

# 激光声特性与激光脉冲能量对应关系研究

王雨虹, 王江安, 宗思光, 马治国  
(海军工程大学电子工程学院光电研究所, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**分析了激光脉冲能量与激光声特性的对应关系。采用脉冲能量可调的 Nd:YAG 激光器产生激光声信号, 利用水听器测量激光声信号。结果表明, 激光脉冲能量在 70 ~ 300mJ 范围内变化时, 随着激光脉冲能量的增加, 激光声信号峰值声压具有线性增加的趋势, 等离子体膨胀声波与空泡溃灭声波的时间间隔也相应增加, 等离子体膨胀声波的峰值声压比空泡溃灭声波的峰值声压低, 激光声信号的主频与脉冲能量的对应关系较弱。

**关键词:**脉冲能量; 声特性; 对应关系

**中图分类号:** O426.3      **文献标识码:** A

## Coincidence Relation Between Laser Pulse Energy and Hydroacoustic Speciality

WANG Yu-hong, WANG Jiang-an, ZONG Si-guang, MA Zhi-guo  
(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The coincidence relation between laser pulse energy and hydroacoustic speciality was analyzed. Achromatic aberration lens system, Nd:YAG laser which pulse energy is adjustable, a hydrophone and a digital oscilloscope are used to generate and record laser induced hydroacoustic signal. The conclusions as follows: First, when the pulse energy increases within the range from 70mJ to 300mJ, the peak pressures of laser-induced hydroacoustic linearly increase, the interval between plasma expanding induced hydroacoustic and bubble collapse induced hydroacoustic increase correspondingly. Second, the peak pressure of bubble collapse induced hydroacoustic is higher than that of plasma expanding induced hydroacoustic. Third, there is a weak relation between the frequency of laser induced hydroacoustic and laser pulse energy.

**Key words:** pulse energy; hydroacoustic speciality; coincidence relation

### 1 引言

激光脉冲聚焦于水中, 当聚焦区域的激光能量密度达到或超过水的击穿阈值时, 会引起水介质的光击穿<sup>[1]</sup>。光击穿会伴随着等离子体闪光、空泡脉动和声辐射等现象<sup>[2]</sup>, 其中光击穿时等离子体膨胀产生的声波和随后空泡溃灭产生的声波统称为激光声, 前者称为等离子体膨胀声波, 后者称为空泡溃灭声波。激光声在近距离(厘米量级)以冲击波的形式存在, 在远距离衰变成普通声波。德国的 A. Vogel 等人对小功率激光产生的激光声的近场进行了研究并建立了数值计算模型, 主要应用于医学眼科

手术领域。国内的大连测控技术研究所对大功率二氧化碳激光器产生的激光声的远场进行了研究, 南京理工大学的倪晓武等人对水下激光加工、激光空泡运动特性、激光声的近场研究较多<sup>[3-9]</sup>。研究近场的目的是进行激光加工或激光手术, 研究远场的目的是把激光声作为探测声源。

**基金项目:** 武器装备预研基金项目 (No. 51400010105JB1101); 武器装备预研重点基金项目 (No. 9140A14060207JB11) 资助。

**作者简介:** 王雨虹 (1974 -), 男, 博士研究生, 研究方向为激光击穿透明液体声特性研究。E-mail: wyhlgx230@126.com

**收稿日期:** 2008-04-12; **修订日期:** 2008-05-21

目前,对激光击穿液体介质产生的等离子体膨胀声波与空泡溃灭声波进行综合分析的研究报道很少,同时由于激光脉冲参数、实验计量手段的差异,导致文献报道的激光声脉冲特性具有较大的差异性<sup>[3-7]</sup>。

本文构建了激光声实验的产生和测量系统。对激光脉冲能量与激光声的峰值声压、激光脉冲能量与等离子体膨胀声波和空泡溃灭声波的时间间隔,激光脉冲能量与激光声信号的主频等关系进行了较系统的研究,对通过控制激光参数产生所需的激光声信号具有一定的指导意义。

### 2 实验系统

实验测量系统如图1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10ns,单脉冲能量可调。激光束经扩束后,通过焦距为52.9mm的正透镜聚焦于水中,在聚焦区域产生光空化气泡并辐射激光声信号。光学会聚系统采用了消像差技术,以避免焦斑弥散。水听器的线性频带宽度为(2~600)kHz,灵敏度-209dB,距离激光击穿点5cm,激光声信号通过电缆送入Agilent 54641A示波器。

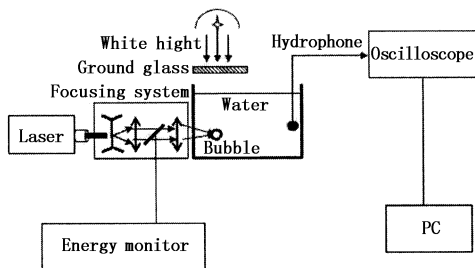


图1 激光声的产生与测试系统

### 3 实验结果分析

图2是激光脉冲能量与激光声信号之间的对应关系图。从中可以看出,随着脉冲能量的增加,声压随之增加,前后两个声波信号(等离子体膨胀声波和空泡溃灭声波信号)的时间间隔也进一步增大,下面进行详细分析。

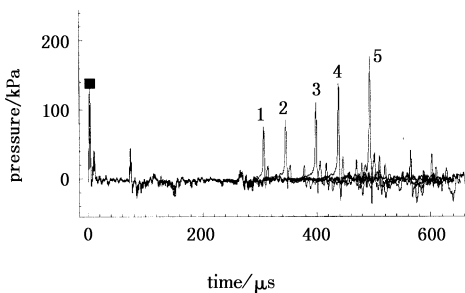


图2 激光脉冲能量与激光声波形  
(1-102mJ;2-128mJ;3-164mJ;4-191mJ;5-242mJ;  
■ - 等离子体膨胀声波;1-5 指空泡溃灭声波)

### 3.1 激光声信号峰值声压特性与脉冲能量的对应关系

图3、图4是不同激光能量下的空泡膨胀、溃灭辐射声波的展开图。图5是激光脉冲能量与峰值声压对应关系。

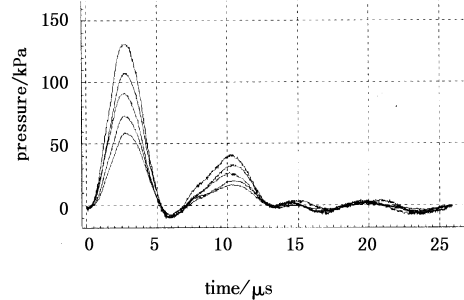


图3 等离子体膨胀声波局部放大对比图  
(声压由低到高对应图2中的1-5)

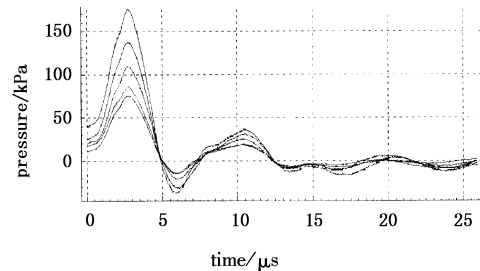


图4 以空泡溃灭声波开始时间为基准点的  
空泡溃灭声波信号比较图  
(声压由低到高对应图2的1-5)

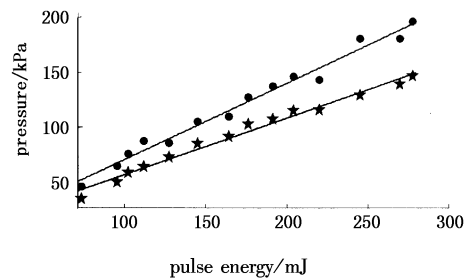


图5 激光脉冲能量与峰值声压的对应关系  
(★ - 等离子体膨胀声波峰值声压;  
● - 空泡溃灭声波峰值声压)

从图3~图5实验数据可得出:①等离子体膨胀声波峰值声压和空泡溃灭声波峰值声压随着能量的增加也进一步增加;②空泡溃灭声波峰值声压高于等离子体膨胀声波峰值声压,随着能量的增加它们之间的差值更大。③激光脉冲能量在102~242mJ的范围内,激光声信号的峰值声压与激光脉冲能量呈线性关系,其中等离子体膨胀声波峰值声压与脉冲能量函数关系的斜率约为0.52,空泡溃灭声波峰值声压与脉冲能量函数关系的斜率约为0.69。④随着激光脉冲能量的增加,光声转换效率也相应提高,原因是随着能量的增加,等离子体腔体对

激光的吸收系数会变大,转换成声能的部分也相应增加更多。与文献[6]的结论相一致。

### 3.2 激光声信号频谱特性与脉冲能量的对应关系

对激光声信号作 FFT 变换,声信号的功率谱图如图 6 所示。归一化功率最大值代表的频率对应于截取的激光声信号的时间长度。归一化功率的第二大极大值对应的频率是 116.6kHz 代表信号的主频率,可以说激光声的主频与脉冲能量之间的对应关系较弱,空泡溃灭声波也有类似的结论。

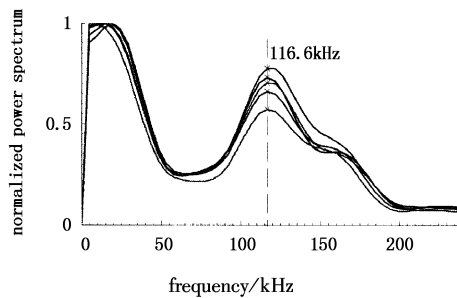


图 6 图 3 中的等离子体膨胀声波信号的功率谱图  
(功率谱由高到低对应图 3 中的由低到高的等离子体膨胀声波信号)

### 3.3 等离子体声波与空泡溃灭声波之间时间间隔与脉冲能量的对应关系

图 7 是脉冲能量与等离子体膨胀声波和空泡溃灭声波之间的时间间隔关系图。随着激光脉冲能量的增加,等离子体膨胀声波和空泡溃灭声波之间的时间间隔也相应增加。

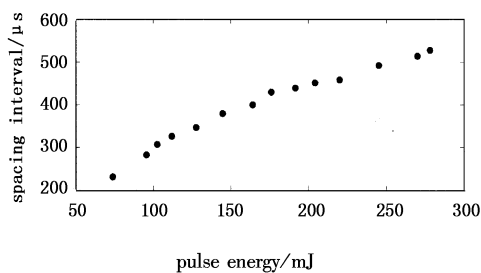


图 7 脉冲能量与等离子体膨胀声波和空泡溃灭声波之间的时间间隔关系

根据 Rayleigh 推导的公式<sup>[10]</sup>:

$$E_b = \frac{4}{3} \pi P_\infty R_{\max}^3 \quad (1)$$

$$R_{\max} = \frac{T_c}{0.915 \sqrt{\rho/P_\infty}} \quad (2)$$

式中, $R_{\max}$ 为最大空泡半径; $P_\infty$ 为液体静压力; $T_c$ 为空泡收缩持续时间; $\rho$ 为液体密度; $E_b$ 为泡能。

当激光能量增加时,会引起泡能 $E_b$ 的增加。根据瑞利公式分析,可得到随着激光能量增加激光空

泡的半径及空泡脉动的周期也相应增加的结论,与图 7 结论相符。

## 4 结论

构建了激光声实验的产生与测量系统,对不同能量激光脉冲击穿水介质的激光声特性进行了测量、分析。实验结果与已有的水下空泡理论计算结果吻合。研究结果可为水下激光加工、激光医疗、空化空蚀相关流体力学的研究提供一定的理论和实验支持。

由于激光参数的可调范围有限,今后将通过改变更多的激光参数和更大的参数变化范围对激光参数与激光声信号的对应关系进行研究。

### 参考文献:

- [1] Paul K Kennedy, Stephen A Boppart, Daniel X Hammer, et al. A first-order model for computation of laser-induced breakdown thresholds in ocular and aqueous media; Part I-Theory [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1995, QE - 31: 2241 - 2249.
- [2] A Vogel, J Noack, K Nahen, et al. Energy balance of optical breakdown in water at nanosecond to femtosecond time scales [J]. Appl. phys. B, 1999, 68: 271 - 280.
- [3] Vogel A, Bush S, Parlitz U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water [J]. J. Acoustic. Soc. Am, 1996, 100(1): 148 - 165.
- [4] 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: 3 - 64.
- [5] F Blackmon, L Antonelli, A Kalinowski. A remote optical system for port and harbor defense [J]. Proc. of SPIE, 2005, 5780: 99 - 106.
- [6] 陈清明, 程祖海, 朱海红. 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.
- [7] Schaffer C B, Nashimura N, Glezer E N, et al. Dynamics of femtosecond laser-induced breakdown in water from femtoseconds to microseconds [J]. Optics express, 2002, 10(3): 196 - 203.
- [8] Christopher E Brennen. Cavitation and bubble dynamics [M]. Oxford: Oxford University Press, 1995: 79 - 107.
- [9] 徐荣青, 陈笑, 沈中华, 等. 固体壁面附近激光空泡的动力学特性研究 [J]. 物理学报, 2004, 53(5): 1413 - 1418.
- [10] Rayleigh Lord. On the pressure developed in liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. Philos. Mag. 1917, 34: 94 - 98.