced cavitation bubble model and the laser-induced acoustic signal model. The experimental investigation is done. The laser-induced pressure acoustic signal is detected with the high-frequency transducer. The laser-induced cavitation bubble expansion and collapse is recorded with high-speed video. The shock wave and cavitation bubble begin after optical breakdown in water. The laser-induced bubble radius and power acoustic density make a linear relation with the laser energy directly. For high-power laser, compared with the unexpanded beam, the bubble radius is larger and the acoustic signal is more intense for the expanded beam. To increase the opto-acoustic efficiency, the laser beam should be expanded and focused.

**Key words** laser physics; laser-generated sound; optical breakdown; hydrophone

## 1 引言

激光与液体介质相互作用可以在液体中激发声波, 在海洋中应用时, 采用船载或机载激光器发射红外波段激光束, 通过光学聚焦系统调节在水面或水

下激发声波, 通过热膨胀或光击穿机制, 形成激光声源<sup>[1~3]</sup>。激光声源相对于传统固体换能器声源, 具有声脉冲窄、频率范围宽等特性, 具有广泛的应用领域。

收稿日期: 2008-07-17; 收到修改稿日期: 2008-10-24

基金项目: 国防武器装备重点基金资助(9140A14060207JB11)

作者简介: 宗思光(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事水下激光探测、光声学的研究。E-mail: zongsiguang@163.com

导师简介: 王江安(1951—), 男, 博士生导师, 主要从事激光探测、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: gdyfzx@163.com

为提高激光声能量转换效率,采用光击穿模式,光击穿模式需要严格的光学聚焦<sup>[4~6]</sup>。然而,实际使用中,不同光学聚焦系统特性差别较大,同时受使用环境制约,导致了光击穿区域的形状特征的差异,进而使光击穿辐射声信号具有较大的差异性。光学聚焦状态的不同,在同等的激光参数、水介质条件下,光击穿辐射的声波在强度、脉冲波形、频谱特征上具有一定的差异性。Barne 首先观察到水下激光诱导的等离子体闪光现象。之后大批学者对液体击穿问题进行了大量的实验研究<sup>[7,8]</sup>。为避免医学领域中激光手术带来的空泡冲击波破坏效应,以 Vogel. A 为代表的学者研究了毫焦级能量脉冲激光聚焦产生的空泡及冲击波辐射特性<sup>[4,5]</sup>。本论文构建了激光声测量系统,实验研究了光学扩束聚焦与非扩束聚焦对声源在强度、波形特征的影响,研究结果有助于激光声在海洋中的应用。

## 2 光击穿声辐射的过程分析

强功率激光作用于液体内部或液体表面时激发声波的过程可以分为三种类型<sup>[9,10]</sup>:1)弱汽化,激光辐射释放的能量密度接近于液体的汽化热;2)强汽化或沸腾,激光辐射释放的总能量远大于液体的汽化热;3)介电击穿即光击穿,此时激光功率密度大于液体介质的击穿阈值,激光辐射区域的液体分子在强电场作用下将被电离。一旦发生电离,就形成充满等离子体的腔体。稠密的等离子体具有比液体大得多的光吸收系数,它进一步吸收激光能量。等离子体腔发生爆炸式膨胀,犹如一次微爆炸,从而在液体中辐射冲击波。在实验中很容易判断光击穿现象。当发生光击穿时,从击穿区将辐射出明亮的白光。光击穿一个重要特征是具有阈值性,阈值的大小与液体介质的性质及液体中气核密度有关。在纯水中,阈值光强约为  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup><sup>[11,12]</sup>,发生光击穿时,液体介质的平衡状态受到强烈扰动,伴随有相变和强烈的流体动力现象,其激发声波的过程是非线性的。当光强超过阈值不多时,击穿区呈点状,它犹如一个点声源。

等离子体腔发生爆炸式膨胀,推动液体介质对外径向流动,形成一空泡。泡内压力随着泡膨胀不断下降,当降到周围介质的静液压力时,由于液体的惯性作用,空泡将继续作“过度”的膨胀,一直达到最大泡半径。此时由于泡内压力低于周围介质的平衡压力,周围液体开始反向运动,即向中心聚合,压缩空泡,使之不断收缩,空泡在闭合阶段对外辐射的强声脉冲是源于空泡内部强烈收缩的结果。当空泡第

一次闭合后由于泡内压力比周围介质的静压大,因此空泡反弹,经历第二次膨胀和压缩过程。空泡在脉动过程中还将对外辐射出若干冲击波。

### 2.1 扩束聚焦形成的单空泡击穿

激光束从激光器输出后,经正、负组合形成平行光束,经正透镜聚焦于水中。击穿区域近似为点击穿,激光击穿水介质后形成热等离子体,等离子体对外膨胀,形成单个激光空泡。空泡的膨胀、闭合辐射声波,此时形成的声源为单个球源声源。扩束聚焦击穿水介质形成的为单空泡,也可以通过高速摄像得到证明,扩束聚焦击穿示意图 1。

激光空泡具有很好的球对称性,可近似为球形空泡,设任一时刻,激光空泡的半径为  $r$ ,空泡的体积为  $V=(4/3)\pi r^3$ ,空泡壁的运动速度可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\dot{r} = \left\{ \frac{2}{3\rho_0}(p_\infty - p_v) \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 - 1 \right] - \frac{2p_1}{3(1-\gamma)\rho_0} \right\}^{1/2} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^{3\gamma} \right] + \frac{2\sigma}{\rho_0 r} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

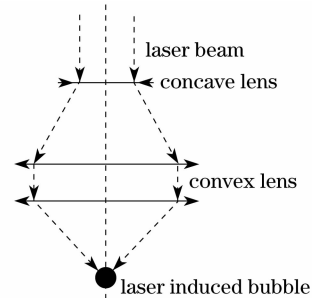


图 1 扩束聚焦击穿

Fig. 1 Optical breakdown with expanded beam focusing lens 式中  $p_\infty$  为水介质中无穷远处的液体中的静压力,  $p_v = p_v(t)$  为空泡内部的蒸汽压力,  $\sigma = \sigma(T)$  为液体的表面张力,  $\gamma$  为空气的绝热系数,  $p_1$  为初始时刻空泡内的气体压力,  $r_0$  为空泡的初始半径。考虑激光空泡形成在脉动的周期后,水介质为理想、不可压缩流体,根据 Lighthill 方程<sup>[13]</sup>:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \ddot{p} = -\dot{q} + \nabla \cdot \mathbf{f} - \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial y_j}, \quad (2)$$

式中  $p$  为声压;  $c_0$  为液体中的声速;  $q$  为液体单位体积内的质量脉动速率(空泡体积脉动引起);  $\mathbf{f}$  为作用在单位体积流体上的脉动外力,  $\tau_{ij}$  为流体应力张量。当激光空泡形成以后,声源仅与水介质的质量脉动有关。上式可以简化为

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \ddot{p} = -\dot{q}. \quad (3)$$

同时,激光空泡尺寸远小于空泡辐射声波的波

长,故(2)式的解可表示为

$$p(r,t) = \frac{Q(\dot{t})}{4\pi l}, \quad (4)$$

且 
$$Q = \int_V q dV = \frac{d}{dt}(\rho V), \quad (5)$$

式中  $\rho$  为水介质的密度,  $t$  为时间,  $l$  为水介质中的任何一点到激光空泡中心的距离,  $V$  为任何时刻空

泡的体积。在空泡的生长周期内,液体的密度可忽略起伏,即  $\rho = \rho_0$  所以

$$p(r,t) = \frac{\rho_0 \dot{V}}{4\pi r} = \rho_0 (r\ddot{r} + 2\dot{r}^2). \quad (6)$$

当空泡半径为  $r$ , 距离泡心径向距离  $l$  处的声压为:

$$p(r,l) = \frac{\sigma}{l} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 - 3 \right] + \frac{p_\infty - p_v}{l} \left\{ \frac{4r}{3} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 - 1 \right] - \frac{r_0^3}{r^2} \right\} - \frac{p_1}{(1-\gamma)l} \left\{ \frac{4r}{3} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^{3\gamma} \right] - \frac{r_0^3}{r^2} + \frac{\gamma r_0^{3\gamma}}{r^{(3\gamma-1)}} \right\} \quad (7)$$

### 2.2 非扩束聚焦击穿形成多区域击穿

激光器输出的激光束直接通过正透镜聚焦于水下,在光束达到聚焦点之前,当激光功率密度超过水的击穿阈值时,将发生光击穿。此时的击穿为多点击穿,在聚焦区形成一系列含有等离子体的球状腔,每一个腔体可看成一个脉冲球源,脉冲球源按线性叠加构成一个等离子体柱。如图 2 所示,球状腔体分布在一短直线段上,并且各自独立地激发声波,其波阵面近于球面。当脉冲激光光强足够大时,大量的发光腔体融合而形成激光火花,它具有沿激光传播方向伸长的形状,我们可把光击穿区看作是均匀分布着含等离子体腔体的点脉冲声源短线段。图 3 为非扩束聚焦情况下,激光击穿区域摄像结果。

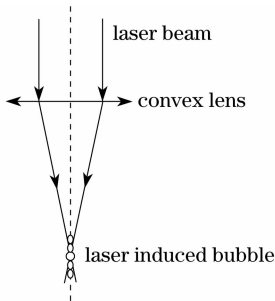


图 2 非扩束聚焦击穿

Fig. 2 Optical breakdown with convex lens focusing

从摄影结果可以看出,在激光达到透镜焦点前,水介质已经被击穿,在聚焦区域,形成一串独立脉动的空泡。由于激光能量的分散,非扩束聚焦击穿形成空泡序列直径明显小于扩束聚焦击穿的空泡直径。

假设激光非扩束击穿水介质形成的等离子体柱体长度为  $d$ , 在该柱体上均匀分布着  $n$  个相同的小激光空泡,每个激光空泡的脉动向水介质中辐射声波,每个声源点可看出脉冲声点源,如图 4 所示。

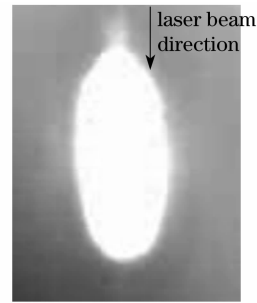


图 3 激光多点击穿图像

Fig. 3 Laser-induced breakdown image with multiple regions

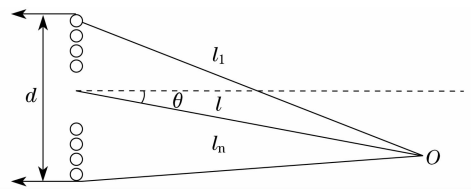


图 4 等离子体柱声辐射

Fig. 4 Acoustic signal radiation from plasma pole

$$n = d/2r. \quad (8)$$

水听器测量点  $O$  距等离子体柱中心距离为  $l$ , 对于  $n$  个小脉冲球源产生的辐射声场,需要将每个小球源的辐射声压叠加起来:

$$p = \sum_{i=1}^n p(r, l_i). \quad (9)$$

### 3 实验设计

液体激光聚焦击穿声辐射实验测量系统框图如图 5 所示。实验采用调 Q Nd : YAG 激光器输出脉冲激光 ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , 脉冲宽度 8 ns, 激光处于 0 阶模式工作状态)。激光器的输出功率通过调节供电电压进行,单脉冲能量可在 60~800 mJ 调整。为对激光脉冲能量进行监测,在光路中安置了 45° 分光镜对分光后的光束通过激光能量计进行监测。在激

光聚焦点,激光能量密度超过水的击穿阈值,发生光击穿,聚焦发出耀眼的等离子体闪光,等离子体对外膨胀形成脉动空泡,空泡的脉动辐射冲击波。对光击穿辐射的声脉冲信号通过无指向性的水听器进行接收,水听器距激光击穿点为 90 mm,水听器的线性频带宽度为 2 k~600 kHz,灵敏度级为 -216 dB (参考值为 1 V/ $\mu$ Pa)。水听器接收到的激光声信号通过电缆送入 Agilent54621A 型示波器进行采集。对激光聚焦区域击穿状态的摄像是采用带有像增强器的 FASTCAM SA1.1 型高速摄像机 在本实验中,摄像的帧频为 5 fps,像幅 320 pixed $\times$ 256 pixed 像素。为了研究激光聚焦状态对水的激光击穿效应的影响,在实验中分别采用了 3 倍扩束后聚焦和非扩束聚焦,激光击穿区域中心距离水面约 25 mm。

### 4 实验数据分析

为在同等激光参数条件下,对比不同的光学系统对激光聚焦击穿声辐射特性的差异,测试了激光空泡膨胀至最大尺寸时的半径、激光击穿辐射的声信号的强度及频谱特征、激光能量与辐射声信号声强的变化关系。

### 4.1 激光能量与空泡特征的相关性

激光击穿液体形成的空泡特征可通过高速摄像结果直接判读。通过在空泡同一位置处放置已知尺寸的参照物对比测得的,与根据瑞利理论,通过空泡膨胀、闭合辐射的声信号的时间周期计算所得的结果一致。激光聚焦击穿形成的空泡在第一次脉动周期内的图像序列见图 6。

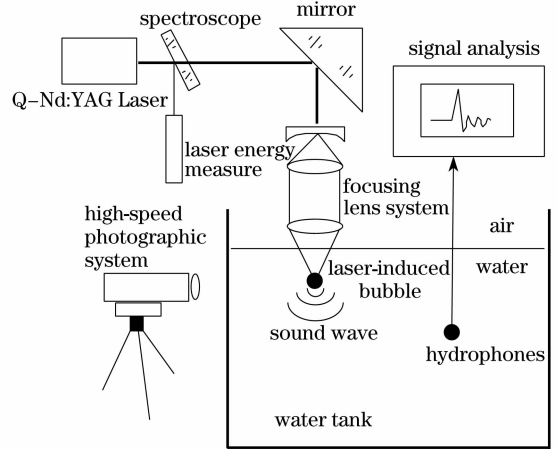


图 5 激光聚焦击穿声辐射实验测量系统  
Fig. 5 Diagram of the apparatus of laser-induced acoustic signal measurement

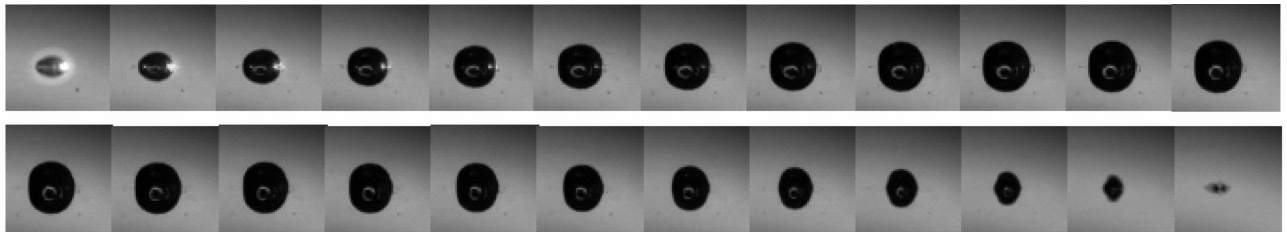


图 6 激光空泡的首次脉动  
Fig. 6 Laser cavitation bubble dynamics impulsion process for the first time

从摄像结果可以看出,激光空泡形成后的动力学现象与水动力空泡、电火花空泡动力学现象十分相似。首先,空泡在泡内外压差的作用下对外膨胀,推动周围液体介质对外径向流动。泡内压力随着泡膨胀不断下降,当降到周围介质的静液压力时,由于液体的惯性作用,空泡将继续作“过度”膨胀,一直达到最大泡半径。此时由于泡内压力低于周围介质的平衡压力,周围液体开始反向运动,即向中心聚合,同时压缩空泡,使之不断收缩,其腔内压力逐步增大。同时由于聚合液流惯性的作用,空泡被“过度”压缩,使其内部压力再次高于周围的平衡压力,直至腔内压力高到能阻止空泡压缩而达到新的平衡。至此,空泡膨胀与压缩的第一次循环结束。但此时由于泡内压力比周围介质的静压大,因此空泡

反弹,经历第二次膨胀和压缩过程。  
在采用扩束聚焦击穿中,激光击穿区域形成单空泡,空泡能量大,空泡的尺寸也较大。在采用非扩束聚焦击穿中,激光击穿区域形成多空泡,空泡的尺寸小于扩束聚焦击穿形成的空泡。在不同的聚焦状态下,入射激光能量与击穿后形成的激光空泡的最大直径相互关系见图 7,曲线 1 为采用扩束聚焦结果,曲线 2 为采用非扩束聚焦结果。  
从实验数据可以看出,聚焦击穿的激光能量越高,激光空泡直径越大;激光空泡直径与激光能量成正比关系;随着激光能量提高,激光空泡直径的增大变缓;在激光能量较小时,非扩束聚焦与扩束聚焦激光击穿形成的空泡尺寸差别不大。原因在于激光能量较小情况下,非扩束聚焦系统在光束达到焦点前,

其光路中激光功率未达到水的击穿阈值,导致焦点处,激光击穿形成的空泡能量差别不大,空泡尺寸相近;在激光能量较高时,扩束聚焦激光击穿形成的空泡尺寸大于非扩束聚焦击穿形成的空泡尺寸。

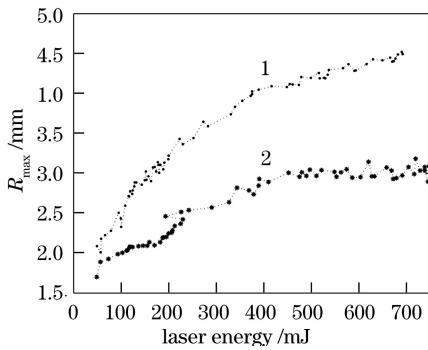


图 7 激光能量与空泡直径的变化关系

Fig. 7 Relation curve between laser energy and bubble radius

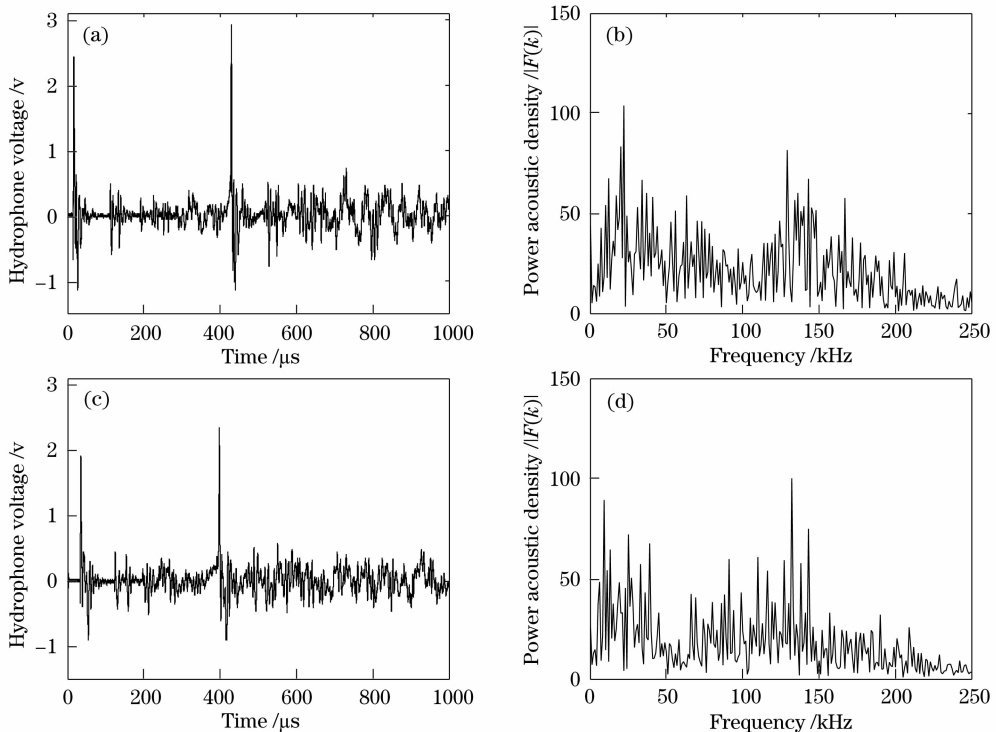


图 8 入射激光脉冲 80 mJ 下光击穿辐射声信号。(a)扩束聚焦击穿声信号时域波形;(b)扩束聚焦击穿声信号频域波形;(c)非扩束聚焦击穿声信号时域波形;(d)非扩束聚焦击穿声信号频域波形

Fig. 8 Optical breakdown acoustic signal by 80 mJ laser pulse. (a) Acoustic signal time structure with loud-beam focusing lens; (b) acoustic signal frequency with loud-beam focusing lens; (c) acoustic signal time structure focusing directly; (d) acoustic signal frequency focusing directly (d)

在不同的激光能量作用时,激光空泡的生存周期及激光击穿形成空泡辐射的声波信号的峰值声强与激光能量的变化关系如图 10、11 所示。

激光击穿辐射的声信号主要由激光等离子体空泡膨胀、空泡溃灭脉冲等组成,激光空泡溃灭辐射的

## 4.2 激光能量与击穿辐射的声信号相关性

为研究激光聚焦特性对击穿辐射声信号的影响,分别测试了不同聚焦状态、不同激光能量条件下,激光击穿辐射声信号的时域波形、声强及频谱特征。

在入射激光脉冲能量为 80 mJ、680 mJ,扩束聚焦与非扩束聚焦情况下,激光击穿辐射声信号的时域波形及频域特征分别见图 8、9 所示。

从图中可看出激光声脉冲有明显的峰值,第一个峰对应等激光离子体空泡膨胀辐射的声信号;第二个峰对应激光空泡第一次闭合辐射的声信号;第一个峰值与第二个峰值之间的距离代表激光空泡的生存周期。纵坐标是水听器输出的电信号,利用给定的水听器的灵敏度可将对应的电信号转换为相应的声压信号。

声信号强度高于激光等离子体膨胀辐射的声信号强度。该结论与水动力形成的空泡特征一致;激光空泡的生存周期与入射激光能量成正比关系,入射激光能量越高,空泡的生存周期越长。但随着激光能量提高,激光空泡的生存周期增长变缓;激光聚焦击

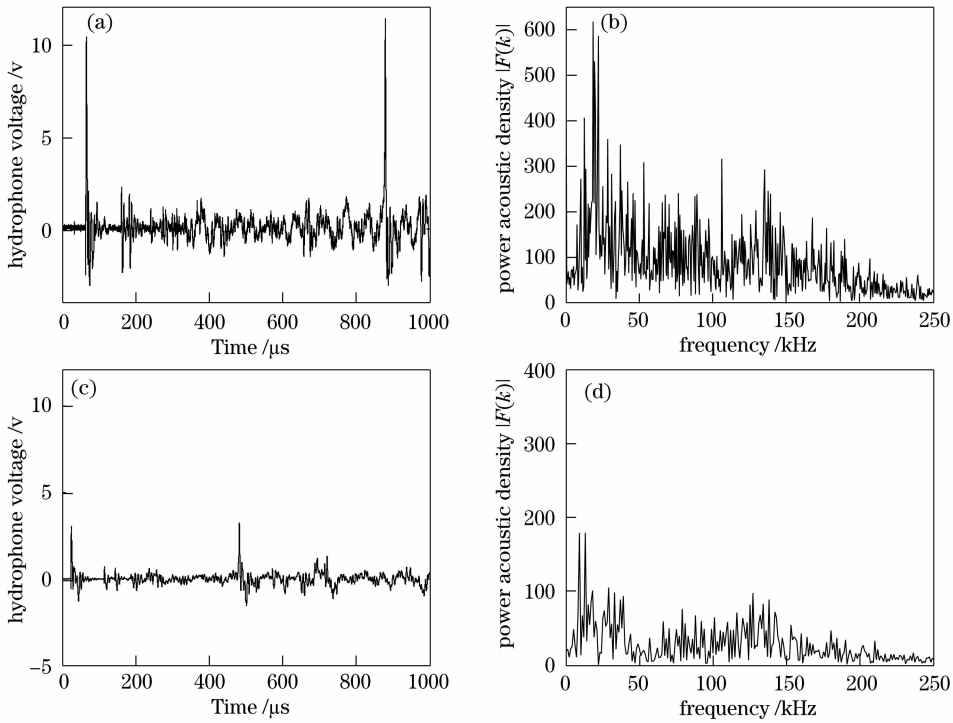


图 9 入射激光脉冲 680 mJ 下光击穿辐射声信号。(a) 扩束聚焦击穿声信号时域波形；(b) 扩束聚焦击穿声信号频域波形；(c) 非扩束聚焦击穿声信号时域波形；(d) 非扩束聚焦击穿声信号频域波形

Fig. 9 Optical breakdown induced acoustic signal by 800 mJ laser pulse. (a) Temporal profile of acoustic signal by expanded beam breakdown; (b) frequency domain profile of acoustic signal by expanded beam breakdown; (c) temporal profile of acoustic signal by optical breakdown without beam expanded; (d) frequency domain profile of acoustic signal by optical breakdown without beam expanded

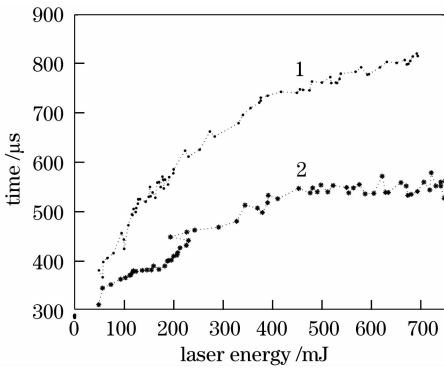


图 10 空泡脉动周期与激光能量变化关系  
Fig. 10 Relation curve between laser energy and bubble impulsion period

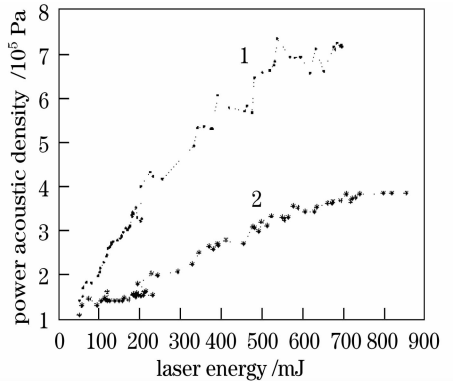


图 11 声信号峰值声强与激光能量关系  
Fig. 11 Relation curve between acoustic signal peak intensity and laser energy

穿辐射的声信号强度与入射激光能量成正比关系，入射激光能量越高，声信号越强。但随着激光能量提高，激光击穿辐射的声信号强度增长变缓；在激光能量较低下，激光扩束聚焦击穿与非扩束聚焦击穿的声信号强度、空泡生存周期相差不大；在激光能量较大情况下，激光扩束聚焦击穿声信号强度高于非扩束聚焦击穿辐射的声信号强度。原因在于在高激光功率条件下，扩束聚焦击穿形成的为单空泡，

非扩束聚焦击穿形成的为空泡序列，被水介质吸收的激光能量分散到多个空泡中，导致单个空泡的能量小，空泡尺寸小于扩束聚焦击穿形成的单空泡。同时由于多个点声源在近场的干涉效应，导致非扩束聚焦击穿辐射的声信号强度低于扩束聚焦击穿声信号强度；随着聚焦击穿的激光能量的提高，击穿辐射声信号的主频向低频段转移。

## 5 结 论

论文研究了激光与水介质相互作用时,光击穿辐射声信号的波形、强度等特征。设计了不同光学聚焦状态激光击穿效应测量系统,采用高速摄像机、高频水听器对激光击穿水介质的瞬态过程及辐射的声信号特性进行了综合测量。

激光声信号强度与激光能量成线性关系,在激光能量高于一定参数情况下,声信号强度变化不大;在低激光功率条件下,扩束聚焦与非扩束聚焦,辐射的声信号特性差异不大;

在高激光功率条件下,扩束聚焦辐射的激光声信号强度高于非扩束聚焦;

为提高激光击穿辐射声信号的光声转换效率,应对激光束进行扩束聚焦。

## 参 考 文 献

- 1 F. Blackmon, L. Antonelli. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar [C]. *SPIE*, 2005, **5778**:800~808
- 2 Duomin. He, Highpower Nd: YAG generated underwater sound source for air-submarine communication[C]. *SPIE*, 1999, **3613**: 83~92
- 3 F. Blackmon, L. Antonelli. A remote optical system for port and harbor defense [C]. *SPIE*, 2005, **5780**:99~106
- 4 Alfred Vogel, Ulrich Parlitz. Experimental investigations and numerical modeling of shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown[C]. *SPIE*, 1995, **2391**:74~88
- 5 Arnold Guerra, Vasan Venugopalan. Kester Nahen Experimental investigation of optical breakdown using nanosecond 532-and 1064-nm laser pulses delivered at high numerical aperture[C]. *SPIE*, 2001, **4260**:74~82
- 6 Chen Qingming, Cheng Zuhai. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulse laser in water[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):341~44  
陈清明,程祖海.脉冲激光在水中激发声脉冲的光声能量转换效率[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):341~44
- 7 Alfred Vogel, Joachim. Noack Shock wave energy and acoustic energy dissipation after laser-induced breakdown [C]. *SPIE*, 1998, **3254**:180~189
- 8 Yu Quanzhi, Li Yutong. Interaction of ultrashort high intensity laser pulses with liquids[J]. *Physics*, 2003, **32**(9):585~589  
于全芝,李玉同.超短超强激光与液体的相互作用研究[J]. *物理*, 2003, **32**(9):585~589
- 9 Wang Sande, Zhang Xiaoshan, Shang Zhiyuan. Study on effect of optical penetration on the thermoelastic ultrasound generated by laser in liquid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):225~228  
王三德,张小安,尚志远.液体中光声热弹光穿透效应的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3):225~228
- 10 Li Ming, Zhang Hongchao, Shen Zhonghua *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形成过程的物理分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1610~1614
- 11 Li Qiang, Lei Hong, Huang Minshuang *et al.*. Research on high power laser beam and focus power intensity distribution directly measuring instrument [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(3): 257~262  
李强,雷 劼,黄民双等.大功率激光光束聚焦光斑功率密度分布直接测量仪的研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(3):257~262
- 12 Alfred Vogel, Joachim Noack. Kester Nahen Energy balance of optical breakdown in water[C]. *SPIE*, 1997, **3245**:168~179
- 13 Huang Jingquan. Noise at inception and collapse of a cavity[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1990, **11**(8):725~730  
黄景泉.空化起始和溃灭阶段的噪声[J]. *应用数学和力学*, 1990, **11**(8):725~730