

文章编号: 0258-7025(2010)05-1332-06

# 水下目标探测的激光声特性

宗思光<sup>1</sup> 王江安<sup>1</sup> 马明奎<sup>2</sup> 马治国<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033; <sup>2</sup> 中国人民解放军 92564 部队, 广东 汕头 515000)

**摘要** 激光声作为水下声源的一种新的激发方法, 具有高声强、窄脉冲、宽频谱和可远距离激发等优点。为分析激光击穿液体辐射声波特性及应用于水下目标探测的性能, 在光击穿形成单点球源辐射声波条件下, 推导了激光声的远场声辐射模型, 设计了激光声实验测量系统。采用测量水听器对激光击穿水激发的声波信号的时域特征、频谱特征、激光声信号与激光能量相关性、水下传输特性进行了测量, 并在消声水池中利用激光声信号对弱小目标进行了探测实验, 得到了激光声波信号的相关特性规律。研究结果有助于推动激光声探测水下目标的深入开展。

**关键词** 激光光学; 激光声; 目标探测; 水下声源

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1332

## Investigation of Laser-Induced Acoustics Signal for Target Detection

Zong Siguang<sup>1</sup> Wang Jiang'an<sup>1</sup> Ma Mingkui<sup>2</sup> Ma Zhiguo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electron Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)  
(<sup>2</sup> Department 92564 of Chinese People's Liberation Army, Shantou, Guangdong 515000, China)

**Abstract** Laser-induced acoustic signal is a new approach for underwater acoustic source, which has much virtue such as high intensity, short pulse and broad frequency. The acoustic signal characteristic of laser-induced breakdown is studied and its corresponding theory model is systemically analyzed. The experimental measure investigation is formed with the high power laser, water tank and high frequency hydrophone. The characteristic of acoustic signal such as intensity, frequency and transmitting is analyzed. Based on the underwater target detection technology, the experiment of underwater target detection is done through laser-induced acoustic signal. The experimental results show that the laser-induced acoustic signal has a salience role during the small target detection. This makes a stride for investigation of laser-acoustic underwater objects detection.

**Key words** laser optics; laser-induced acoustic; target detection; underwater acoustic source

## 1 引言

利用传统声源产生水下声波时, 换能器必须浸没在水中, 换能器置于水中, 大大限制了水下目标探测设备的数据获取率。激光与液体介质相互作用可以在液体中激发声波, 形成的声源即激光声, 可以利用车载激光器或空中机载激光器发射激光束, 通过光学系统调节在水面或水下激发声波, 即可以远程激发声波, 为提高声源发射平台的机动性提供了可能。同时, 激光声源与传统固体声源相比, 声脉冲窄、频谱宽, 对水下目标具有高的距离和方位分辨能力<sup>[1~3]</sup>。

激光声作为水下声源的一种新的激发模式, 具有高声强、窄脉冲、宽频谱和可远距离激发等优点,

激光声理论及应用研究对海洋开发及国防具有重要意义。本文分析了激光声的光击穿产生机制, 设计了激光声实验测量系统。利用调 Q Nd:YAG 激光聚焦水下击穿水介质形成激光声源, 在 7 m 长玻璃钢水池中采用测量水听器对激光激发的声波信号的时域特征、频谱特征、激光声信号与激光能量相关性、水下传输特性进行了测量, 并在消声水池中利用激光声信号对弱小目标进行了探测实验。

## 2 光击穿液体辐射声波机理

激光在液体中激发声波效应的机理很多, 主要与激光和液体相互作用区域的能量密度有关, 分为

收稿日期: 2009-07-14; 收到修改稿日期: 2009-08-24

基金项目: 国防基金(9140A14060207JB11)资助课题。

作者简介: 宗思光(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事声光学、激光空化和水下激光探测等方面的研究。

E-mail: zongsiguang@163.com

热膨胀、气化和光击穿机制三种<sup>[4,5]</sup>。热膨胀机制是当脉冲激光入射到液体中时,受辐射的液体介质因吸收光能而被瞬间加热,受热介质迅速膨胀,从而向液体中辐射脉冲声波。气化机制主要发生在液体表面,具有阈值性,当激光功率密度达到液体气化阈值时,被激光照射的液体介质温度达到沸点,物质由液态转变为气态,在液体表面发生强烈气化,因气化物质的逸出而产生的脉冲反作用力作用在液面上,从而在液体中激发声脉冲。光击穿机制是当激光功率密度达到液体击穿阈值时,液体介质被电离击穿,产生等离子体,等离子体腔体迅速膨胀,类似微爆炸,向液体中辐射声波,等离子体腔体膨胀形成空泡,空泡产生振荡运动,并在溃灭时再次向液体中辐射声波。三种机制的光声转化效率不同,光击穿机制的优点是光声转换效率高<sup>[6~8]</sup>,可产生强脉冲声波,缺点是对光学聚焦系统要求较高。

当高功率激光聚焦于液体中时,若聚焦区域激光能量密度超过液体的击穿阈值,则在光束聚焦区域内将发生光学击穿,随之产生高温高压等离子体,该等离子体吸收激光能量后对外膨胀,形成以超音速传播的冲击波。这一冲击波在传播了几个毫米之后,衰减为普通声波信号。同时激光等离子体对外将发展形成空泡,激光空泡形成后将经历膨胀、收缩、反弹系列过程,并在收缩至最小尺寸时向外辐射冲击波,该冲击波传播一段距离后,同样衰减为普通声波,该部分的研究成果可见文献<sup>[9,10]</sup>。

激光束经过扩束聚焦系统聚焦于水介质中,击穿区域近似为单点击穿,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<sup>[9]</sup>,扩束聚焦击穿示意图如图 1 所示。

设  $t_0$  时,腔体半径为  $r_0$ ,在  $t_0 + dt$  时,腔体半径为  $r_0 + dr$ ,腔体对外膨胀,从而向液体中辐射了声波,假设等离子体腔体膨胀过程近似为各向均匀,则它所产生的声波波阵面是球面,辐射的是均匀球面波,如图 2 所示。

以腔体中心为原点,建立球坐标系。因为波阵面是球面,距离腔体  $r$  处波阵面的面积为  $S = 4\pi r^2$ ,腔体的对外膨胀可视为脉动球源,脉动球源的声辐射模型可简化为<sup>[11,12]</sup>

$$p = \frac{A}{r} \exp[j(\omega t - kr)] + \frac{B}{r} \exp[j(\omega t + kr)], (1)$$

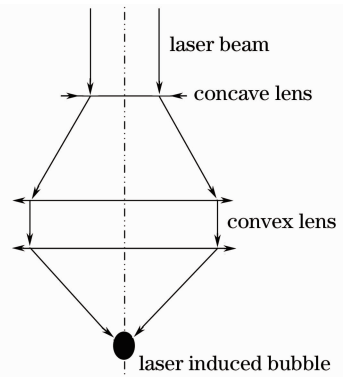


图 1 扩束聚焦击穿示意图

Fig. 1 Schematic of expanding-focusing lens system with loud-beam

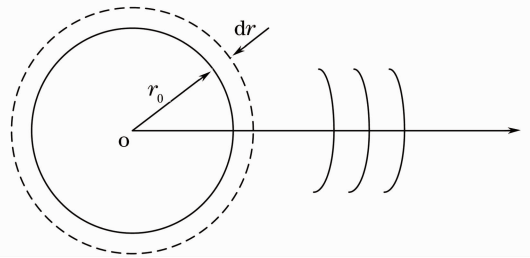


图 2 球形腔体声辐射结构

Fig. 2 Sphere acoustic radiation

式中第一项为腔体向外辐射的球面波,第二项为向腔体中心会聚的球面波。由于等离子体腔体是对外膨胀,没有向球心辐射的声波,即  $B=0$ ,因此,激光等离子体对外膨胀辐射的远场声波可写为

$$p = \frac{A}{r} \exp[j(\omega t - kr)], (2)$$

式中  $A/r$  为声压振幅, $r$  为观测点到腔体的中心的距离, $k = \omega/c$  为波数。

对于脉动球源,径向质点的速度与声压存在关系

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}, (3)$$

所以径向质点的速度可表示为

$$v_r = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{A}{r\rho_0 c_0} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) \exp[j(\omega t - kr)], (4)$$

式中  $\frac{A}{r\rho_0 c_0} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right)$  的绝对值即为速度的振幅。对于常数  $A$ ,主要取决于脉动球源的膨胀情况。

引入球源表面的振动速度为

$$u = u_a \exp[j(\omega t - kr_0)], (5)$$

式中  $u_a$  为振幅幅值, $-kr_0$  为初相位角。

在脉动球源的表面上,液体介质质点的运动速

度可近似等于球源表面的膨胀速度,所以

$$(v_r)_{r=r_0} = u. \quad (6)$$

将(4)式代入可得

$$A = \left| \frac{\rho_0 c_0 k r_0^2 u_a}{1 + (k r_0)^2} \right| \exp(j\theta), \quad (7)$$

式中  $\theta = \arctan(1/k r_0)$ 。所以等离子腔体辐射的声压在远场可表示为

$$p(r, t) = \frac{|A|}{r} \exp[j(\omega t - kr + \theta)], \quad (8)$$

式中

$$|A| = \left| \frac{\rho_0 c_0 k r_0^2 u_a}{1 + (k r_0)^2} \right|, \quad (9)$$

根据(8)式可见,距离激光击穿点形成的球源为  $r$  处,声压幅值的大小  $|A|$  不仅与球源的振速  $u_a$  有关,还与辐射声波的频率以及击穿形成的球源(空泡)半径有关。从高速摄影中,可以看出激光点击穿

时等离子体空泡可近似为球形,在假设激光等离子体空泡膨胀声波为球源辐射条件下,得到了远场等离子体空泡膨胀声波的近似表达式。

### 3 水介质光击穿声辐射特性的测量

#### 3.1 实验设计

实验系统如图 3 所示。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, 单脉冲能量 40~1000 mJ 可调)。实验使用消像差透镜组,对激光光束经负透镜扩束后由正透镜通过水槽上光学窗口会聚至水中。在主光路中,安置了  $45^\circ$  分光镜,通过激光能量计测量分光镜分出部分光束的能量,依据分光镜分光比例及每次能量计测量值,可对激光束的能量进行监测。

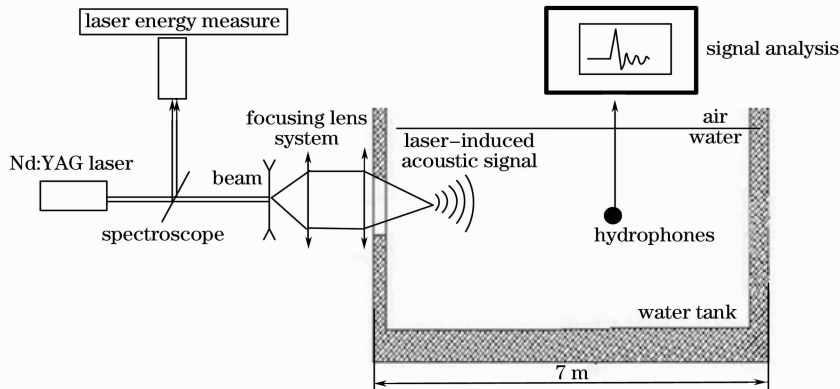


图 3 激光聚焦击穿声辐射实验测量系统

Fig. 3 Diagram of the measure apparatus of laser-induced acoustic signal in water

在聚焦区域发生光击穿,发出耀眼的等离子体闪光,并向水介质中辐射激光等离子体冲击波和空泡溃灭冲击波。冲击波传输很短一段距离后,衰减为普通声波继续向水中传播。水听器与光击穿区在同一水平面上,水听器接收方向指向光击穿区,距离击穿区的距离在 0.5~6.5 m 范围内可调。实验采用水听器在水平面内的移动是通过布置在水槽中的滑道进行,垂直移动和转动通过微调平台调节。实验用水槽长 7 m,宽 1.2 m,高 1.0 m,测量时水深 0.9 m。激光击穿辐射的声信号传播至水听器的直达信号、水槽壁反射信号和水面反射信号可通过到达的先后时间区分。

#### 3.2 激光击穿波形特性分析

水听器接收到的全时段激光声信号较为复杂,原因在于水听器处于刚性的玻璃钢水槽中,水槽四壁、水底、水面对激光声信号造成多次反射。在对激光声信号波形分析时,以激光声信号的直达波为主。

在距离激光声源点 2.5 m 处,水听器测量到的直达激光声脉冲序列如图 4 所示,可见较明显的激光等离子体空泡膨胀声波、空泡第一次溃灭声波、空泡第二次溃灭声波。激光等离子体空泡膨胀声波、空泡溃灭声波脉冲的展开如图 5 所示。

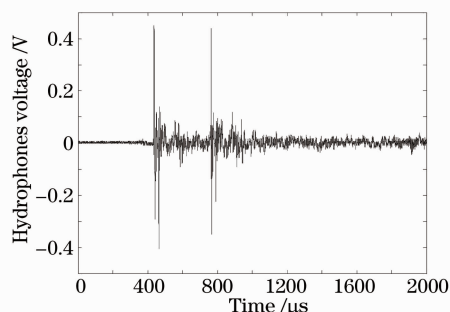


图 4 2.5 m 处水听器测量到的直达激光声脉冲序列  
Fig. 4 Measured laser-induced acoustic signal at 2.5 m

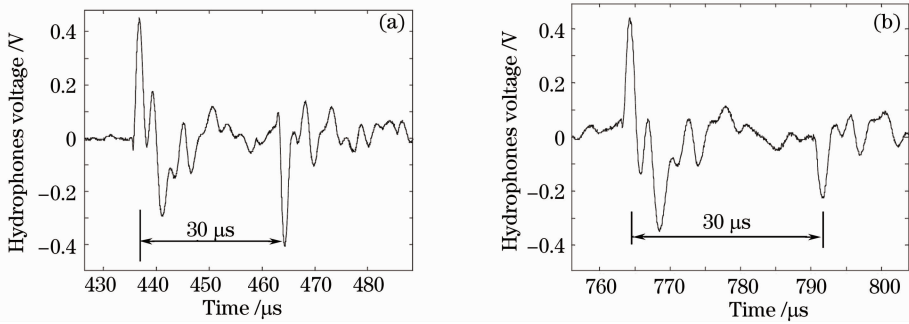


图 5 激光声信号展开图。(a)激光等离子体空泡膨胀声波 ;(b)空泡溃灭声波

Fig. 5 Underwater laser-induced acoustic signal. (a) acoustic signal of plasma cavitation bubble expansion; (b) acoustic signal of cavitation bubble collapse

从图 5 可以看出等离子体空泡膨胀声波、空泡溃灭声波后约 30  $\mu s$  分别跟随反相的声脉冲信号。从射线声学知道,激光等离子体空泡膨胀声波、空泡溃灭声波可近似看作球形声波向外辐射,激光击穿点距离玻璃壁面约 23 mm。壁面对声波的反射信号相对于直达信号达到水听器的滞后时间  $\Delta t$  约为 31  $\mu s$ ,实验测得两个反相脉冲的时间间隔约为 30  $\mu s$ ,两者基本相符。

### 3.3 激光声信号与激光能量相关性

声源级是距声源 1 m 处的声压级,它是声源所产生的声波强弱的度量(单位: dB)。在激光脉冲能量为 350 mJ,扩束聚焦情况下,水听器距激光击穿点(即声源)1 m 处测量输出电压信号的变化曲线如图 6 所示。根据水听器输出电压信号及灵敏度,可计算出 1 m 处水听器峰值声压值为 28214 Pa。

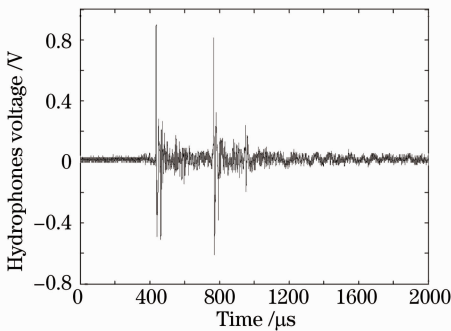


图 6 在 1 m 处激光击穿辐射的水中声脉冲波形  
Fig. 6 Acoustic signal generated by laser-induced radiation at 1 m

通过调节激光器的输出能量,统计得到的激光束聚焦击穿、距离击穿点 150 mm 处,激光等离子体空泡膨胀声波强度、激光空泡溃灭声波强度随入射激光能量的变化规律如图 7 所示。

从实验数据可以看出:1)激光聚焦击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

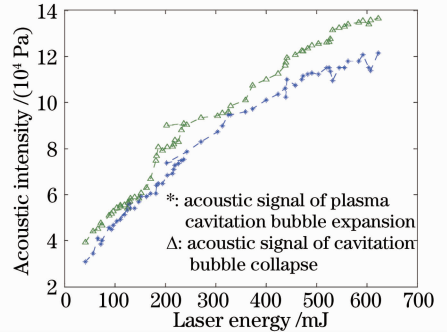


图 7 激光声信号强度与入射激光能量关系  
Fig. 7 Relation between acoustic signal intensity and laser energy

能量越高,声信号越强;但随着激光能量提高,光击穿辐射声信号强度增长速度变缓;2)空泡溃灭辐射的声信号强度大于等离子体空泡膨胀辐射的声信号强度,该结论与文献[9]高速摄影结果一致。

### 3.4 激光声信号频谱

从激光击穿水辐射声脉冲波形展开来看,激光等离子体空泡膨胀声波、激光空泡溃灭声波的持续时间非常短,约 15  $\mu s$ ,因此水中的激光击穿获得的声波频谱相当宽。激光声频谱如图 8 所示。频率分析表明,激光击穿获得的声频谱从几赫兹至几百千

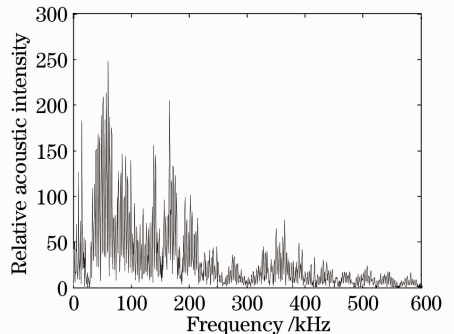


图 8 激光击穿辐射声频谱图  
Fig. 8 Fourier transforming spectrum of laser-induced acoustic signal

赫兹, 声波峰值频率分别为 15, 60, 166 和 365 kHz。激光声脉冲窄、频谱宽, 在应用于水下目标探测中, 具有定位精度高的特点。

### 3.5 激光声信号传输特性

声波在介质中的传播损失, 主要包括扩展损失、衰减损失和界面引起的损失。在实验中距离激光击穿点 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 和 6.5 m 对激光声信号进行了测量, 激光等离子体空泡膨胀声波、空泡第一次溃灭声波的峰值信号强度随距离变化如图 9 所示。

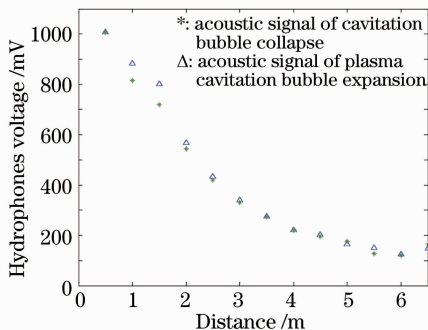


图 9 激光等离子体声波、空泡溃灭声波声强随距离的变化

Fig. 9 Relation between the acoustic intensity and the distance

从数据统计可以看出, 在均匀的液体介质中, 在光击穿机制下, 激光声峰值声压近似按  $r^{-1}$  规律衰减。

### 4 水下目标的激光声探测验证

实验设计思路如下: 利用聚焦激光击穿水向水中发射声脉冲, 激光声脉冲照射目标而产生回波, 通过水听器检测回波, 进而实现对水下的目标的探测。水槽长 1.2 m, 宽 0.8 m, 深 0.7 m。为模拟海洋中声波传输自由场, 水槽四壁、水槽底、水面安装了吸声材料, 消除水槽壁和水面的声反射干扰。吸声材料为 ATF-1 型无硫橡胶吸声尖劈, 对 20 kHz 以上的声波吸收效率在 99% 以上。在水槽中放置具有一定声反射特性的目标物, 安置在水槽中的水听器接收激光声信号的直达波及目标的反射波。在实验中, 分别采用厚度为 1.2 mm 的 85 mm × 100 mm, 70 mm × 70 mm, 85 mm × 45 mm, 50 mm × 45 mm, 35 mm × 35 mm 的铝板作为目标, 分别计为 5~1 号铝板, 其对应目标强度依次减弱。铝板采用直径为 0.3 mm 的钢丝悬挂于水槽中, 经实测, 钢丝对测量声场的影响非常小, 可近似忽略。

保持入射聚焦激光能量基本不变, 水听器在距离目标靶约 80 cm 处, 测量的激光声直达波及不同目标物的回波如图 10 所示。

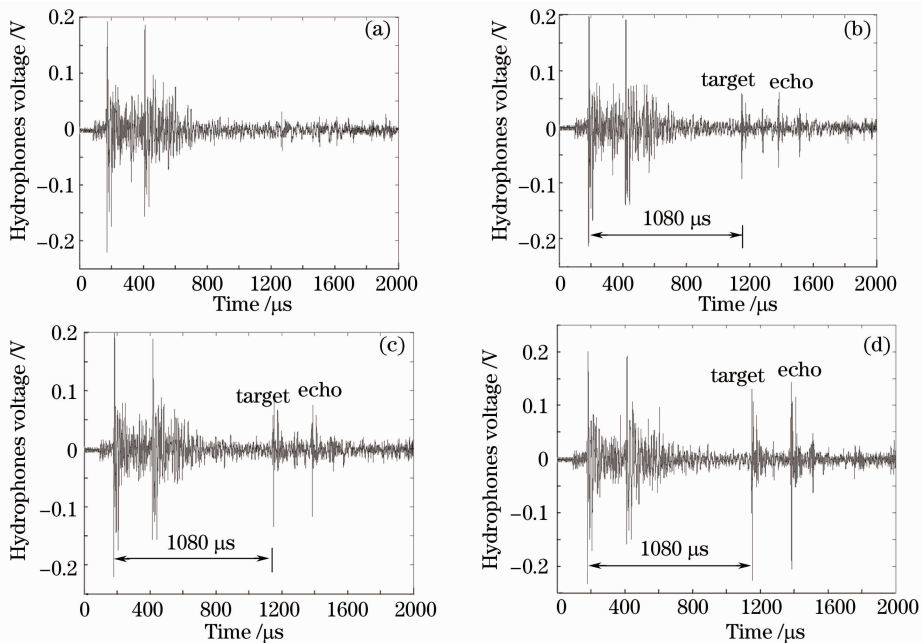


图 10 水听器距目标 80 cm 处输出信号波形。(a) 无目标; (b) 1 号铝板目标; (c) 3 号铝板目标; (d) 5 号铝板目标

Fig. 10 Hydrophone signal 80 cm away from target. (a) no target; (b) No. 1 target; (c) No. 3 target; (d) No. 5 target

对实验数据进行分析, 可以得出以下结论:

即随着目标强度的减弱, 水听器接收到的激光声回波变弱。

1) 激光击穿水辐射的声脉冲可对一定特性的目标靶材进行有效探测, 随着目标靶材面积的变小,

2) 激光击穿水辐射的声脉冲窄、频谱宽, 对水



下目标定位精度高,较适用于小目标的探测。从激光声脉冲的特性分析来看,激光声信号理论上对目标的分辨率可达厘米以下。在本文构建的较粗糙的实验系统情况下,采用激光声为发射信号,单只水听器就可对截面为 35 mm×35 mm 的铝板目标进行有效探测。

3) 采用光学系统可对激光进行扫描,易于实现运动的激光击穿水介质区域,即形成运动的激光声源,便于对目标成像探测,激光击穿水辐射的声信号是图像声纳的良好声源。

4) 激光击穿水辐射的离子声波、空泡溃灭声波组成双声脉冲,是有效的标记性特征,对目标进行探测时,可提高检测及识别概率。

5) 为提高激光声的探测距离,一是提高入射激光能量,产生更高声强的声波,二是采用高灵敏、低噪声水听器组成声接收基阵,提高声接收的灵敏度。

## 5 结 论

设计了激光声信号特性测量及目标探测实验系统,对激光声信号的时域特征、频谱特征、激光声信号与激光能量相关性、水下传输特性、小目标探测性能进行了测量,从实验结果可以看出,激光声脉冲包含等离子体膨胀声波、空泡溃灭声波,峰值声压脉宽为 15  $\mu$ s,主频分别为 15,60,166 和 365 kHz;激光声峰值声压近似按  $r^{-1}$  规律衰减;激光声信号强度与入射激光能量成正比;激光击穿水辐射的声脉冲窄、频谱宽,对水下目标定位精度高,较适用于小目标的探测,具有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

1 F. Blackmon, L. Antonelli. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar [C]. *SPIE*, 2005, **5778**: 800~808

2 He Duomin. High-power Nd:YAG-generated underwater sound source for air-submarine communication [C]. *SPIE*, 1999, **3613**: 83~92

3 Li Rongfu, Cui Guihua, Tian Zuoxi *et al.*. Laser-Acoustic Remote Sensing Technique [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. 36~39  
李荣福,崔桂华,田作喜等. 激光声遥感技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003. 36~39

4 Y. Berthelot. Laser Generation of Sound by Nonlinear Thermal Expansion [M]. America AD Report A276955MF, 1994. 34~36

5 G. V. Ostrovskaya. Efficiency of optical-to-acoustic energy conversion upon the interaction of a pulsed laser radiation with a liquid[J]. *Tech. Phys.*, 2002, **47**(10): 1299~1305

6 T. A. Dunina, S. V. Egerev, A. T. Skvortsov. Optoacoustic Source as a Tool for the Investigation of Nonlinear Acoustic Effects [M]. Berlin, Heidciberg: Springer-Veriag, 1992. 294~296

7 Chen Qingming, Cheng Zuhai. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulse laser in water[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 341~344  
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): 341~344

8 Wang Sande, Zhang Xiao'an, 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

9 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Wang Huihua. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2197~2202  
宗思光,王江安,王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2197~2202

10 Zong Siguang, Wang Jiang'an. Study of laser-generated sound in the different optical focusing lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1384~1390  
宗思光,王江安. 不同光聚焦状态的光击穿声辐射特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1384~1390

11 Du Gonghuan, Zhu Zhemin, Gong Xiufen. Acoustics Foundation [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001. 59~62  
杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2001. 59~62

12 Ma Dayou. Modern Acoustics Theory Foundation[M]. Beijing: Science Press, 2004. 69~78  
马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京:科学出版社,2004. 69~78