

文章编号: 0258-7025(2007)03-0341-04

脉冲激光在水中激发声脉冲的 光声能量转换效率

陈清明^{1,2}, 程祖海¹, 朱海红¹

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

摘要 利用 TEA-CO₂ 脉冲激光在水中激发热弹光声信号, 采用压电陶瓷水听器接收并将光声信号转换成电信号送入数字存储示波器, 计算出声脉冲的能量, 从而获得该激发条件下激光能量转换成声波能量的效率 η 。结果表明不采用凹面镜聚焦激光脉冲能量密度低于 2 J/cm^2 时, 光声转换效率 η 为 $10^{-7} \sim 10^{-5}$, 聚焦之后 η 增大一个数量级; 激光脉冲谱线宽度固定时, 能量越高, η 越高; 激光脉冲能量相同时, 激光脉冲谱线宽度越大, η 越高。故可以通过聚焦、增加激光脉冲谱线宽度、提高激光能量等方法来提高光声转换效率 η , 获得强的热弹光声信号。

关键词 激光技术; 脉冲激光声效应; 压电陶瓷水听器; 光声能量转换效率; 热弹效应; 气化效应

中图分类号 O 426.3 文献标识码 A

Laser Acoustic Energy Conversion Efficiency Induced by Pulse Laser in Water

CHEN Qing-ming^{1,2}, CHENG Zu-hai¹, ZHU Hai-hong¹

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract To get the laser acoustic energy conversion efficiency, TEA-CO₂ pulse laser, a spherical piezoelectric ceramic hydrophone and a digital oscilloscope were used to receive, demonstrate and store the optoacoustic signal induced in water. And energy conversion efficiency η was calculated. The results showed that when the laser pulse energy varied below 2 J/cm^2 , the conversion efficiency η was in the range $10^{-7} \sim 10^{-5}$, and increased ten times when the laser beam was focused. If the spectrum width of the laser pulse was fixed, η increased with the pulse energy, on the other hand if the pulse energy was fixed, η decreased when the spectrum width increased. As a result, methods of laser focusing, laser pulse compression and laser energy increasing can be used to enhance the conversion efficiency η , and to get strong thermoelastic optoacoustic signal.

Key words laser technique; pulse laser acoustic effect; piezoelectric ceramic hydrophone; laser acoustic energy conversion efficiency; thermoelastic effect; evaporative effect

1 引 言

激光在液体中产生声波的特性决定于激光特性(能量 E_L , 脉冲宽度 τ_L , 能量密度)和液体的特性(特别是对该激光波长的吸收系数 α)^[1,2] 以及光声信号

的激发机制。液体表面层吸收的能量密度不同时, 液体中的声波或冲击波可能由热弹、气化或光击穿等机制激发。其中热弹机制产生的光声波具有较好的可重复性, 主要应用于光声检测技术中^[3,4]; 气化和光击穿机制产生的光声波幅度较大, 主要用于激

收稿日期: 2006-03-14; 收到修改稿日期: 2006-10-23

基金项目: 973 基金(973-5132802.2), 水下测控国防科技重点实验室延伸性发展基金资助项目。

作者简介: 陈清明(1973—), 女, 湖北人, 讲师, 博士研究生, 主要从事强激光激发声波的理论与实验研究。

E-mail: chenqm@mail.whut.edu.cn

导师简介: 程祖海(1945—), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 主要从事气体激光器及其应用方面的研究。

E-mail: chengzuhai@mail.hust.edu.cn

光表面清除等技术中^[5,6]。本文主要研究热弹机制的光声能量转换效率,通过实验测得激光脉冲特性及光声信号的时空分布,计算出光声能量转换效率,给出提高热弹光声能量转换效率,获得较强热弹光声信号的方法。同时对气化和光击穿机制下的光声能量转换效率进行了分析。

2 光声信号的实验测量

实验装置原理如图1所示,采取自制的 TEA-50 型脉冲 CO₂ 激光器作为声波的激励源,该脉冲激光器的特点是单脉冲能量较高(可达50 J),峰值功率可达10⁸ W。激光脉冲能量采用 ED-500LIR+探头式能量计测量。实验水箱内半径为79 cm,高为1.25 m,容器的尺寸和水听器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。

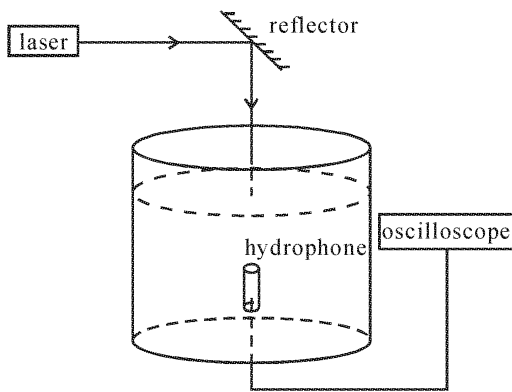


图1 实验装置图
Fig. 1 Experimental setup

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-185 dB (ref. 1 V/ μ Pa),水听器中带有前置放大器,其线性响应带宽为2~200 kHz。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 光声能量转换效率的计算方法

光声转换效率定义为产生的脉冲声能量 E_{ac} 与入射到液体表面的光脉冲能量 E_L 的比值。即

$$\eta = E_{ac}/E_L, \quad (1)$$

其中 $E_{ac} = \int_S \epsilon_{ac} dS$, ϵ_{ac} 为穿过波前的声能量密度, S 为波前的面积, ϵ_{ac} 可表示为

$$\epsilon_{ac} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_{-\infty}^{+\infty} [p(t)]^2 dt, \quad (2)$$

式中 ρ_0 为液体的初始密度, c_0 为该液体中的声速, p 为声压,则光声能量转换效率可表示为

$$\eta = \frac{1}{\rho_0 c_0 E_L} \int_S \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} [p(t)]^2 dt \right\} dS, \quad (3)$$

如果整个波阵面上 $p(t)$ 的表达式已由实验测得,则(3)式可以用于计算任何机制产生激光超声时的能量转换效率^[7,8]。

TEA-CO₂ 激光作用在水面上为强吸收情况。强吸收的标准为 $\alpha a \gg 1$, 其中 α 为吸收系数(水对波长为10.6 μ m激光的吸收系数为 $\alpha = 890 \text{ cm}^{-1}$), a 为激光作用在液面上的光斑半径,本研究中光斑的直径较大,吸收光能部分的液体可看作薄的小圆盘,脉冲激光激发的声波波阵面可近似为球面,且球面上各点声压相同。实验中检测到的声信号为等时间间隔采集到的数字信号,则(3)式变成

$$\eta = \frac{2\pi D^2}{\rho_0 c_0 E_L} \sum [p(t)]^2 \Delta t, \quad (4)$$

式中 $D = 77 \text{ cm}$ 为测量点到光声源的距离, Δt 为示波器的采样间隔为1 μ s或0.1 μ s。水的密度为 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, 水中声速 $c_0 = 1500 \text{ m/s}$, 在计算中忽略了水的密度和声速随温度和水深的变化。

4 热弹机制脉冲光声信号实验结果与处理

4.1 激光脉冲能量对光声转换效率的影响

水听器接收到的直达声信号的波形如图2所示。将示波器存储的光声信号对应的声压 $p(t)$ 代入(4)式计算光声转换效率 η 。

当激光光斑的大小、激光脉冲谱线宽度固定时,通过改变激光器的激励电压使激光脉冲能量增加。结果表明光声转换效率 η 随激光脉冲能量增加而增加,如图3所示。

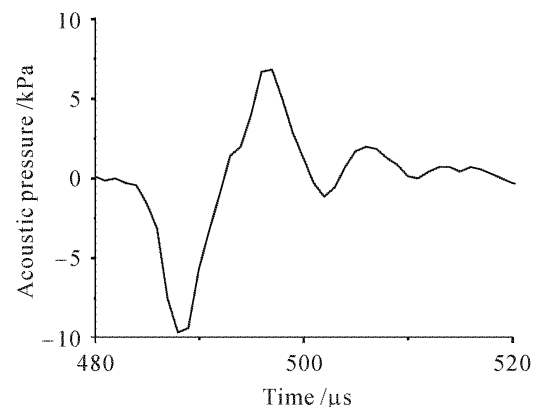


图2 水听器接收到的直达声信号
Fig. 2 Direct laser ultrasound detected using hydrophone

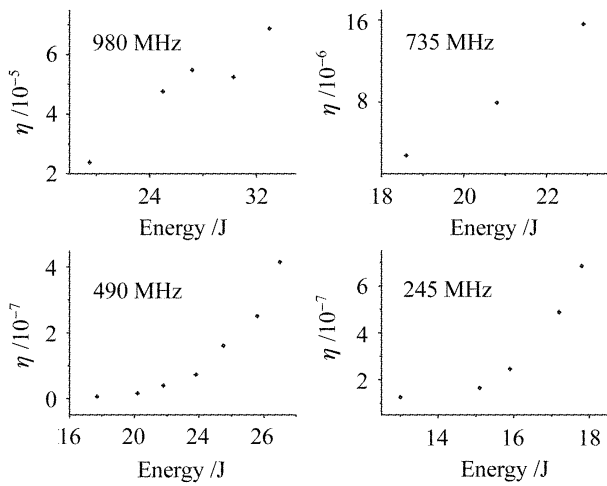


图 3 不同谱线宽度时光声能量转换效率与激光脉冲能量的关系

Fig. 3 Relationship of optoacoustic conversion efficiency and the energy of laser pulse at different spectrum widths

4.2 激光脉冲谱线宽度对光声转换效率的影响

TEA-CO₂ 气体激光器中激光脉冲谱线宽度 $\Delta\nu$ 与气体的压强 P 的关系为

$$\Delta\nu = \beta P, \quad (5)$$

式中 β 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^[9]。混合气体压强为 20 kPa, 15 kPa, 10 kPa 和 5 kPa 时,谱线加宽主要为均匀加宽, $\beta = 49 \text{ kHz/Pa}$ ^[9]。不聚时光斑直径为 1.5 cm, 调节激光脉冲的能量分析得光声转换效率随激光脉冲谱线宽度变化如图 3 所示。由图 3 可知在其他条件相同时,脉冲谱线宽度越大,热弹机制的光声转换效率越高。

4.3 激光能量密度对光声转换效率的影响

利用热敏相纸测得激光光斑的形状如图 4 所示,近似为圆形光斑。图 5 为在漫反射屏上测得的激光能量的动态分布。可知近场光斑为平顶分布,激光能量均匀分布在光斑上。激光能量密度为

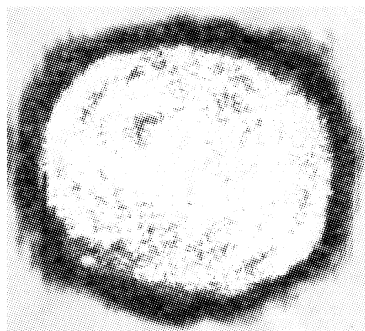


图 4 光斑形状

Fig. 4 Beam pattern of laser

E/S 。在混合气体压强为 10 kPa 时,对于聚焦和非聚焦情况分析得 η 随激光能量密度的变化如图 6 所示。图 6 中能量密度低于 2 J/cm^2 的 η 为非聚焦情况测得;聚焦时激光能量密度增加 2.7 倍,而能量转换效率 η 由 10^{-6} 增加到 10^{-4} ;光声转换效率 η 随激光能量密度增加而增大。

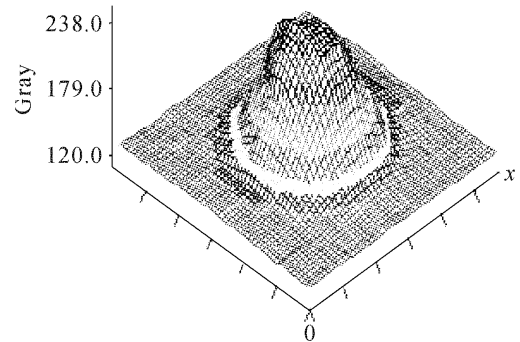


图 5 近场光斑上的光强分布图

Fig. 5 Near-field beam intensity distribution

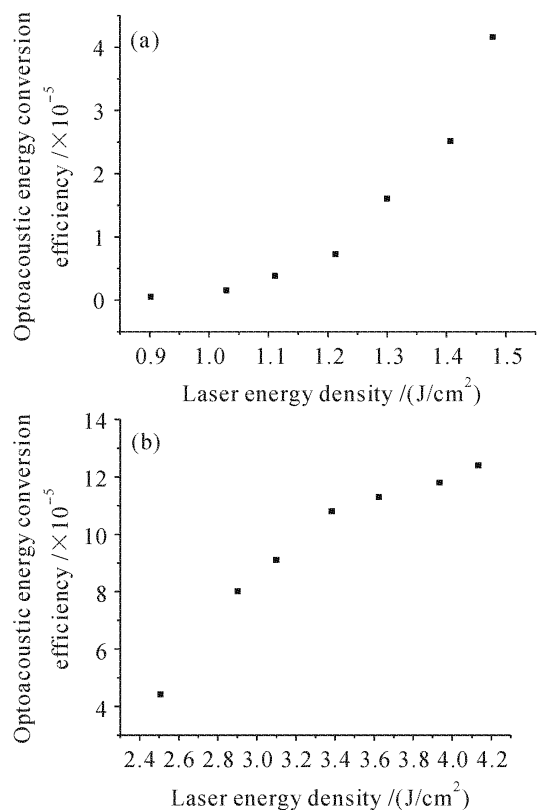


图 6 光声能量转换效率与激光能量密度的关系
(a) 未聚焦;(b) 聚焦

Fig. 6 Relationship between optoacoustic energy conversion efficiency and energy density of laser
(a) Unfocused; (b) focused

5 气化和光击穿机制下光声能量转换效率分析

在气化过程中,当有物质喷出时,从激光吸收的

总能量等于单位体积的水温升吸收的热量、气化热与动能之和,声压正是由喷出物的反冲力形成,从能量和动量守恒的角度可得气化机制的能量转换效率约为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 。比热膨胀机制的效率大 1~2 个数量级。

光击穿机制中激光入射到水表面使水变成等离子体前,能量已经遭受到水表面的反射、水分子吸收、少量水气化、水分子气化对激光的屏蔽、水分子离解和原子离化等损失,这些损失约为入射总激光能量的 30%,进入等离子体的能量为入射能量的 70%。在给定条件下,等离子体吸收的能量有 20%~70% 被等离子体吸收,鉴于等离子体爆炸在水中 and 空气中同时产生声波,可以认为只有 50% 的爆炸能量转换成水下声脉冲能量,即光击穿机制下光声能量转换效率为 7%~30%^[10]。

6 结 论

研究表明提高激光脉冲的能量、能量密度、谱线宽度等手段可以提高热弹光声能量转换效率,获得强的光声信号,对水中的光声应用具有指导意义。研究中激光脉冲能量、能量密度、谱线宽度可以调节的范围有限,今后将通过改变激光器的放电电路控制激光脉冲特性,对气化和光击穿机制中激光脉冲特性对光声能量转换效率的影响作进一步研究。

参 考 文 献

1 L. M. Lyamshev, M. L. Lyamshev. Thermo-optical excitation

- of sound in liquids by modulated radiation of an unstable-cavity laser [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, **239**(4):885~890
- 2 G. Paltauf, H. Schmidt-Kloiber. Photoacoustic waves excited in liquids by fiber-transmitted laser pulses [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **104**(2):890~897
- 3 Guiyin Zhang, Lianshui Zhang, Xiaofeng Han. Photo-acoustic spectrum and detection of nitrogen dioxide [J]. *Chin Opt. Lett.*, 2005, **3**(2):119~121
- 4 Hao Luyuan, Han Jiexiang, Si Qiang *et al.*. A highly sensitive Doppler limited photoacoustic overtone spectrometer with a tisapphire ring laser—Optical multipass and acoustic resonance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(1):16~22
郝绿原,韩家祥,史 强 等. 高灵敏高分辨钛宝石激光光声光谱仪——光学长程+声学共振[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(1):16~22
- 5 Wang Sande, Zhang Xiaolan, 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
- 6 P. Meja, P. Alloncle, M. Autric. Laser cleaning of anodised aluminium in different surroundings [C]. *SPIE*, 2000, **4065**:904~913
- 7 G. V. Ostrovskaya. Efficiency of optical-to-acoustic energy conversion upon the interaction of a pulsed laser radiation with a liquid; I Calculation of the efficiency upon acoustooptic interaction [J]. *Technical Physics*, 2002, **47**(10):1299~1305
- 8 G. V. Ostrovskaya. Optical-to-acoustic energy conversion efficiency upon interaction of pulsed laser radiation with a liquid; II Conversion efficiency measurement by holographic interferometry upon acoustooptic interaction [J]. *Technical Physics*, 2002, **47**(10):1547~1553
- 9 Zhou Bingkun. Principles of Laser [M]. Fourth edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 132~136
周炳坤. 激光原理[M]. 第四版. 北京:国防工业出版社, 2000. 132~136
- 10 J. Diaci, J. Mozina. Measurement of energy conversion efficiency during laser ablation by a multiple laser beam deflection probe [J]. *Ultrasonics*, 1996, **34**(2-5):523~525