

文章编号: 1001-3806(2006)06-0605-03

脉冲 CO₂ 激光水下致声声脉冲特性的实验研究

陈清明^{1,2}, 程祖海^{*}, 左都罗¹, 朱海红¹, 翟冰杰¹, 陈钰琦¹

(1. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 武汉理工大学 理学院, 武汉 430070)

摘要: 以分析水中的光声信号的特点为目的, 采用实验的方法利用压电陶瓷球形水听器、数字存储示波器, 对 TEA CO₂ 脉冲激光在水中激发声波的幅度、频率等特性进行了测量, 并用信号分析软件进行分析和处理。结果表明, TEA CO₂ 脉冲激光在水中产生的声信号幅度随脉冲能量增加而增大。实验中首次发现, 激光声频率在 100kHz 以内有 31kHz 和 62kHz 两个峰值, 且该两频率峰值随激光脉冲宽度增加而减小。光声信号的以上特性表明, 可以通过调节激光脉冲的能量和宽度, 选择或控制应用于水声通信、水下资源探测等技术的光声信号。

关键词: 激光技术; 脉冲激光致声; 热弹效应; 汽化效应; 声脉冲幅度; 声脉冲频谱

中图分类号: O427 文献标识码: A

Experiment research of acoustic effect induced by pulsed CO₂ laser in water

CHEN Qing-ming^{1,2}, CHENG Zu-hai¹, ZUO Dou-luo¹, ZHU Hai-hong¹,
ZHAI Bing-jie¹, CHEN Yu-qi¹

(1. National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract In order to get the characteristics of laser ultrasound in water, a spherical ceramic hydrophone and a digital oscilloscope were used to receive, demonstrate and store the optoacoustic signal induced by a TEA CO₂ pulsed laser. Later the digital signal was analyzed and handled with a computational software. The experimental results showed that the amplitude of the signal increased with the laser pulse energy and the signal had frequency peaks at 31kHz and 62kHz below 100kHz. Furthermore, the peak frequencies decreased when the laser pulse width increased. The above results mean that applicable laser ultrasound source with higher amplitude and lower frequency, which can be used in underwater communication and underwater detection, can be chosen and acquired by adjusting the energy and width of laser pulse.

Key words laser technique; laser acoustic effect; thermoelastic effect; evaporative effect; amplitude of laser sound; spectrum of laser ultrasound

引 言

光与物质相互作用时产生声波的现象称为光声效应。光声效应中声波的时域及频域特性与激光特性、激光与物质相互作用条件、物质的光学、热学、力学等特性密切相关。目前对于光声效应的研究主要集中在如下几个方面: (1) 激光声产生的机理研究: 分析所产生的声波是由热弹、汽化、还是光击穿机制所产生, 以及不同机制产生的声波的特性; (2) 激光声源的特性及应用研究: 利用激光声作为声源并从传输时声信号的变化特性出发分析物质的特性; (3) 激光声源特性的控制: 通过选择激光的特性、与物质相互作用的条件、作用物质的相关参数来获得特定特性的激光声信号。

国内外关于激光声脉冲特性的研究主要是利用低能量窄脉冲的激光器, 应用目的在于检测材料表面^[1]或内部微结构^[2], 如脉冲能量为几毫焦, 脉冲宽度为纳秒量级的 Nd:YAG 在固体材料中激发高频宽带超声脉冲等^[3,4]。本项目采用在水中吸收系数为 890cm⁻¹ 的 TEA CO₂ 脉冲激光激发声波, 研究光声脉冲特性及其与激光脉冲特性的关系, 分析激光声脉冲在水中的应用前景及改善方法。

1 实验装置与条件

本研究的实验装置原理图如图 1 所示, 实验中采取华中科技大学激光技术国家重点实验室研制的 TEA CO₂ 脉冲激光器作为声波的激励源, 该脉冲激光的特点是单脉冲能量较高 (可达 50J), 峰值功率可达 10⁸W, 激光脉冲的波形如图 2 所示。脉冲波形为一个尖峰之后跟着能量较低的拖尾, 尖峰的宽度只有 200ns, 拖尾部分宽度约为 2μs, 该激光脉冲在水中激

基金项目: 国家九七三基金资助项目 (973-5132802-2)

作者简介: 陈清明 (1973-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事强激光激发的声波的理论及实验研究。

* 通讯联系人。E-mail: chengzuha@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-11-29; 收到修改稿日期: 2006-02-21

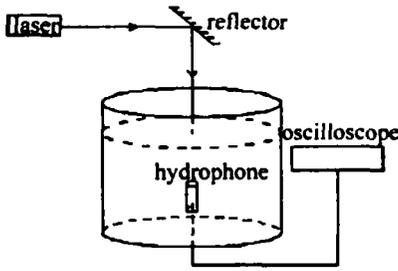


Fig. 1 Setup of experiment

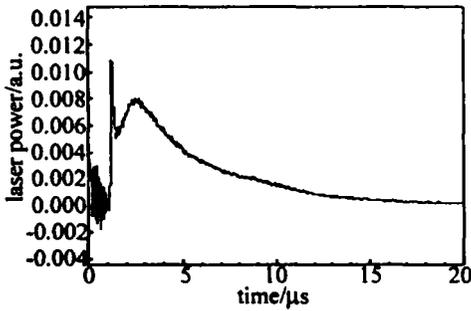


Fig. 2 Waveform of laser pulse

发声波时, 脉冲的各个部分所起的作用是不相同的, 尖峰部分主要通过击穿效应激发声波, 激光脉冲的能量主要集中在拖尾部分, 这一部分主要通过汽化和热弹机制激发声波^[5]。在作理论分析时, 可对该激光脉冲进行近似处理, 在考虑汽化和热弹机制激发声信号时主要考虑脉冲拖尾, 并把该拖尾近似为矩形脉冲^[6]、梯形脉冲或高斯形脉冲^[7]进行处理; 也可以利用模拟方法找出该激光脉冲所对应的波函数, 再解相应的热力学方程, 求得声脉冲所对应的波函数。

在实验中可以通过调节 TEA CO₂ 激光器的激励电压来调节激光脉冲的能量, 测得脉冲能量改变时脉冲的宽度和波形大致不变; 光脉冲作用在水面时的光斑的大小可以用凹面镜聚焦或只用平面镜反射来调节, 凹面镜 $f = 700\text{mm}$, 镜面的反射率约为 96%。TEA CO₂ 气体激光器中激光脉冲谱线宽度与气体的压强有如下关系:

$$\Delta\nu = \alpha p \quad (1)$$

式中, p 为气体总气压 (Pa); α 为实验测得的比例系数。混合气体 (H₂:N₂:CO₂) 的压强减小时, 腔内气体的平均碰撞时间增加, 激光脉冲谱线宽度变小, 激光脉冲的宽度变大^[8]。故实验中通过调节混合气体的压强来改变激光脉冲的宽度。

实验水箱内半径为 79cm, 高为 1.25m, 容器的尺寸和水听器放置的位置确保到达水听器的直达声和反射声能够分开, 从而可以分别分析直达声和反射声的特性, 并且可以从反射声波与直达声波的差别中提取水中的障碍物特性。

声信号的接收装置为杭州 715 声学研究所研制的压电陶瓷球形水听器, 其接收灵敏度为 -185dB (参考值 1V/ μPa), 水听器中带有前置放大器, 其线性响应带宽为 2kHz~200kHz。水听器接收到的声信号通过

同轴电缆送入 TDS430 数字存储示波器, 利用数据处理软件 ORIGIN 对该声信号进行处理和分析。

2 实验结果与分析

2.1 声脉冲幅度随脉冲能量的变化

当激光器混合气体压强为 20kPa, 激光光斑的大小和形状固定时, 调节激光器的激励电压, 使单脉冲能量从 19.5J 增加到 33J 此时声脉冲的正负向 (压缩和稀疏波) 幅度的变化如图 3 所示。图 3 说明当激光脉冲能量增加时声脉冲的幅度增加, 并且压缩波幅度增加得比稀疏波幅度更快。

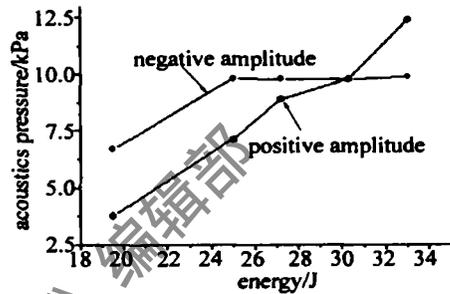


Fig. 3 Laser sound amplitude increased with laser pulse energy

2.2 激光声脉冲波形随激光脉冲能量的变化

水听器探测到的声脉冲中包含的既有直达声波也有从容器壁和底部反射的声波 (如图 4 所示)。声波

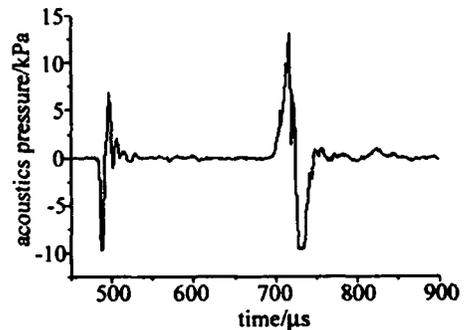


Fig. 4 Direct and reflect laser ultrasound detected with hydrophone

在水中的传播速度为 1500m/s 利用该速度和水听器离光声源的距离可知图中第 1 个脉冲为直达声波, 而第 2 个较高的脉冲则为容器底和容器壁的反射声波。直达声脉冲和反射声脉冲到达的时间差可用于测水听器处的水深^[9]; 在分析激光声源的性质时, 只取其中的直达声波, 当光脉冲能量增加时, 声脉冲除幅度明显增大之外 (见图 3), 波形变化不太明显; 但当光脉冲能量增加至 33J 时, 声脉冲的负向幅值出现平顶现象, 说明激光脉冲能量增加时, 光声效应中的击穿机制的作用比较明显, 声脉冲幅度快速增加, 超过了水听器前置放大器的线性放大范围。

2.3 激光声信号的频谱及其随激光脉冲能量的变化情况

从示波器接收到的声信号中截取直达声, 利用

ORIGIN 软件进行傅里叶变换可得到频谱特性。在激光脉冲的波形、宽度、光斑大小固定只改变激光脉冲的能量的情况下, 声信号频谱比较稳定, 且在 0kHz~200kHz 之间有几个峰值, 其中 100kHz 以内有两个峰。当激光工作气压为 20kPa 激光脉冲能量为 20J~40J 之间时, 100kHz 以内峰值所对应频率随激光脉冲能量的变化很小, 对应频率分别处于 31kHz 和 62kHz (见表 1)。

Table 1 Change of laser ultrasound peak frequencies in the range 0~100kHz with laser pulse energy

energy of laser pulse /J	peak frequency of laser ultrasound/kHz	
19.5	31.48	62.77
25	31.78	60.85
27.2	32.52	62.77
30.3	30.44	64.14
33	31.48	61.73

在对光声信号进行傅里叶分析时必须将示波器接收到的反射声信号去掉, 以消除反射声波的影响。实验中光声信号的峰值频率跟水听器离光声源 (即光斑) 的距离有关, 由于声波在水中的衰减跟频率的平方成反比, 故距离越近测得光声信号的峰值频率越高, 本实验中水听器离声源 (作用在水面上的光斑) 的距离为 0.9m。接收示波器的时间分辨率对信号的频率特性也有影响, 本实验中的示波器的采样间隔为 1μs。

2.4 激光脉冲宽度对激光声脉冲信号的频谱的影响

减小混合气体的压强时, 激光脉冲的宽度变大。实验测得光声信号的低频峰值随激光器混合气体压强变化情况见表 2。

Table 2 Change of laser ultrasound peak frequency with laser gas pressure

pressure/kPa	peak frequency/kHz
20	31.8
10	23.3
5	16

由表 2 可知, 混合气体压强变小时, 光声信号频率峰值也变小。即可以通过调节混合气体压强控制激光脉冲的宽度来获得所需频率的光声信号。

纯水的声吸收主要由粘滞性和热传导所引起, 海水中还有 MgSO₄ 等融解盐的化学弛豫过程, 以上几种吸收机制都得出声吸收系数 $\alpha = K\omega^2$, 其中 ω 为声波角频率。当压力和温度确定时 K 为常数。故在水声通信中或水下资源的探测中, 利用非接触的激光激发

方式获得的低频声信号可以在水中传输较远的距离, 极具应用前景。

2.5 激光声信号随激光能量密度的变化

当利用 $f=700\text{mm}$ 的凹面镜聚焦时, 激光能量密度大幅度增加, 此时示波器接收到的光声信号出现很明显的饱和现象, 说明当能量密度增加时, 光声机理由汽化机制转换为光击穿, 声信号幅度大大增加。对光击穿机制产生的光声信号的深入分析将另文详述。

3 结 论

(1) 能量较高、光斑较大的 TEA CO₂ 脉冲激光器在水中激发的光声信号主要是由热弹和汽化机制所产生, 声脉冲的幅度为数千帕量级, 并且当光脉冲能量增加时, 声脉冲信号的幅度增大, 而光声信号的波形对激光脉冲能量不太敏感, 所以可以通过提高激光脉冲的能量来获得较强的具有应用意义的激光声源。

(2) 在实验条件下光声信号在 30kHz 左右的低频段有一峰值, 并且该频率峰值可以通过调节激光脉冲的宽度增加来控制, 而低频段的声信号在水中衰减较小, 可以传输的距离较远, 可应用于在水声通信、水下资源、水深探测等技术中。

参 考 文 献

- [1] SHAN Q, DEWHURST R J. Surface breaking fatigue crack detections using laser ultrasound [J]. A P L, 1993, 62(21): 2649~2651
- [2] HUANG J, NAGATA Y, KRISHNASWAMY S *et al*. Laser based ultrasonics for flaw detection [A]. IEEE 1994 Ultrasonics Symposium Proceedings [C]. New York: IEEE, 1994. 1205~1209.
- [3] DEATON J B, MCKIE A D W, SPICER J B *et al*. Generation of narrow band ultrasound with a long cavity mode locked Nd:YAG laser [J]. A P L, 1990, 56(24): 2390~2392
- [4] WANGNER J W, DEATON J B, SPICER J B. Generation of ultrasound by repetitively Q-switching pulsed Nd:YAG laser [J]. Appl Opt, 1988, 27(22): 4696~4700
- [5] SERGEY V E. Optoacoustics of oceans [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1997. 379~414.
- [6] QIAN M L, ZHANG W Ch, WU T Ch. Study of characteristics of ultrasound pulse thermoelastically generated by a laser pulse [J]. Acta Acustica, 1995, 20(1): 1~10 (in Chinese).
- [7] MENG Zh T. The study of theory of ultrasound pulse waveform produced by laser pulse [J]. Bulletin of Science and Technology, 2001, 17(5): 38~42 (in Chinese).
- [8] ZHOU B K. Principles of laser [M]. 4th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 132~136 (in Chinese).
- [9] HECKMAN G D, EDMONDS J A. Laser-acoustic measurements for remotely determining bathymetry in shallow turbid waters [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 73(3): 840~843