

脉宽可调钬激光诱导水下声波信号特性实验研究

吕 涛^{1,2,3} 张 伟¹ 陈 昉¹

¹中国地质大学(武汉)数理学院, 湖北 武汉 430074

²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163

³中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 800 μm 芯径低氢氧根光纤传输自由运转钬激光脉冲爆炸式汽化光纤端面的水形成汽化泡, 汽化泡闭合时会辐射振荡波信号。不同激光参数条件下汽化泡形貌和运动状态有差异, 导致辐射振荡声波的个数、强度、谐振周期、声学频率等特性参数不同。为研究不同脉宽对声信号的影响, 搭建了声信号测量系统, 通过示波器分析计算振荡波声学信号特征参数。结果表明电源电压为 1000 V、频率为 5 Hz、电源脉宽为 0.7~1.6 ms 的条件下, 随着脉宽增加, 声压值整体上先升高但存在多个拐点, 达到峰值 1.01 MPa 后呈现下降趋势, 但第一个声学信号频率总体呈下降趋势且最大值为 400 Hz。高能量、短脉宽的钬激光脉冲能诱导高强度、多个数、短周期、高频率的振荡波信号。

关键词 生物医学光学; 红外脉冲激光; 汽化效应; 脉宽可调

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0404003

Experimental Research of Acoustic Transients Induced by Holmium: YAG Lasers with Tunable Pulse Duration Underwater

Lü Tao^{1,2,3} Zhang Wei¹ Chen Fang¹

¹School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

²Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

³State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Free-running holmium: YAG lasers transmitting in a fiber with core diameter of 800 μm can induce vaporization bubble explosively at the end of fiber underwater. Shock waves will be produced upon the vaporization bubble collapse. The shape and dynamic state of vaporization bubble under different laser parameters, can result in variable parameters of the number, intensity, oscillation period, acoustic frequency, and so on, of shock waves. An acoustic measurement system has been built to investigate the influence of pulse duration on acoustic transients, and the characteristic parameters of the first acoustic transient can be recorded by an oscillograph. The experimental results indicate that under the condition of 1000 V voltage, 5 Hz frequency, 0.7~1.6 ms pulse duration of pump power, resonance will happen for the intensity of acoustic transients at the starting period. Finally the intensity will decrease after reaching the peak value of 1.01 MPa. The frequency of acoustic transients will always decrease gradually as the pulse duration of lasers increases, and its peak value can reach 400 Hz. Holmium: YAG lasers with higher energy and shorter pulse duration can induce acoustic transients with higher intensity, more number, shorter period, and higher frequency.

Key words biomedical optics; infrared pulse laser; vaporization effect; tunable pulse duration

OCIS codes 280.5475; 280.3375; 140.3460

收稿日期: 2014-11-27; 收到修改稿日期: 2014-12-19

基金项目: 武汉市青年科技晨光计划(201271031430)、中国博士后科学基金面上项目(2014M2104)、中国科学院江苏省医用光学重点实验室开放基金(JKLMO201405)、湖北省自然科学基金(2014CFB335)

作者简介: 吕 涛(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光医学方面的研究。E-mail: lvtaohn@sina.com

1 引言

波长为 2.12 μm 的钛激光脉冲目前在临床医学上得到广泛运用,因为水的吸收系数约为 30 cm^{-1} 且其能够在低 OH^- 浓度的石英光纤中低损耗传输,所以钛激光成为一种能够精确、高效且较小热损伤消融生物组织的有效工具^[1-2]。临床运用中有时在液体环境条件下操作^[3-4],大芯径光纤传输的钛激光首先作用于光纤与生物组织间隙处的液体而产生汽化泡,由于汽化泡相对于水而言对钛激光的吸收更小,后续钛激光脉冲能够以较小的能量消耗而最大限度地作用于目标生物组织^[5-6],因此光纤端面处液体动力学性质直接影响脉冲激光与生物组织相互作用机理^[7]。光纤传输自由运转钛激光脉冲与液态水的作用机理主要是汽化效应。钛激光经光纤传输进入水中后,水吸收钛激光能量后快速升温汽化,在光纤端面处形成微米至毫米级尺度的汽化泡^[8-10]。汽化泡在泡内外压差的作用下对外膨胀,推动周围液体介质沿外径向流动。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,膨胀加速度减小为零,由于液体的惯性作用,空泡将继续作过度膨胀,达到最大泡半径时膨胀速度减小为零。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,同时压缩汽泡并使之不断收缩,泡内压力逐步增大。由于聚合液流惯性的作用,汽化泡被过度压缩,使其内部压力再次高于周围的平衡液体压力,直至腔内压力高到能阻止气泡压缩而达到新的平衡。至此,汽化泡膨胀与压缩的第一次循环结束。但此时由于泡内压力比周围介质的静压力大,因此汽泡反弹,随后经历第二次膨胀和压缩过程。汽化泡经历若干膨胀-收缩-膨胀谐振运动过程,因能量耗散而体积逐渐减小,直至完全闭合分裂成若干个小汽泡浮到液体表面完全破裂。汽泡膨胀时压缩周围液体做功,收缩时液体压缩汽泡做功,汽泡闭合时向外辐射振荡声波^[11-16]。Frenz 等^[17-18]研究了钛激光水下空化效应中激发的振荡波信号与入射激光信号的关系,得出汽化泡形成机理为能量的快速沉积和热弹性双极性应力中负张力作用且张力的出现由于热弹性膨胀波的声学衍射。Jansen 等^[19]分析了钛激光脉冲宽度对汽化泡形成和压力波信号的影响,得出随着脉冲宽度增加,汽化泡形状从球形向拉长的圆筒形变化,激发的声学信号主要依赖于汽化泡的形状和尺寸大小且幅度逐渐减小。本文使用光纤传输脉冲宽度可调的钛激光(抽运电压为 0~1000 V,频率为 0~50 Hz,脉冲宽度可调范围为 0.2~2 ms)水下诱导汽化效应,采用针式水听器探测振荡波信号并将声波信号转换为电信号输入示波器记录^[20-22],分析近似相同激光能量条件下不同激光脉宽对诱导声学信号特性的影响。

2 实验系统

2.1 激光参数测量

钛激光器输出的激光脉冲经 CaF_2 透镜(北京玻璃研究院,直径为 15 mm,焦距为 15 mm)聚焦,焦点位于光纤的入射端面上,脉冲激光耦合进入 800 μm 芯径低 OH^- 石英光纤(南京春晖科技, $NA=0.22$)。激光参数测量流程:1) 为防止光纤输出激光对光电探测器端面的损伤,将光纤传输的钛激光以一定入射角入射到铁板上,在距离铁板约 5 cm 处放置一个光电探测器(PV-3, Vigo 公司,响应时间 $\tau < 15\text{ ns}$),探测部分反射光信号,转换后的电压信号输入示波器(泰克, DPO 4104),记录激光脉宽;2) 距光纤输出端面约 4 mm 处放置光功率能量计探测器(PE50BF-C, Ophir, 以色列),从表头(NOVA II, Ophir, 以色列)探测激光能量或功率。连续测量 50 个脉冲,读取平均值和标准偏差。激光能量与脉冲宽度数值测量结果如图 1 所示。多次测量结果表明,抽运电压为 1000 V,频率为 5 Hz 时,当电源脉宽从 0.4 ms 增大到 1.2 ms 时输出激光平均能量从 58.55 mJ 增大到 442 mJ;电源脉宽增大到 1.6 ms 时,输出激光平均能量从 442 mJ 减小到 411.2 mJ;电源脉宽小于 0.7 ms 时,激光器输出激光能量波动较大,而电源脉宽大于 0.7 ms 时,激光能量在 429.35 mJ 附近波动,波动范围小于 5%,可视能量恒定输出。图 2 为电源抽运电压为 1000 V、频率为 5 Hz、抽运脉宽为 600 μs 和 1200 μs 时光纤输出对应激光脉冲宽度分别为 302 μs [图 2(a)]和 748 μs [图 2(b)]。可见真实输出脉宽与抽运电源脉宽差别较大,脉宽越宽的脉冲顶部会呈现多个锯齿状的微秒级脉冲宽度的毛刺短脉冲。

2.2 振荡波信号测量系统

光纤将聚焦后的激光传输进入纯石英水槽(100 mm×100 mm×100 mm,北京玻璃研究院)水面 3 cm 以下,距光纤端面 4 mm 处放置水听器(中国科学院声学研究所, PT-0907112,敏感端面直径为 0.8 mm,灵敏度为

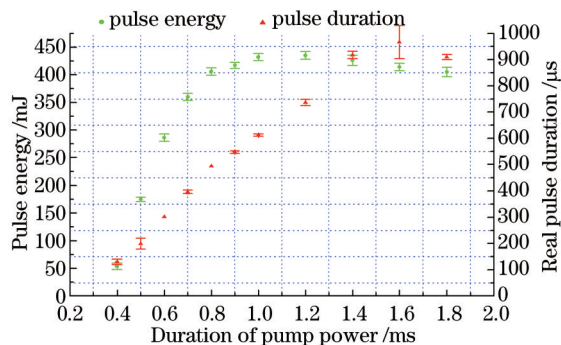


图1 800 μm 芯径光纤输出钬激光抽运脉宽与能量和真实脉冲宽度的关系

Fig.1 Relationship between pump duration and energy and pulse duration under 800 μm fiber transmitting holmium:YAG laser pulses

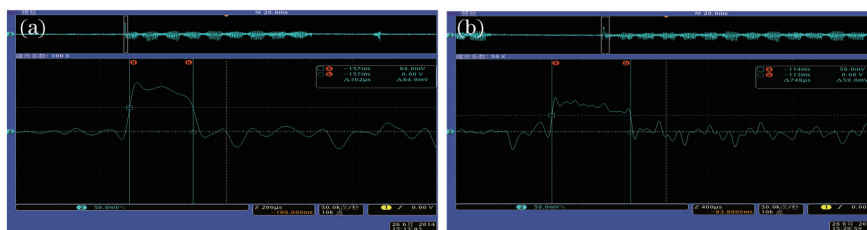


图2 抽运电源脉宽为 600 μs 和 1200 μs 时对应真实输出激光脉宽分别为(a) 302 μs 和(b) 748 μs

Fig.2 Laser pulse duration of holmium:YAG laser pulse profiles under pump durations of 600 μs and 1200 μs. (a) 302 μs; (b) 748 μs
 10 nV/Pa ,响应时间为数十纳秒)探测振荡波信号,通过信号线将电信号输入示波器 CH4 通道,示波器可显示声信号的个数、幅值、极性、波形、频谱。实验流程如图 3 所示。利用红外探测器(PV-3.4, VIGO 公司,波兰)探测光纤耦合端面反射的部分光信号同步输入示波器 CH1 通道,可同时比较光信号与声波信号。

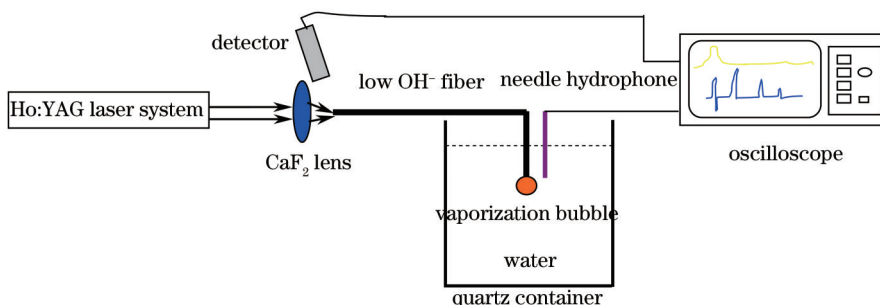


图3 光纤传输钬激光水下诱导振荡波信号测量实验系统

Fig.3 Experimental system for measuring shock wave induced by fiber transmitting holmium:YAG laser pulse

3 激光诱导声信号特性分析

3.1 声压及脉冲波形

汽化泡彻底闭合前通常会辐射 2~3 个声波信号,但首次闭合时辐射的声信号强度最大,后续谐振过程因对液体不断做功而能量逐渐衰减,辐射的声信号强度也逐渐衰减,因此这里只分析首次闭合时辐射声信号的特性。图 4 为电源抽运电压为 1000 V、脉宽为 1.0 ms(实际激光脉冲宽度为 720 μs)、频率为 5 Hz 时钬激光脉冲经 600 μm 芯径光纤传输至水下 3 cm 处诱导振荡波信号,激光脉冲开始作用后 760 μs 时开始出现振荡波信号,其半峰全宽为 530 μs,脉冲信号强度幅值为 10.4 mV。对低频声学信号进行测量时水听器灵敏度约为 10 nV/Pa,则声压值为 1.04 MPa。相同实验条件下测量了抽运脉冲宽度从 0.2 ms 逐渐增加到 1.4 ms 时(每次增加 0.1 ms),800 μm 芯径光纤传输钬激光脉冲水下诱导产生的正极性声学信号半峰全宽变化范围为 56~66 μs,负极性声学信号半峰全宽变化范围为 42~46 μs。抽运脉冲宽度为 1.6 ms 和 1.8 ms 时,诱导产生的正极性声学信号半峰全宽分别为 74 μs 和 80 μs,呈现较缓慢增加趋势,而负极性声学信号半峰全宽分别为 40 μs 和 38 μs,呈现较缓慢减小趋势。在首个最大幅度的正负声学脉冲后有许多交替出现的小正负声学脉冲,这是

由激光脉冲波形后多个小光学脉冲[图 2(a)、(b)]诱导产生的。理想的自由运转钬激光脉冲波形近似矩形,上升沿陡峭而下降沿较平缓。实验过程中测量了多组不同抽运脉冲条件下真实输出激光脉冲波形均类似于图 2 所示波形。



图 4 720 μs 脉宽的钬激光脉冲(通道 1)水下诱导振荡波信号(通道 4)形貌

Fig.4 Shock wave profile (Channel 4) induced by holmium:YAG laser pulse with pulse duration of 720 μs (Channel 1)

为研究脉宽对声信号特性的影响,需要激光能量恒定,当电源电压和工作频率恒定,电源脉宽在 0.7 ms 以上时,输出的激光能量波动较小。为避免能量对声信号的影响,脉宽可调范围设为 0.9~1.6 ms,得到声压及第一个声学信号频率和真实激光脉宽的关系如图 5 所示。

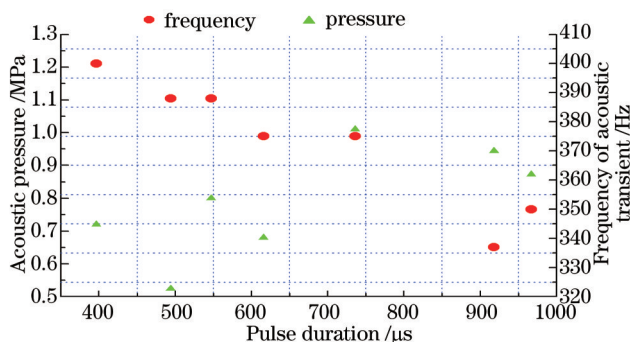


图 5 激光脉宽与振荡波压力信号及第一个声学信号频谱的关系

Fig.5 Relationship between laser pulse duration and shock wave signal and the first acoustic transient

随着脉宽增加,397 μs 脉宽、354.3 mJ 能量的钬激光诱导水下振荡波信号幅值为 0.72 MPa,高于 494 μs 脉宽、408.1 mJ 能量的钬激光诱导水下振荡波信号幅值 0.524 MPa,却小于 547 μs 脉宽、420.8 mJ 能量的钬激光诱导水下振荡波信号幅值 0.8 MPa,原因是对于同一芯径的光纤而言,当激光脉冲宽度增加时,在光纤端面处诱导产生的汽化泡体积将会发生急剧变化。通常 400 μs 以内短脉冲激光诱导汽化泡体积较规则且为近似球形,当脉宽增加时,端面处已经形成的汽化泡在外部水压力作用下不能再继续膨胀,然而单个激光脉冲仍未结束,后续的激光会对已经形成的汽化泡继续加热,因此会形成蘑菇形或拖长的茄子形形貌,于是有两个甚至多个汽化中心,并且随着时间持续,端面近端汽化泡体积逐渐减小而远端汽化泡体积逐渐增大。由于汽化泡闭合时辐射的声学信号极性、个数、强度决定于汽化泡形貌和对称性,所以长脉冲钬激光诱导的多个汽化泡之间会相互影响,汽化中心不重合,导致最终辐射的声学信号压力强度低但压力信号个数较多。至于激光诱导光纤端面汽化泡个数从一个变到两个或三个甚至更多的临界脉冲宽度仍待进一步研究,因为它涉及到激光能量、脉宽、重复频率等多个参数的稳定性及水动力学环境的影响。736 μs 脉宽、442 mJ 能量的钬激光诱导水下振荡波信号幅值最大为 1.01 MPa,随着脉宽增加探测到的声学压力信号开始逐渐减小至 0.872 MPa。所以激光脉冲宽度增大过程中,声学信号压力会出现拐点,但第一个声学信号频率始终下降,因为声学信号的频率是由声源振荡频率决定而不是由汽化泡动态谐振频率决定。

3.2 振荡波信号频谱

示波器对输入的振荡波声学信号进行快速傅里叶变换(FFT),得到声信号的频谱。在激光器电源启动、预热但尚未工作前,水听器和示波器测到的噪声信号频谱如图 6 所示。图 6 中上下两条波形分别为噪声信

号和噪声频谱,频谱有两处峰值,左端为0 Hz,右端48.8 Hz即为电源噪声信号频率。电源电压为1000 V、脉宽为0.8 ms、频率为5 Hz时,得到声信号频谱如图7所示。从图7频谱图中看出,从左至右峰值所在频率分别为48.8、388、3510 Hz,第一个为电源噪声信号频率,第二个和第三个为激光诱导声信号频率,两个声学信号频率相差3122 Hz。在2.1节实验条件下,相同电源工作频率和能量时,得到声学信号的频率与脉宽之间的关系,如图5所示。图5表明,声信号频率随脉宽的增加总体呈下降趋势,脉宽为397 μs 时,第一个声学信号频率最大值为400 Hz,此后随着脉宽增加声学信号频率逐渐减小。当脉宽为918 μs 时声学信号频率出现最小值,为337 Hz,这与抽运脉冲宽度时激光器输出激光能量下降且稳定性变差有关。

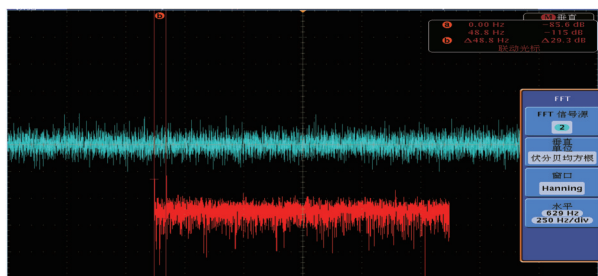


图6 噪声信号频谱

Fig.6 Frequency spectra of noise

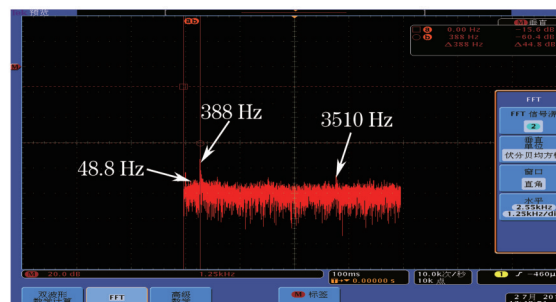


图7 钬激光脉冲诱导水下声学信号频谱

Fig.7 Frequency spectra of acoustic transient induced by holmium:YAG laser pulse

4 结 论

为研究光纤传输钬激光水下诱导声信号的特性,在近似相同激光能量条件下,改变脉宽得到不同振荡波声学信号,通过示波器显示计算了声学信号的声压、频谱、极性、个数、谐振周期等特性参数。结果表明,电源抽运电压为1000 V、频率为5 Hz,激光脉宽从397 μs 增大至967 μs 时,声压值总体呈先上升趋势,但存在多个拐点,声信号压力在激光脉冲宽度为736 μs 时达到峰值1.01 MPa,然后呈下降趋势,而第一个声学信号频率始终呈下降趋势。能量越高、脉宽越短的钬激光脉冲诱导的振荡波信号强度越高,个数越多,谐振周期越短,频率越大。

参 考 文 献

- 1 A Vogel, V Venugopalan. Mechanisms of pulsed laser ablation of biological tissues[J]. Chem Rev, 2003, 103(2): 577-644.
- 2 R L Blackmon, P B Irby, N M Fried. Comparison of holmium:YAG and thulium fiber laser lithotripsy: Ablation thresholds, ablation rates, and retropulsion effects[J]. J Biomed Opt, 2011, 16(7): 071403.
- 3 H Lee, H W Kang, J M H Teichman, *et al.*. Urinary calculus fragmentation during Ho:YAG and Er:YAG lithotripsy[J]. Lasers Surg Med, 2006, 38(1): 39-51.
- 4 M Ith, H Pratisto, H U Staubli, *et al.*. Side effects of laser therapy on cartilage[J]. Sports Exerc Inj, 1996, 2(4): 207-209.
- 5 H Pratisto, M Ith, M Frenz, *et al.*. Infrared multiwavelength laser system for establishing a surgical delivery path through water[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(14): 1963-1965.
- 6 H Pratisto, M Frenz, M Ith, *et al.*. Combination of fiber-guided pulsed erbium and holmium laser radiation for tissue ablation under water[J]. Appl Opt, 1996, 35(19): 3328-3337.
- 7 W Wagner, A Sokolow, R Peartstein, *et al.*. Thermal vapor bubble and pressure dynamics during infrared laser ablation of tissue[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(1): 013901.
- 8 T Lv, Q Xiao, Z J Li, *et al.*. Influence of water environment on holmium laser ablation performance for hard tissues[J]. App Opt, 2012, 51(13): 2505-2514.
- 9 T Lv, Z J Li. Underwater holmium-laser-pulse-induced complete-cavitation bubble movements and acoustic transients[J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(12): 1226-1229.
- 10 T Lv, Q Xiao, D Xia, *et al.*. Cavitation effect of holmium laser pulse applied to ablation of hard tissue underwater[J]. J Biomed Opt, 2010, 15(4): 048002.

- 11 M Frenz, G Paltauf, H Schmidt-Kloiber. Laser-generated cavitation in absorbing liquid induced by acoustic diffraction[J]. Phys Rev Lett, 1996, 76(19): 3546-3549.
- 12 R Brinkmann, C Hansen, D Mohrenstecher, *et al.*. Analysis of cavitation dynamics during pulsed laser tissue ablation by optical on-line monitoring[J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 2(4): 826-835.
- 13 E A Brujan, K Nahen, P Schmidt, *et al.*. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near an elastic boundary[J]. J Fluid Mech, 2001, 433: 251-281.
- 14 D Lapotko. Optical excitation and detection of vapor bubbles around plasmonic nanoparticles[J]. Opt Express, 2009, 17(4): 2538-2556.
- 15 H W Kang, H Lee, J M H Teichman, *et al.*. Dependence of calculus retropulsion on pulse duration during Ho:YAG laser lithotripsy [J]. Lasers Surg Med, 2006, 38(8): 762-772.
- 16 Lü Tao, Xiao Qing, Li Zhengjia. Cavitation effect of pulsed holmium laser and dynamic characteristics of hard tissue ablation underwater[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3558-3562.
吕 涛, 肖 青, 李正佳. 脉冲钬激光水下空化效应及消融生物硬组织动态特性[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3558-3562.
- 17 M Frenz, F Konz, H Pratisto, *et al.*. Starting mechanisms and dynamics of bubble formation induced by a Ho:YAG aluminum garnet laser in water[J]. J Appl Phys, 1998, 84(11): 5905-5912.
- 18 M Frenz, G Paltauf, H Schmidt-Kloiber. Laser-generated cavitation in absorbing liquid induced by acoustic diffraction[J]. Phy Rev Lett, 1996, 76(19): 3546-3549.
- 19 E D Jansen, T Asshauer, M Frenz, *et al.*. Effect of pulse duration on bubble formation and laser-induced pressure waves during holmium laser ablation[J]. Lasers Surg Med, 1996, 18(3): 278-293.
- 20 Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.*. Research on laser-induced acoustic signals in different water depths[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102002.
王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 水体深度对激光声信号影响研究[J]. 中国激光, 2013, 40 (11): 1102002.
- 21 Li Xiaolong Wang Jiang'an, Zong Siguang. Analysis of optical fiber acoustic transducer with a MEMS membrane[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005007.
李晓龙, 王江安, 宗思光. 基于 MEMS 膜片的光纤声传感器分析[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005007.
- 22 Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.*. Research on energy distribution after laser-induced optical breakdown underwater [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002007.
王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 水下光击穿的能量分布研究[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002007.

栏目编辑: 吴秀娟