

文章编号: 1001-3806(2009)03-0269-04

液体激光聚焦击穿声辐射特性研究

宗思光^{1,2}, 王江安^{1*}, 蒋兴舟², 王雨虹¹

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 激光与水介质相互作用时, 在不同激光聚焦位置情况下, 光击穿辐射声信号具有较大的差异性。为研究激光聚焦位置对辐射声波的影响, 构建了激光声测量系统, 实验研究了激光聚焦位置对光击穿辐射声信号的影响。结果表明, 激光声信号脉冲宽度主要与激光脉冲宽度相关, 与激光聚焦位置无关; 激光聚焦位置影响声信号的时域波形及信号强度; 应避免激光在空气中聚焦击穿。该研究结果有助于激光声研究的深入开展。

关键词: 激光技术; 激光声源; 光击穿; 声信号; 实验研究

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Characteristics of laser-induced acoustic wave at different laser focusing position

ZONG Si-guang^{1,2}, WANG Jiang-an¹, JIANG Xing-zhou², WANG Yu-hong¹

(1. Department of Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Because of the interaction between the laser and water, the laser-induced signal is much different at different focusing position. In order to study the effect of focusing position on the acoustic wave, a setup was built to test the laser-induced acoustic wave. Experimental results show that the pulse width of the acoustic wave is related to that of laser pulse, and is independent of laser focusing position. The focusing position only affects the time-domain profile and intensity of the acoustic wave. Furthermore, laser-induced plasma in air should be avoided. The results are helpful for further study on laser-induced acoustic wave.

Key words: laser technique; laser-generated sound; laser-induced; sound signal; experimental investigation

引言

激光与液体介质相互作用可以在液体中激发声波, 在海洋中应用时, 采用船载或机载激光器发射红外波段激光束, 通过光学聚焦系统调节在水面或水下激发声波, 通过热膨胀或光击穿机制, 形成激光声源^[1-3]。激光声源相对于传统固体换能器声源, 具有声脉冲窄、频率范围宽等特性, 具有广泛的应用领域。

然而, 实际使用中, 受平台振动、水面波动影响, 激光聚焦击穿点将可能位于在水面上、水面处或水面下。当聚焦击穿点位于空气中, 空气被击穿辐射声波, 声波通过水-空气交界面辐射至水中。当击穿点位于水面处时, 激光同时击穿水和空气, 形成空气冲击波和水中冲击波。当击穿点位于水面以下时, 聚焦区域处形成

等离子体, 等离子体迅速膨胀辐射冲击波。同时, 等离子体膨胀后形成脉动的空泡, 空泡的溃灭第2次辐射冲击波。激光聚焦点位置不同, 辐射的声波在强度、脉冲波形、频谱特征上具有较大的差异性。

在已发表的文献中, 很少有学者对激光聚焦位置对辐射声波进行较系统的研究^[4-6]。作者构建了激光声测量系统, 实验研究了激光聚焦位置对声源在强度、波形特征的影响, 研究结果有助于激光声研究的深入开展。

1 激光聚焦点位置的影响

激光与自由水表面相互作用时, 光击穿可以发生在水表面上方的空气中、水表面上或者水中, 见图1。

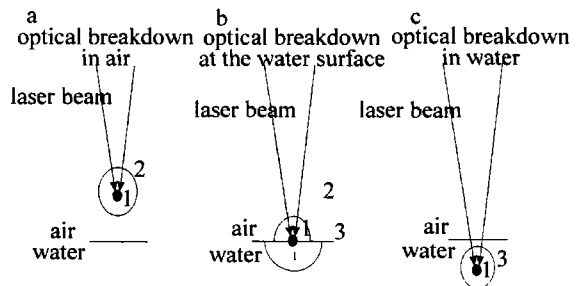


Fig. 1 Diagram of laser-induced at different focusing position, 1—the laser focus; 2—the shock wave in air; 3—the acoustic signal in water

基金项目: 国防武器装备重点基金资助项目 (9140A14060207JB11)

作者简介: 宗思光 (1979-), 男, 博士研究生, 现主要从事水下激光探测、光声学的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gdyfzx@163.com

收稿日期: 2008-04-23; 收到修改稿日期: 2008-06-06

1.1 聚焦于水面上方的空气中

当高功率激光聚焦水表面上方的空气中,激光能量密度超过空气介质的击穿阈值(10^9 W/cm^2)时^[7-9],则在聚焦区域内发生光学击穿,随之产生高温高压的等离子体。等离子体通过逆韧致辐射吸收后续激光能量对外膨胀,形成初期以超音速传播且具有陡峭波阵面的冲击波。冲击波在传播一定距离之后,陡峭波阵面逐步展宽,大部分能量耗散到周围介质空气中,直至最终衰减为声波。

1.2 聚焦于水面上、水面处及水面下

水表面发生击穿时,击穿区域发出耀眼的等离子体闪光,水面上侧产生大量的溅射水滴。当激光能量较大时候,水表面出现振动,有水波从击穿点向四周扩散。当击穿点位于水面上、水面处、水面下时,击穿物质的状态不同,空气介质的光击穿阈值小于水介质的击穿阈值,及空气密度远小于水介质,导致空气被击穿辐射声波的脉冲宽度小于水介质击穿的辐射脉冲宽度,其声波的主频高于水下击穿辐射声波的主频。

在纯水中,产生光击穿的阈值光强约为 10^{12} W/cm^2 ^[7-9]。阈值的大小与液体介质的性质及液体中气核密度有关。当激光聚焦于水面以下及功率密度超过液体的击穿阈值时,激光聚焦区域内的液体分子在强电场作用下将被电离,形成充满等离子体的腔体。等离子体具有比液体大得多的光吸收系数,进一步吸收激光能量,等离子体腔发生爆炸式膨胀,推动液体介质对外径向流动,形成一空泡。泡内压力随着泡膨胀不断下降,当降到周围介质的静液压力时,由于液体的惯性作用,空泡将继续作“过度”的膨胀,一直达到最大泡半径。此时由于泡内压力低于周围介质的平衡压力,周围液体开始反向运动,即向中心聚合,压缩空泡,使之不断收缩,其腔内压力逐步增大。同时由于聚合液流惯性的作用,空泡被“过度”压缩,使其内部压力再次高于周围的平衡压力,直至腔内压力高到能阻止空泡压缩而达到新的平衡。至此,空泡膨胀与压缩的第1次循环结束。但此时由于泡内压力比周围介质的静压大,因此空泡反弹,经历第2次膨胀和压缩过程。空泡在脉动过程中还将对外辐射出若干冲击波。因此,当激光聚焦于水下发生光击穿时,将辐射多次脉冲声波。而激光聚焦于水面上方的空气中或水面处时,只能获得激光击穿辐射的单一脉冲声信号。

同时,在激光声系统中,一般采用 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 波段的激光束,处于水的强吸收波段,随着聚焦点距离水表面距离增加,激光束到达焦点位置处的激光能量降低,击穿点辐射的声波强度降低。

2 实验设计

激光聚焦点声辐射实验中测量系统框图如图2所示。实验中采用调Q Nd:YAG激光器输出脉冲激光

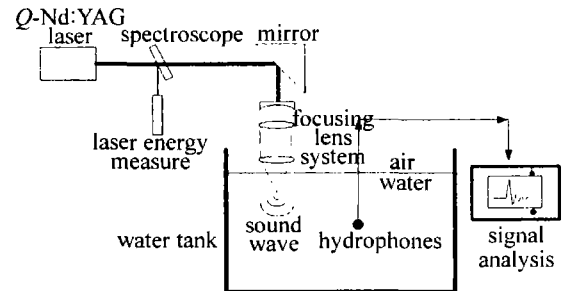


Fig. 2 Diagram of the opto-acoustic apparatus

($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 脉冲宽度 8 ns , 单脉冲能量 $100 \text{ mJ} \sim 800 \text{ mJ}$ 可调)。为避免焦斑弥散,实验中使用消像差透镜组,对激光光束经负透镜扩束后再通过正透镜汇聚至水中。光束经棱镜转向,经负透镜扩束,通过焦距为 52 mm 的正透镜聚焦于水槽中。

水槽长 1.2 m 、宽 0.8 m 、深 0.7 m 。为消除水槽壁的反射干扰,水槽壁及水面安装了无硫吸声橡胶材料。在聚焦点发生光击穿,发出耀眼的等离子体闪光,并辐射冲击波。对光击穿辐射的声脉冲信号通过无指向性的水听器进行接收,水听器距激光击穿点为 100 mm ,水听器的线性频带宽度为 $2 \text{ kHz} \sim 600 \text{ kHz}$,灵敏度级为 -216 dB (参考值为 $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$)。水听器接收到的激光声信号通过电缆送入 Agilent 54621A 型示波器进行采集。

为对激光脉冲能量进行监测,在光路中安置了 45° 分光镜对分光后的光束通过激光能量计进行监测。在实验中通过改变透镜组位置使聚焦击穿点分别位于水面上、水面处及水面下。

3 数据分析

3.1 水面上空气聚焦击穿

当激光聚焦于水面上空气中时,原来不可见的红外 $1.64 \mu\text{m}$ 波段的激光在聚焦点区域因空气击穿,形成一个耀眼的等离子体白斑,聚焦区域辐射的冲击波在传播一定距离之后衰减为普通声波。该声波向水中辐射,被水听器接收。在实验中发现,水听器几乎接收不到激光在空气中击穿辐射至水中的声压信号。原因在于水和空气的特性阻抗差别比较大,当声波从空气向水中传播时,会发生较强的反射。

当声波垂直入射到水-空气界面时,声压损失(单位为 dB)可表示为:

$$L = 20 \lg \frac{\rho_1 c_1}{2\rho_2 c_2} \quad (1)$$

式中, $\rho_1 c_1$ 为水特性阻抗, ρ_1 为水密度, c_1 为水中声速。 $\rho_2 c_2$ 为空气特性阻抗, ρ_2 为空气密度, c_2 为空气中声速。当声波穿过水-空气界面时, 声压损失约为 65dB。因此在激光声应用中, 应避免激光在空气中击穿。

3.2 水面处光击穿

当击穿点位于水面处时, 如图 1b 所示, 激光击穿辐射的冲击波部分向空气中辐射, 另一部分直接向水下辐射。水听器接收到的声信号的时域波形如图 3 所示。

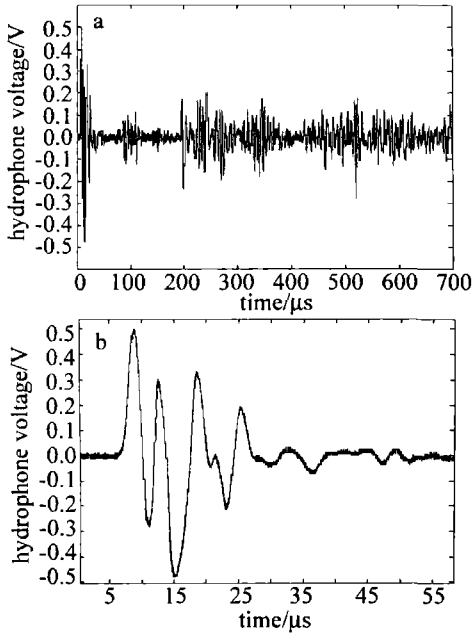


Fig. 3 Underwater acoustic signal laser-induced at the water surface
a—transient acoustic waveform b—outspread acoustic signal

水面击穿时, 水听器接收到激光击穿向水下辐射的声波信号持续时间为 $20\mu s$ 左右, 之后为噪声干扰。在实验中发现, 提高激光器能量不能有效增加水下声能量, 原因在于激光在水表面击穿形成高温等离子体,

由于空气、水的密度差别大, 等离子体主要向空气中膨胀, 造成向空气中辐射的冲击波能量高于向水中辐射的能量。

3.3 水面下光击穿

当击穿点一进入水面以下, 在击穿点形成上浮的小气泡。分别在激光聚焦点距水面 2mm, 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm, 40mm, 50mm 处进行了水下声信号的实验测量。通过实验系统中高速摄影设备实际测量及瑞利公式计算, 在实验中激光在水下聚焦击穿形成的等离子体空泡的最大半径约 2mm。故对激光聚焦点距水面 2mm 边界距离处进行了测试。

取典型的击穿点位于水面下 2mm, 5mm 时, 水听器记录的激光声信号波形, 见图 4 和图 5。

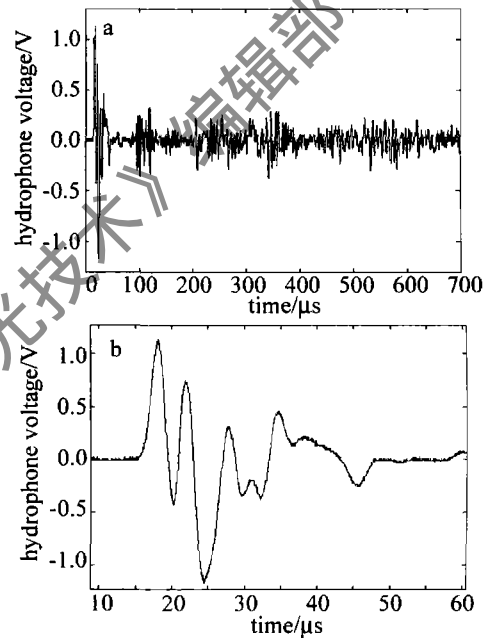


Fig. 4 Laser-induced acoustic signal focusing at 2mm underwater
a—transient acoustic waveform b—outspread acoustic signal

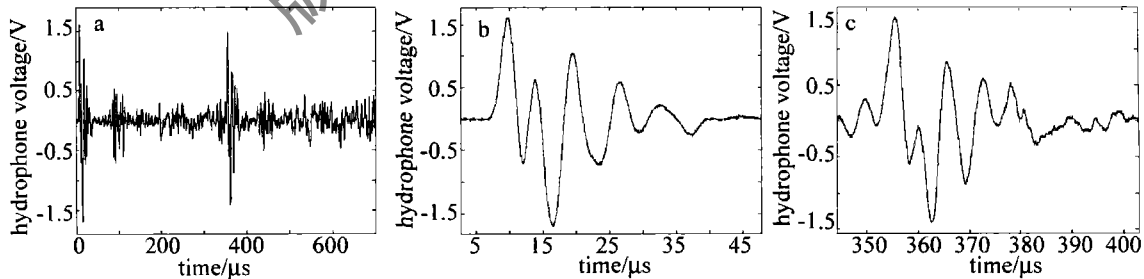


Fig. 5 Laser-induced acoustic signal focusing at 5mm underwater

a—transient acoustic waveform b—acoustic signal of plasma expansion c—acoustic signal of cavitation bubble collapse

从实验中数据中可以发现, 当激光聚焦点移至水面以下 2mm 时, 激光声信号脉冲宽度仍约为 $20\mu s$, 但声压强度相对水面处击穿得到明显增强, 但未见空泡溃灭的 2 次声辐射信号。原因在于激光在水面 2mm 处发生光击穿, 等离子体膨胀, 周围水体对等离子体约束力相同, 因此, 水听器采集的等离子体膨胀压力脉冲

大于水表面处击穿辐射的压力脉冲。但由于等离子体空泡的最大膨胀半径约 2mm, 在等离子体膨胀至最大时, 空泡能量再次向空气中辐射, 故水听器未能采集到空泡溃灭辐射的声信号。

当激光聚焦点移至水面以下 5mm 时, 采集的激光声信号特征见图 5。在该激光声时域序列中, 有

两个明显的脉冲声信号,第1个脉冲为激光击穿水形成等离子体膨胀辐射的声信号,第2个脉冲为空泡膨胀到最大位置处溃灭辐射的声信号。从波形展开图来

看,两次辐射的脉冲持续时间都约为 $20\mu\text{s}$ 。

在不同的聚焦位置处,根据水听器输出电压信号及灵敏度,可计算出水听器的声压强度,见表1。

Table1 The relation of laser energy and bubble energy

the distance of focusing and surface/mm	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	50
acoustic peak value/Pa	31598	71739	112090	119360	117870	114740	111610	108780	101520	87954	79379

从实验统计数据中可以看出,在激光及光学系统参量不变情况下,随着激光聚焦点与水面距离的增加,激光击穿水介质辐射声信号的峰值强度先增大,后降低。激光声信号强度随着激光聚焦点与水面距离增大而增强原因是激光等离子体空泡具有一定的尺寸,等离子体辐射的冲击波信号全部向水中辐射。当激光聚焦点与水面之间的距离超过一定值时,激光到达聚焦点的距离增加,水对激光的吸收增大,进而使辐射的声波信号峰值降低。因而在相同激光参量情况下,为获取最大的激光击穿水介质辐射的声信号强度,激光聚焦点入水深度存在一最优值,该距离与激光空泡尺寸及光学聚焦系统的参量相关。

4 结论

研究了激光与水介质相互作用时,在不同激光聚焦位置条件下,激光击穿辐射声信号的波形、强度等特征。利用设计的激光声实验系统,对激光声信号进行了测量,通过研究可得出以下结论:(1)激光声信号脉冲宽度主要与激光脉冲宽度相关,与激光聚焦位置无关,采用脉冲宽度 8ns , $1.06\mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光击穿水辐射的声信号宽度为 $20\mu\text{s}$ 左右。(2)激光在水面上空气中击穿时,激光声信号穿过水-空气界面时,声压损失约为 65dB ,为在水下产生强的声压信号,应避免激光在空气中聚焦击穿。(3)激光聚焦水面时,只能得到激光等离子体膨胀辐射的声信号,激光聚焦于

水面以下时,可得到激光等离子体膨胀及空泡溃灭辐射的双声压脉冲信号。(4)在相同激光及光学系统参量情况下,激光击穿水辐射声信号的强度与激光聚焦点入水距离相关。

参 考 文 献

- [1] LI R F, CUI G H, TIAN Z X. Laser-acoustic remote sensing technique [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003: 3-11 (in Chinese).
- [2] ZOU B. Acoustic measurement of parameters of laser induced plasma on the target [J]. Laser Technology, 2000, 24(6): 366-369 (in Chinese).
- [3] BERTHELOT Y. Laser generation of sound by nonlinear thermal expansion [M]. Austin: Texas University, 1994: 87-90.
- [4] OSTROVSKAYA G V. Efficiency of optical-to-acoustic energy conversion upon the interaction of a pulsed laser radiation with a liquid [J]. Technical Physics, 2002, 47(10): 1299-1300.
- [5] HE D M. High-power Nd:YAG-generated underwater sound source for air-submarine communication [J]. SPIE, 1999, 3613: 83-93.
- [6] BLACKMON F, ANTONELLI L. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar [J]. SPIE, 2005, 5778: 800-808.
- [7] ANTONELLI L, BLACKMON F. Experimental investigation of optical, remote, aerial sonar [C]//Oceans'02 MTS/IEEE. New York: IEEE, 2002: 1949-1955.
- [8] NI X W, CHEN X, LU J. Study on the mechanism of interaction between laser and liquid material [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 258-261 (in Chinese).
- [9] VOGEL N, BUSCH S. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 100(1): 148-165.

(上接第248页)

- [3] WANG X, ZHANG H Zh, DING G M, et al. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 466-471 (in Chinese).
- [4] ZHANG H Zh, DING G M, JI J Q, et al. Fixture design of laser transmission welding plastics [J]. Welding Technology, 2007, 36(5): 37-39 (in Chinese).
- [5] HABERSTROH E, HOFFMANN W M, POPRAWA R, et al. Laser transmission joining in micro-technology [J]. Microsystem Technology, 2006, 12(7): 632-639.
- [6] PRABHAKARAN R, KONTOPOULOU M. Contour laser-laser transmission welding of glass reinforced nylon 6 [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006, 19(4): 427-439.
- [7] COELHO J M P, ABREU M A, RODRIGUES F C. Thermal modeling CO₂ laser radiation transmission welding of superposed thermoplastic films [J]. Opt Engng, 2003, 42(11): 1-9.
- [8] BECKER F, POTENTE H. A step towards understanding the heating phase of laser transmission welding in polymers [J]. Polymer Engineering and Science, 2004, 42(2): 365-374.
- [9] RUSSEK U A, PALMEN A, STAUB H, et al. Laser beam welding of thermoplastics [J]. Proc SPIE, 2003, 4977: 458-472.
- [10] HARTLEY S, SALLAVANTI R A. Clearweld laser transmission welding of thermoplastic polymers; light transmission and color considerations [J]. Proc SPIE, 2002, 4830: 63-68.