

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0623-04

激光在液体中的声效应研究

陈清明^{1,2}, 程祖海¹

(1. 华中科技大学光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉理工大学理学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:以研究液体中激光声波的特点与应用为目的,从理论上分析脉冲激光在液体中产生的声波的波阵面、光声脉冲波形的特点,并用实验的方法观察脉冲 CO₂ 激光光声脉冲的波形、频谱特性及光击穿现象。结果表明光声波的波阵面与吸收激光能量的媒质的形状有关;光声波的波形随激发机制而变化;CO₂ 脉冲激光在水中通过热膨胀机制激发的声波能量主要分布在 100kHz 以下,光击穿时水面可以观察到微爆炸和亮光现象。可以通过液体中光声效应现象和光声信号波形的变化判断其激发机制,并确定液体的汽化与光击穿阈值,控制激发过程以获得确定特性的光声信号。

关键词:光声效应;激发机制;光声信号波形;光声信号频谱;光击穿现象

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

Research of Laser Acoustic Effect in Liquid

CHEN Qing-ming^{1,2}, CHENG Zu-hai¹

(1. National Laboratory for optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

2. School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To get the characteristics and applications of laser acoustic effect in liquid, the shape of the wave front and waveform were analyzed theoretically, and laser acoustic effect induced by pulsed CO₂ laser was acquired experimentally. The results showed that acoustic wave front was decided by the shape of the medium absorbed the laser energy; the waveform of the laser acoustics changed with the exciting mechanism; frequency spectrum of acoustic wave induced by CO₂ laser in water showed that acoustic energy distributed under 100kHz mainly, and lighting and micro-explosion were observed when optics breakdown took place. In conclusion, exciting mechanisms of sound and thresholds of liquid could be judged from the experimental phenomenon; specified laser acoustic signal could be gotten by controlling the exciting process and condition.

Key words: photoacoustic effect; exciting mechanism; waveform of laser acoustics; frequency spectrum of laser acoustics; optics breakdown

1 引言

强度调制或脉冲激光投射到媒质中,媒质吸收激光能量而激发出声波的效应称为光声效应。通过检测激光所激发的声波的特性,可以获得媒质的光学、热学、力学特性参数以及媒质内部结构等信息。光声效应在固态材料和生物组织的表面与内部成像^[1]、痕量气体^[2]或液体^[3]分析、液体热物理特性

探测^[4]等方面有广泛应用。与普通超声波源相比,激光超声脉冲更窄,频谱范围更宽,具有极高的时间和空间分辨率,可以利用其频谱宽的特点检测固体中的微小缺陷^[5]或液体中的目标^[6];可以在不同形

作者简介:陈清明(1973-),女,讲师,在读博士,主要从事强激光与物质相互作用的声效应研究。E-mail: c_qm@163.com
收稿日期:2006-03-14;修订日期:2006-04-24

状的媒质中激发超声脉冲,对耦合条件要求不高;激光超声是非接触的,易于在高温、高压、有毒和放射性等恶劣环境下进行超声检测。

水中声波的传播速度达 1500m/s,且声波在水中的衰减远小于光波,故海洋中信息的传输和检测多采用声波,但高频声波在海洋中衰减较快,难以远距离传播,应尽量采用低频率的光声信号。目前用大功率脉冲 CO₂ 激光器,通过汽化机制激发的声脉冲向海洋纵深方向可以传播 1~2km 深^[7]。TEA-CO₂ 激光光声脉冲压力可达数兆帕,可用来引爆压力引信的水雷,也可对光声脉冲信号编码用于海底声通信。

本文对液体中激光光声波阵面形状、波形及频谱特性进行理论和实验研究,本研究对激光光声效应在液体中的应用起指导作用。

2 激光在液体中声效应的理论分析

2.1 光声信号的激发机制

激光在液体中激发声波主要有热膨胀(热弹)、汽化和介质光击穿三种机制。

热膨胀机制:吸收激光能量的部分介质被瞬时加热,若吸收的激光能量还不足以引起相变,则由于受热介质体积的瞬时热膨胀会产生光声脉冲。热膨胀机制的光声转换效率较小(=声波能量/所吸收的激光能量),液体中的典型值小于 10^{-4} ^[8]。若受热介质体积的热膨胀速率远小于声速,可以在线性理论范畴内描述声波的产生。热膨胀机制产生的声波的重复性好,对样品没有损伤,通常用于无损检测中,但光声信号幅度较小。

汽化机制:当材料吸收的激光能量超过其汽化阈值时,汽化后的物质从液面高速喷出,同时在液面上产生反冲力,从而在液体中产生强的压力脉冲(声脉冲)。液体的汽化包括纯表面汽化和近表面液层中的爆发式沸腾两类过程。汽化过程具有阈值特性,吸收光能的部分液体介质中,所吸收的激光能量密度达到材料所需汽化热时,即为阈值条件。阈值大小决定于液体的热学性质,纯表面汽化过程和爆发式沸腾过程具有不同的阈值。汽化机制的光声转换效率比热膨胀机制的效率大 1 到 2 个数量级(约为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$)^[8]。而沸腾过程产生声波的效率高于表面汽化过程。汽化机制产生光声信号时,对材料表面有一定的损伤,但信号强度较大,在光声无损检测技术中常在材料表面加上起保护作用

的涂覆层。

介质光击穿机制:高强度的脉冲激光射入液体内部时,介质分子在强电场作用下将被电离,形成充满等离子体的腔体。稠密的等离子体的光吸收系数比液体大得多,等离子体进一步吸收激光能量,发生爆炸式膨胀,从而在液体中辐射冲击波,冲击波在较短的时间内衰减成声波信号。实验中发生光击穿时存在闪光、声响、溅射、穴蚀(当激光聚焦在样品池器壁附近时,玻璃器壁上出现损伤痕迹)等效应。

光击穿过程也具有阈值特性,纯水的阈值光强约为 10^6W/cm^2 。液体中的杂质往往使阈值光强降低。介质光击穿机制的光声转换效率最高,可达 10~30%^[9],但这种机制的声脉冲信号波形重复性差,只适用于产生强的声脉冲。

激光强度增加到足以使汽化物质电离时,液面上方的蒸汽将被击穿。例如水蒸汽击穿的阈值光强约为 $4 \times 10^7 \text{W/cm}^2$,比纯水高。若蒸汽被击穿,所形成的等离子体强烈吸收激光能量,对液面产生屏蔽作用,阻碍液面继续吸收激光能量,降低了液体中激发声波的效率。故激光能量密度介于液体和蒸汽的击穿阈值之间时光声效率最高。

2.2 光声脉冲波形随激发机制的变化

随着激发激光能量的增加,光声脉冲激发机制从热弹机制向汽化和介质光击穿机制转变,并可能出现几种激发机制同时存在的情况。激发机制的变化可以通过光声脉冲波形的变化反映出来。

理论分析表明,热膨胀机制在自由液体表面所产生的光声信号是一个双极性声脉冲;当激光能量在汽化阈值附近逐渐增加时,声脉冲波形从热弹的双极性脉冲演变成为双极性脉冲和汽化的单极性脉冲同时存在,当激光脉冲能量增加到汽化机制占主导地位时,热弹光声信号远小于汽化机制产生的声信号,双极性脉冲被湮没,如图 1 所示^[10]。

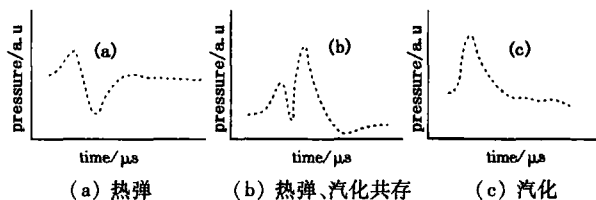


图 1 液体中光声脉冲波形

(a) thermoelastic (b) coexist of thermoelastic and vaporization
(c) vaporization

Fig 1 waveforms of laser acoustic pulse

对于确定的液态物质,从光声信号波形的变化中可以判断物质的汽化与击穿阈值,确定激光与液态物质的作用过程,测定激光能量或者测定液体对特定波长的激光的吸收系数。

2.3 激光脉冲声波阵面和方向性分析

光声源所发出声波阵面的形状和传播方向由光声源(吸收激光能量的媒质)的形状决定。若液体在入射激光波长下的光吸收系数很大,吸收光能的液层厚度(即光声源的厚度)约为 λ 。例如,水对 CO_2 激光($\lambda = 10.6\mu m$)的吸收系数 $870cm^{-1}$,光声源厚度约 $10^{-3}cm$,若水面上光斑半径 r 为数厘米,则光声源可视为面波源,面积等于水面上光斑面积 f 。与激光发生相互作用的那部分液体的体积大致为 $f \cdot \lambda$ 。用透镜把激光束聚焦到吸收系数较大的液体中,使激光光斑变小,可获得点声源或球形光声源。若 λ 很小,激光透入深度远大于光束直径,则光声源犹如柱形声源。实验研究中也观察到以上结果,在 λ 不太大时,可观察到半球面波和柱面波同时存在的情况^[10]。激光束的质量对声波阵面也有影响,强吸收液体中激光采用基模 TEM_{00} 时,只观察到半球面波;若采用光束质量较差的脉冲,可观察到平面冲击波^[11]。弱吸收液体中观察到柱面波,其轴线为激光穿透的方向,当激光入射方向改变时,声波轴线方向跟光入射方向满足 Snell 定律(折射定律)。实验中可同时观察到半球面波和柱面波的情况,有时也只观察到柱面波^[12]。

3 光声信号特性的实验研究

3.1 实验装置和条件

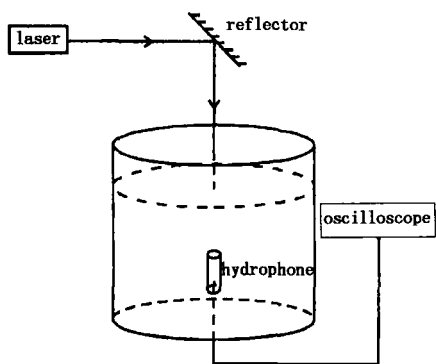


图 2 实验装置图

Fig 2 setup of experiment

实验装置如图 2 所示,实验中采取本实验室研制的 TEA - 50 型脉冲 CO_2 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 10^8W 。激光脉冲能量采用 ED - 500L R +探头式能量计测量。实验水箱内半径为 79cm,高为 1.25m。声信号的接收装置为杭州 715 所研制的压电陶瓷球形水听器,其接收灵敏度为 -185dB (ref 1V/ μPa),水听器中带有前置放大器,其线性响应带宽为 2~200kHz。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,利用数据处理软件对光声信号进行处理和分析。

3.2 激光光声脉冲信号的波形和频谱特性

图 3 为水听器接收到的 TEA - CO_2 激光通过热膨胀机制所激发的声波波形,实验结果表明热弹光声信号幅度正比于激光脉冲的能量。且激光脉冲能量增加时会出现图 1 所示的波形的变化情况。

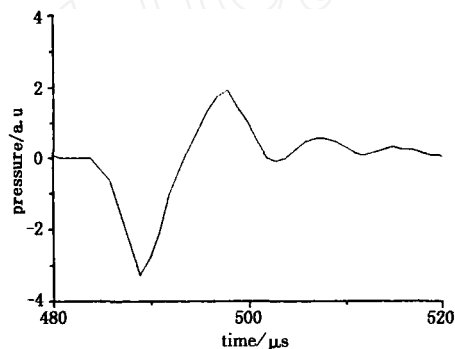


图 3 热弹机制激发的光声波形

Fig 3 laser acoustic waveform induced thermoelastically

图 4 为 TEA - CO_2 脉冲激光器在水中激发的热弹声脉冲的频率特性,光声信号在 100kHz 以内有 31kHz 和 62kHz 两个频率峰值,声信号能量主要分布在 100kHz 以内的低频区。在改变激发条件时,光声脉冲频谱与激光脉冲的波形、能量分布、激发机制及接收器离声源的距离、方位等有关。通过调节激光脉冲的波形和能量分布,可以控制光声脉冲的频率峰值位置,获得较强的低频的光声信号。

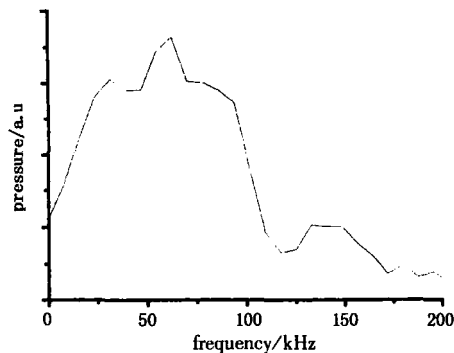


图 4 TEA- CO_2 脉冲激光水声脉冲的频谱图

Fig 4 frequency spectrum of TEA- CO_2 laser acoustics in water

3.3 汽化与光击穿的阈值

当激光强度增加时,光声信号的幅度增加且波形发生变化,击穿时可观察到激光声源出现亮光且水表面有微爆炸,从声信号的变化、闪光及微爆炸情况的出现,可以判断水的汽化与光击穿阈值。也可以从汽化和光击穿的原理对阈值进行如下分析:

水表面的温度达到沸点 T 时,汽化过程便开始了。若水的初始温度为 T_0 ,则汽化的阈值能量密度 $I_1 = (c_p / \rho) (T - T_0)$,其中 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为水的初始密度, $c_p = 4.18 \text{ J/(g K)}$ 为水的定压比热, 870 cm^{-1} 为水对 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光的吸收系数,若 $T_0 = 293 \text{ K}$, $T = 373 \text{ K}$,则可得 $I_1 = 0.38 \text{ J/cm}^2$ 。汽化的阈值跟液体的初始温度有关。

用来解释激光击穿液态水形成等离子体的机制主要有雪崩电离和多光子电离两种机制^[13]。雪崩过程建立的必要条件是,在初期聚焦区域内必须存在一定量的原始电子来充当“种子”电子,“种子”电子可由杂质、热激发电子或多光子电离产生。多光子电离是一种非线性光学过程,它只发生在高能量辐射和波长为近红外或更短的区域^[14]。 CO_2 激光击穿水主要是雪崩电离机制,对应的阈值击穿能量密度为 10^6 W/cm^2 ^[9]。

实验中观察到的阈值情况与以上计算结果基本相符。

4 结 论

理论和实验研究表明,通过光声效应的实验现象和声信号的波形变化,可以判断声信号的激励机制及激光与液体作用的物理过程。控制激光脉冲的波形,调节激光能量的分布,提高光声转换效率可以获得强的激光声源;采用高灵敏度的检测方法和装置,激光声效应将获得广泛的应用。

另外,激光声信号往往由几种激发机制共同产生,且边界条件比较复杂,难以获得解析解。应建立确切的理论模型,采用有限元分析软件对光声信号的激励过程进行模拟,获得声信号的数字解。

参考文献:

- [1] 钱盛友,邢达. 光声结合用于生物组织成像的研究进展[J]. 激光生物学报, 2000, 9(3): 228 - 231.
- [2] M W Sigrist, A Bohren, I G Calasso, et al Laser Spectroscopic Sensing of Air Pollutants[A]. In 13th Symposium

and School on High-Resolution Molecular Spectroscopy [C]. Leonid N. Sinitza, Editor, Proceedings of SPIE, 2000, 4063: 17 - 25.

- [3] S S Freebom, J Hannigan, F Greig, et al A pulsed photoacoustic instrument for the detection of crude oil concentrations in produced water[J]. Review of scientific instruments, 1998, 69(11): 3948 - 3952.
- [4] Konrad Lukaszewski Thermophysical properties of liquids examined with photoacoustic method[A]. Proceedings of SPIE, 2003, 5229: 344 - 347.
- [5] Valle Christine, Littles Jr, Jerrold W. Law localization using the reassigned spectrogram on laser-generated and detected Lamb modes[J]. Ultrasonics, 2002, 39(8): 535 - 542.
- [6] McKnight, SW, DMarzio, et al Laser-induced acoustic generation for buried object detection[A]. Proceedings of SPIE 2000, 4038 (pt 1 - 2): 734 - 739.
- [7] Egerev, S V. In search of a noncontact underwater acoustic source[J]. Acoustical Physics, 2003, 49(1): 51 - 61.
- [8] Egerev, S V, Lyan shev, et al Optoacoustic sources in the oceanographic experiment[J]. Soviet Physics-Acoustics, 1990, 36(5): 452 - 456.
- [9] Teslenko, V S Shock-acoustic breakdown in a liquid The kinetics of stimulated acoustic scattering in the focusing of shock waves[J]. Technical Physics Letters, 1994, 20(3): 199 - 201.
- [10] Sigrist, M W, Kneubuhl, et al Laser-generated stress waves in liquids Source[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 64(6): 1652 - 1663.
- [11] Sigrist, M W. Laser generation of acoustic waves in liquids and gases[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(7): 83 - 121.
- [12] Lai, H M Young, K Theory of the pulsed optoacoustic technique[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(6): 2000 - 2007.
- [13] Noack, J Vogel, A. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(8): 1156 - 1167.
- [14] Nahen, K Vogel, A. Plasma formation in water by picosecond and nanosecond Nd YAG laser pulses II Transmission, scattering, and reflection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(4): 861 - 871.