

一种改进的水下光击穿声辐射计算方法

彭 水 张明敏 王江安

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 为了从理论上对光击穿辐射声波进行定量描述,在点源模型的基础上提出了一种改进的水下光击穿声辐射计算方法,利用波动方程和 underwater explosion theory 求解单点击穿的辐射声波,并推导了多点击穿的辐射声波。从理论上对多点击穿的声压波形、声源级、传播特性和指向性进行了定量计算,并通过实验数据对比进行了验证。结果表明,计算与实验结果是一致的,证明了该方法的正确性和有效性;当激光能量从 0.1 J 增大至 0.8 J 时,声源级从 182.4 dB 增至 188.2 dB;当激光能量高于 0.3 J 时,声源级变化很小;在垂直等离子柱体的方向上声波辐射最强,在等离子柱体方向辐射最弱,所有方向上声波强度均与距离的平方成反比。

关键词 激光光学;激光声;多点击穿;声源级

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0402003

Improved Method for Computing Underwater Acoustic Wave Induced by Laser Breakdown

Peng Shui Zhang Mingmin Wang Jiang'an

(Department of Electron Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract In order to describe the acoustic wave quantitatively induced by laser breakdown, an improved method for computing underwater acoustic wave induced by laser breakdown is presented based on model of point source. Acoustic wave induced by laser breakdown with single and multiple regions is computed based on wave equation and underwater explosion theory. The characteristic of acoustic signal such as pressure waveform, sound source level, transmitting and directivity is analyzed quantitatively, and it is verified through the experiment data contrast. The results show that the coincidence between the computed and experimental data validates the theoretical model. As the laser energy increases from 0.1 J to 0.8 J, the sound source level increases from 182.4 dB to 188.2 dB, but when the laser energy exceeds 0.3 J, sound source changes slightly. The power of acoustic signal is highest in vertical direction of cylindrical region of plasma, and lowest in parallel direction. The intensity of acoustic wave makes an inverse proportion to the square of distance in all directions.

Key words laser optics; laser induced acoustic; laser breakdown with multiple regions; sound source level

OCIS codes 140.3440; 140.3530; 140.6810

1 引 言

激光与液体相互作用可以激发声波,当光强密度超过液体的击穿阈值时会引起光击穿^[1]。光击穿时液体分子发生电离产生等离子腔体,等离子腔体吸收激光能量迅速膨胀并辐射冲击波。光击穿机制的光声转换效率很高,能产生较高的声源级,在水声

应用领域具有很好的前景^[2,3]。

关于水下光击穿产生声波的机理研究,国外学者研究了激光在水和乙醇中击穿激发的声场特征^[4~6],这些理论都是基于等离子腔体近似为点源的假设,仅适用于声波频率较低的情况。针对点源近似的假设,国内学者提出了相应的改进模型,但都

收稿日期: 2011-12-12; **收到修改稿日期:** 2012-01-04

基金项目: 国防武器装备重点基金(9140A14060207JB11)资助课题。

作者简介: 彭 水(1985—),男,博士研究生,主要从事光声学、海洋声学等方面的研究。

E-mail: jxpx_peng1985@163.com

导师简介: 张明敏(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事水声物理方面的研究。E-mail: zhangmm_hg@126.com

是基于理论上的定性分析,没有针对声压进行定量计算^[7~9]。王江安课题组通过实验测量的方法研究了激光空泡产生的冲击波及水下单点击穿的声辐射特性^[10,11],采用高速摄像机研究了激光空泡溃灭的特征和不同光聚焦状态的光击穿声辐射特性^[12~14],但缺少对信号波形、声源级等参数的定量描述,而且随着激光器参数和实验条件的改变,实验结果的适用范围也很有限。

本文在点源模型的基础上提出了一种改进的水下光击穿声辐射计算方法,从理论上对多点击穿的声压波形、声源级、传播特性和指向性进行了定量计算,并通过实验数据对比进行了验证。研究结果对开展激光声在水声领域中的应用有一定的参考价值。

2 理论模型

2.1 单点击穿

在纯净的除气水中,当光强略大于水的击穿阈值时,击穿区可看作单个球形等离子腔体,简称单点击穿。等离子腔体在膨胀过程中向外辐射声波,如图1所示。

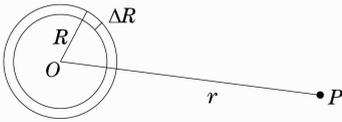


图1 球形等离子腔体的辐射声场

Fig.1 Acoustic radiation induced by spherical plasma

等离子体膨胀产生的冲击波在远场衰减为普通的声波,可以用球源的波动方程描述:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right], \quad (1)$$

式中 p 为声压, t 为时间, c 为水下声速, r 为场点至球心的距离。在自由空间中(1)式的通解可以表示为

$$p(r, t) = \frac{A_0}{r} f(r - ct) \exp[j(\omega t - kr)], \quad (2)$$

式中 A_0 为声压的幅度, f 为任意函数。

假定 $t=0$ 时,腔体体积开始膨胀,激光作用停止后,腔体迅速冷却,介质通过快速弛豫过程恢复到平衡状态,于是有

$$\Delta V = \Delta V_0 \exp\left(-\frac{t}{\sigma}\right), \quad (3)$$

式中 ΔV 为 t 时刻等离子体的体积增量,即图1中半径增量 ΔR 对应的体积增量, ΔV_0 为 $t=0$ 时的体积增量, σ 为信号的衰减常数,指声压幅度衰减为 e^{-1} 所需的时间。

等离子体膨胀产生的声波传播到 r 处所需时间为 r/c ,通过这些初始条件可以解得

$$f(r - ct) = \exp\left(-\frac{t - r/c}{\sigma}\right), \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式可以得到单点击穿的声压表达式为

$$p(r, t) = \frac{A_0}{r} \exp\left(-\frac{t - r/c}{\sigma}\right) \exp[j(\omega t - kr)], \quad (5)$$

其中声压幅度 A_0 可以由水下爆炸理论近似描述^[15]

$$R_0 = \left(\frac{3\gamma - 1}{4\pi\rho}\right)^{0.2} E^{0.2} \tau^{0.4}, \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \rho^{0.7} \left(\frac{3\gamma - 1}{4\pi}\right)^{0.3} E^{0.3} \tau^{0.1} c^{1.5} \left[2 \ln\left(\frac{r}{R_0}\right)\right]^{-0.5}, \quad (7)$$

式中 R_0 为等离子腔体膨胀达到的最大半径, γ 为水的热力学参数, ρ 为纯水的密度, E 为激光的脉冲能量, τ 为激光信号的脉宽。

综合(5)、(7)两式可以看出,只要给定激光的脉冲能量及脉宽,就可以计算任意位置的声压。

2.2 多点击穿

当光强密度超过水的击穿阈值很多时,会发生多点击穿,形成一直线段的击穿区域,击穿区域内连续分布着很多相互独立的等离子腔体,如图2所示,通过对所有腔体的辐射声场进行叠加可以得到总的辐射声场。

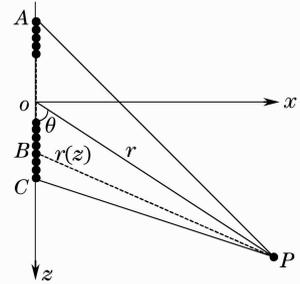


图2 等离子柱体的辐射声场

Fig.2 Acoustic radiation induced by cylindrical region of plasma

在图2中,以等离子体柱的中轴为 z 轴, A 、 C 分别为柱体的端点, $L = \overline{AC}$, B 为其中的动点, L 的中点 o 定义为坐标原点, P 为场点, oP 之间的距离为 r , BP 之间的距离为 $r(z)$, r 与 L 的夹角为 θ 。

设 $t=0$ 时,等离子腔体发生膨胀, t_a 为 A 点产生的声波传播到 P 所需的时间, t_c 为 C 点产生的声波传播到 P 所需的时间,由于 $r \gg L$,可以得到

$$t_a = \frac{1}{c} \left(r + \frac{L \cos \theta}{2} \right), \quad (8)$$

$$t_c = \frac{1}{c} \left(r - \frac{L \cos \theta}{2} \right). \quad (9)$$

沿着 \overline{AC} 进行积分便可得到总的声场:

$$p(r, \theta, t) = \int_A^C \frac{A_0}{r(z)} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma} \left[t - \frac{r(z)}{c} \right] \right\} \times \exp \{ j[\omega t - kr(z)] \} dz. \quad (10)$$

作变量代换: $\tau = t - r(z)/c$, 于是 B 点对应 $\tau = 0$, C 点对应 $\tau = t - t_c$, $\omega t - kr(z) = \omega \tau$. 当 $r \gg L$ 时, $dz = cd\tau / \cos \theta$, 于是对积分变量进行转换后可以得到

$$p(r, \theta, t) = \int_A^C \frac{A_0 nc}{r(z) \cos \theta} \exp \left(-\frac{\tau}{\sigma} \right) \exp(j\omega \tau) d\tau, \quad (11)$$

式中 n 为单位长度上的等离子腔体个数, $n = \frac{1}{2R_0}$.

动点 B 产生的声波传播到 P 所需的时间位于 t_a 和 t_c 之间. 于是(11)式可以分为 3 种情况:

1) 当 $t < t_c$ 时, 声波尚未传播到 P 点, $p(r, \theta, t) = 0$.

2) 当 $t_c \leq t \leq t_a$ 时, t 时刻 B 点产生的声波刚好传播到 P 点, 只有 \overline{BC} 之间的等离子体产生的声波传播到 P 点, 于是:

$$p(r, \theta, t) = \int_0^{t-t_c} \frac{A_0 nc}{r(z) \cos \theta} \exp \left(-\frac{\tau}{\sigma} \right) \exp(j\omega \tau) d\tau = \frac{A_0 nc}{r \cos \theta} \int_0^{t-t_c} \exp \left(-\frac{\tau}{\sigma} \right) \exp(j\omega \tau) d\tau, \quad (12)$$

将(12)式的积分结果取实部就可以得到总的声压表达式为

$$p(r, \theta, t) = K \left\{ 1 + [\omega \sigma \sin \omega(t - t_c) - \cos \omega(t - t_c)] \exp \left(-\frac{t - t_c}{\sigma} \right) \right\}, \quad (13)$$

式中

$$K = \frac{A_0 nc \sigma}{r \cos \theta (\omega^2 \sigma^2 + 1)}. \quad (14)$$

3) 当 $t > t_a$ 时, L 上所有的等离子体均对 P 点的声场有贡献, A 点对应 $\tau = t - t_a$, C 点对应 $\tau = t - t_c$, 于是(11)式可以写为

$$p(r, \theta, t) = \frac{A_0 nc}{r \cos \theta} \int_{t-t_a}^{t-t_c} \exp \left(-\frac{\tau}{\sigma} \right) \exp(j\omega \tau) d\tau. \quad (15)$$

将(15)式的积分结果取实部就可以得到总的声压表达式为

$$p(r, \theta, t) = K \left\{ [\omega \sigma \sin \omega(t - t_a) - \cos \omega(t - t_a)] \exp \left(-\frac{t - t_a}{\sigma} \right) - [\omega \sigma \sin \omega(t - t_c) - \cos \omega(t - t_c)] \exp \left(-\frac{t - t_c}{\sigma} \right) \right\}. \quad (16)$$

特殊条件下, 当 $\theta = \pi/2$ 时, (11) 式分母为 0, 以上结果并不适用. 针对这种情况, $\theta = \pi/2$ 时, $t_a = t_c$, 所有等离子体产生的声波均同时到达 P 点, 恒有 $\tau = 0$.

综合上述讨论, 可以得到以下结果:

1) 当 $t < t_c$ 时, $p(r, \theta, t) = 0$.

2) 当 $t \geq t_c$ 时, 远场条件下, $r(z)$ 不随 z 变换, 始终为常数 r

$$p(r, \theta, t) = \int_A^C \frac{A_0 nc}{r(z)} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma} \left[t - \frac{r(z)}{c} \right] \right\} \times \exp \{ j[\omega t - kr(z)] \} dz = \frac{A_0 nc L}{r} \times \exp \left[-\frac{1}{\sigma} \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \exp \{ j[\omega t - kr] \}. \quad (17)$$

综合(13)、(16)、(17)式便可得到任意时刻和位置的声压。

3 实验测量

水下光击穿声辐射实验测量系统框图如图 3 所示. 实验采用调 Q Nd:YAG 激光器, 激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 脉冲宽度 8 ns, 单脉冲能量 0.1~0.8 J 可调, 光束半径 6 mm. 分光镜将 2% 的激光能量送入能量计, 以便对每个激光脉冲的能量进行监测. 激光经过聚焦透镜后在水面以下发生光击穿, 对激光声信号采用高频无指向性的水听器进行接收, 灵敏度为 -216 dB. 采用 Agilent 54621A 型示波器对水听器接收到的激光声信号进行采集.

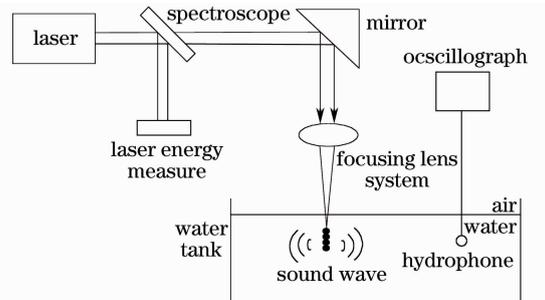


图 3 光击穿声辐射测量系统

Fig. 3 Diagram of the apparatus of laser breakdown experiment

实验中采用非扩束聚焦的方式,此时为多点击穿,在聚焦区域内观察到了耀眼的等离子体闪光,击穿区域中心距离水面约 25 mm,测量的主要步骤及内容为:水听器与击穿点的距离为 20 cm,脉冲能量维持在 0.6 J,改变水听器的位置分别采集激光声信号,每个位置采集 5 个声脉冲;水听器的位置固定不变,激光能量在 0.1~0.8 J 的范围内变化,采集不同的激光能量产生的激光声信号。

4 结果分析

参数设置:激光能量 0.6 J,脉宽 8 ns,衰减常数 $\sigma=5 \mu\text{s}$,水的比热容比 $\gamma=1.26$ 。

在 $r=20 \text{ cm}, \theta=60^\circ$ 的位置激光声信号的波形如图 4 所示,其中图 4(a)是计算结果,图 4(b)中的实线为实验结果,已将水听器的输出电压按灵敏度转化为声压值,虚线为误差,即计算结果与实验结果之差。从误差曲线可以看出,计算结果和实验结果的波形结构基本相符,声压的差值在 10% 以内。误差主要来源于两个因素:实验结果中含有噪声;两个波形在时间轴上并非严格对准,实验结果的脉宽略大于计算结果。

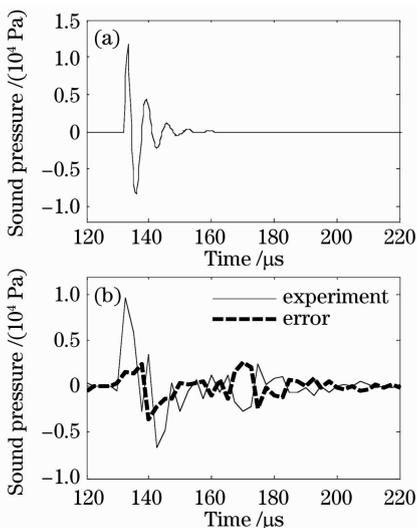


图 4 激光声信号。(a)计算结果;(b)实验结果及误差

Fig. 4 Acoustic signal induced by laser breakdown.

(a) Theoretical result; (b) experimental result and error

图 5 是声源级与激光能量的变化关系,随着激光能量的不断增大,声源级逐渐增大。在 0.1~0.3 J 的范围内,声源级上升较快,从 183 dB 增至 186 dB;在 0.3~1.0 J 的范围内,随着能量的增大,声源级变化很小,从 186.0 dB 增至 187.3 dB。这是由于在激光能量增大的开始阶段,等离子腔体的最大泡半径增大较为明显,辐射的声波也明显增强;当

能量达到一定程度后,等离子腔体能达到的最大半径变化很小,因此声源级的变化也很小。图中计算值与实验值的差值均在 1 dB 以内。

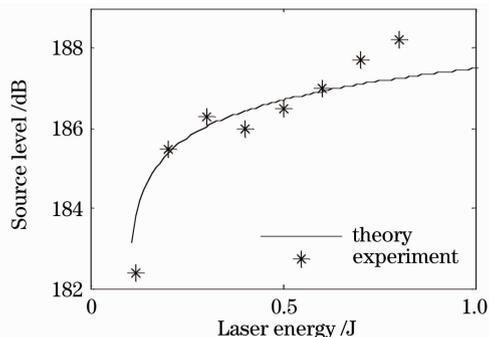


图 5 声源级随激光能量的变化关系

Fig. 5 Relation between source level and laser energy

多点击穿时由于所有等离子腔体辐射的声波达到接收点的声程不同,会产生干涉,因此激发的声场具有方向特性,声源指向性如图 6 所示,其中星号为实验结果,每个位置均为 5 个脉冲平均后的结果。曲线关于 $\theta=0^\circ$ 对称,当 $\theta \in [0^\circ, 30^\circ]$ 时,声波辐射随 θ 的增大迅速增强;当 $\theta \in [30^\circ, 90^\circ]$ 时,声波辐射随 θ 的增大缓慢增强;在 $\theta=90^\circ$ 的方向上声波辐射最强。这是由于所有等离子腔体辐射的声波同相叠加的结果。图 6 中计算结果与实验结果基本一致。

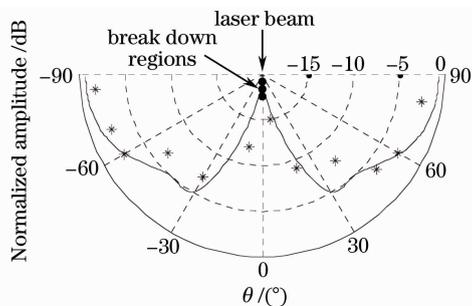


图 6 多点击穿的声源指向性图

Fig. 6 Directivity of sound source induced by laser breakdown with multiple regions

综合(13)、(16)、(17)式可以得到不同方向上声波强度的计算值随距离的变化关系如图 7 所示,横坐标为 $\lg r$,纵坐标显示的是根据参考声压($1 \mu\text{Pa}$)转化后的分贝值。在不同的方向上,声波强度存在一定差异,声波强度均与 $\lg r$ 成线性关系,根据直线的斜率可以看出距离每增大至原来的 10 倍,强度则降低 20 dB。可见,在所有方向上多点击穿的辐射声波强度均与 r^2 成反比。

5 结 论

在点源模型的基础上提出了一种改进的水下光

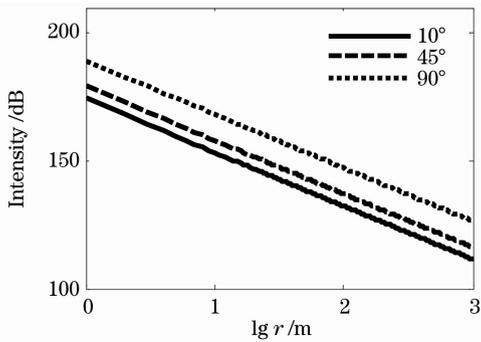


图7 不同方向上激光声强度随距离的变化关系

Fig.7 Relation between acoustic intensity and distance in different directions

击穿声辐射的计算方法,利用波动方程得到了单点击穿的声压,并推导了多点击穿的辐射声波。从理论上对多点击穿的声压波形、声源级、传播特性和指向性进行了定量计算,并通过实验数据对比进行了验证。得到了如下结论:

1) 计算结果与实验结果吻合较好,证明了该方法的正确性和有效性。

2) 声源级随激光能量的增大逐渐增大,在0.1~0.8 J的范围内,声源级从182.4 dB增至188.2 dB,当激光能量高于0.3 J时,声源级变化很小。

3) 多点击穿的辐射声场具有方向性,在垂直等离子柱体的方向上声波辐射最强,在等离子柱体方向辐射最弱。在所有方向上声波强度均与距离的平方成反比。

参 考 文 献

- 1 Li Rongfu, Cui Guihua, Tian Zuoxi. Laser-Acoustic Remote Sensing Technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 12~15
李荣福, 崔桂华, 田作喜. 激光声遥感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 12~15
- 2 F. Blackmon, L. Antonelli. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar[C]. SPIE, 2005, **5778**: 208~213
- 3 Zong Siguang, Wang Jiang'an. An opto-acoustic method for communication between aerial and underwater platforms [J]. *Electronics Optics and Control*, 2009, **16**(10): 75~79
宗思光, 王江安. 空中对水下平台激光声通信技术的探讨[J]. *电光与控制*, 2009, **16**(10): 75~79
- 4 T. Kovalchuk, G. Toker, V. Bulatov. Laser breakdown in alcohols and water induced by 1064 nm nanosecond pulses[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2010, **500**(4): 242~250

- 5 G. Toker, V. Bulatov, T. Kovalchuk *et al.*. Micro-dynamics of optical breakdown in water induced by nanosecond laser pulse of 1064 nm wavelength[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2009, **471**(5): 244~248
- 6 L. Antonelli, F. Blackmon. Experimental demonstration of multiple pulse non-linear opto-acoustic signal generation and control[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(1): 103~112
- 7 Gao Limin, Cao Hui. Research on sound field induced by laser breakdown in liquid[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1586~1589
高立民, 曹辉. 液体中光击穿所激发的声场理论研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1586~1589
- 8 Cao Hui, Shang Zhiyuan. The research of directivity of the sound field through mechanism of laser-induced liquid breakdown[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2003, **33**(1): 19~22
曹辉, 尚志远. 液体光击穿所激发声场的方向性[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, **33**(1): 19~22
- 9 Yu Yang, Wang Jiang'an, Jiang Xingzhou. The study of theory of directivity of laser-induced sound radiating field in water[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(1): 26~29
余扬, 王江安, 蒋兴舟. 激光致声水中辐射声场的方向性研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(1): 26~29
- 10 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Zhiguo. Lighting and shock wave emission of laser cavitation bubble collapse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1000~1006
宗思光, 王江安, 马治国. 激光空泡的溃灭发光及冲击波辐射[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1000~1006
- 11 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Mingkui. Investigation of laser-induced acoustic signal for target detection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1332~1337
宗思光, 王江安, 马明奎. 水下目标探测的激光声特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1332~1337
- 12 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Zhiguo *et al.*. Erosion characteristics of laser bubble collapse in the vicinity of a solid boundary[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 885~892
宗思光, 王江安, 马治国等. 壁面附近激光空泡溃灭的空蚀特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 885~892
- 13 Zong Siguang, Wang Jiang'an. Laser breakdown-generated sound in different optical focusing lens systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1380~1384
宗思光, 王江安. 不同光聚焦状态的光击穿声辐射[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1380~1384
- 14 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Wang Huihua. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2197~2202
宗思光, 王江安, 王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2197~2202
- 15 Chen Qingming. Research of Acoustics Induced by Pulsed CO₂ Laser in Water[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009
陈清明. 脉冲CO₂激光水下致声特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009

栏目编辑: 谢婧