

文章编号:1004-4213(2010)12-2263-5

液体中激光等离子体声波特性研究*

李胜勇¹, 饶德虎¹, 沈中华², 倪晓武²

(1 海军工程大学 电子工程系, 武汉 430033)

(2 南京理工大学 应用物理系, 南京 210094)

摘 要:采用压电陶瓷水听器对液体中激光等离子体声波进行了实验研究. 利用小波变换对不同激光能量、不同作用金属物质、不同激光波长下检测的声波信号进行了频谱特性分析. 结果表明:液体中激光等离子体声波的频率分布范围为 0~150 kHz, 激光能量、金属物质与激光波长的改变对声波频率范围并没有太大的影响;小波分解后,低频 a6 级信号的能量占总能量的绝大部分,所占比例随着金属离子化能的增加而减少;信号的主要频率成分为 0~10 kHz,集中在 a6 级,峰值频率为 5 kHz.

关键词:激光技术;等离子体声波;小波分析;频谱特性

中图分类号:O434.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103912.2263

0 引言

激光诱导液态物质产生击穿的物理过程是伴随着声、光、热、机械效应等一系列现象的复杂物理过程^[1]. 当高功率激光聚焦于液体中时,若作用激光能量密度超过液体的击穿阈值,则在聚焦区域内将首先发生光学击穿^[2],随之产生高温高压等离子体,该等离子体吸收后续激光能量对外膨胀,形成初期以超音速传播的冲击波. 这一冲击波在传播了几个毫米之后,约有 65%~85%的冲击波能量就耗散到周围液体中,直至最终衰减为声波. 作为一种新的激发声波的方法,其具有能远程激发、声源级高、声脉冲窄、频谱宽等优点^[3],在水下目标探测方面有极高的时间、空间分辨率^[4],具有广泛的工程应用前景^[5].

广大学者对激光等离子体声波开展了大量的研究,在激光致声的方向性^[4]、激光声波的脉冲特性^[6]、光声能量转换效率^[7]等方面取得了大量的成果,并对等离子体声波的频率特性采用傅里叶变换进行了分析^[8]. 但是傅里叶变换只擅长处理线性问题,并不很适宜分析处理激光等离子体声波这种非平稳随机信号,而小波分析曲线含有丰富的频率信息,能够反应声波的这种瞬态特性.

本文首先利用高频响应压电陶瓷水听器 (Piezoelectric Transducer, PZT) 测量了不同激光能量、不同作用金属物质、不同激光波长下的激光等离

子体声波,然后采用小波变换对声波信号频谱特性进行了分析. 通过该研究工作,给出了液体中等离子体声波的频率分布范围、能量分布特点等,为等离子体声波的实际应用提供依据.

1 液体中激光等离子体声波测量结果

对激光与水作用产生激光等离子体声波的实验装置见图 1^[9]. 其中 Nd:YAG 脉冲激光器输出波长 1.06 μm ,脉宽 10 ns,最大能量 500 mJ 的单模激光脉冲,在同一测量点处共进行 4 次声波信号的重复测量,4 次激光脉冲能量的相对误差小于 1%. 实验时为了减小焦点附近汽泡和杂质的影响,相邻两次激光脉冲的时间间隔大于 10 s.

激光与水下物质作用产生激光等离子体的装置,与图 1 基本相同,只是在焦点位置放置不同的作用物质.

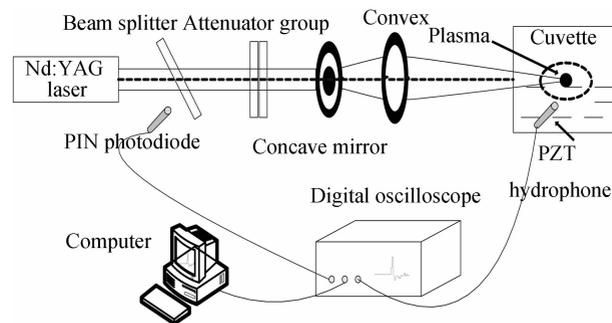


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

图 2 为液体中,激光与水作用典型的声波信号,其中作用激光能量为 350 mJ,水听器距焦点 2 mm. 图中第一个峰对应等离子体产生与膨胀过程中辐射

*湖北省自然科学基金(2009CDZ017)资助

Tel:029-88204271

Email:lsy929@163.com

收稿日期:2010-03-08

修回日期:2010-04-07

的声波,纵坐标是声压信号,是将水听器输出的电信号(单位为伏特)乘上因子 $10^{-m/20}$ 转换而成的,其中 m 为水听器的灵敏度.图 3 是激光等离子体声波典型图.

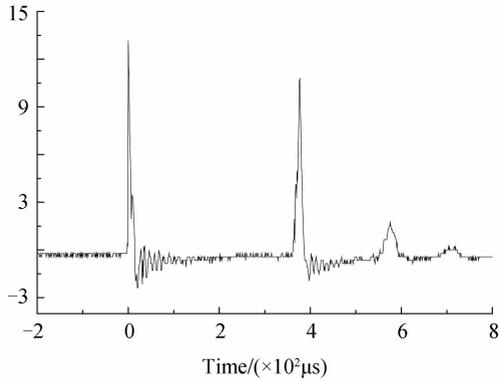


图 2 典型的声信号图形
Fig. 2 Typical signal of the sound

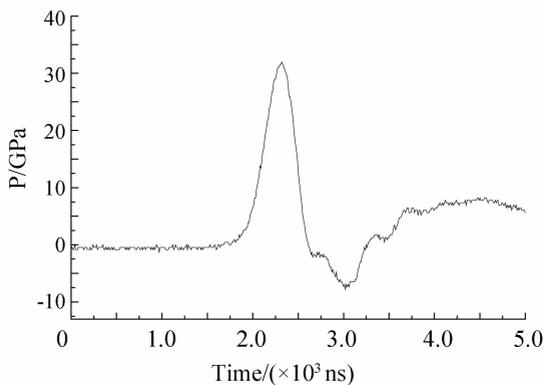


图 3 激光等离子体声波典型图
Fig. 3 Typical signal of laser-induced plasma sound waves

在实验过程中,对不同作用激光能量,不同作用金属、不同作用激光波长情况下,分别进行测试,对所得到的激光等离子体声波信号分别进行小波分析.

2 小波分析

小波分析是建立在泛函分析、Fourier 分析、样条分析及调和分析基础上的新分析处理工具,又被称为多分辨率分析.在时域和频域同时具有良好的局部化特性,常被誉为信号分析的“数学显微镜”.近 10 年来,小波分析的理论和方法在信号处理、语音分析、模式识别、数据压缩、图象处理、数字水印、量子物理等专业和领域得到了广泛的应用^[10].

小波分析在工程应用中,一个重要的问题是最优小波基的选择问题,因为用不同的小波基分析同一个问题会产生不同的结果.常用的小波包括 Haar 小波、Daubechies(dbN)小波、Mexican Hat(mexh)小波、Morlet 小波等 10 余种.其中 Daubechies 小波

是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,一般简称为 dbN, N 是小波的阶数.

dbN 小波 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\varphi(t)$ 中的支撑区为 $2N-1$, $\psi(t)$ 消失矩为 N ,除 $N=1$ 外,dbN 不具有对称性(即非线性相位),没有明确的表达式,但转换函数 h 的平方模是很明确的.

令 $P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k$, 其中, $C_k^{N-1+k} y^k$ 为二项式的系数,则有

$$|m_0(\omega)|^2 = (\cos^2 \omega/2)^N P(\sin^2 \omega/2)$$

式中, $m_0(\omega) = 1/\sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-jk\omega}$

dbN 小波具有:1)在时域上是有限支撑的, $\psi(t)$ 长度有限,而且其高阶原点矩 $\int t^p \psi(t) dt = 0$, $p=0-N$, N 值越大, $\psi(t)$ 的长度就越长;2)在频域上 $\psi(t)$ 在 $\omega=0$ 处有 N 阶零点;3) $\psi(t)$ 和其整数位移正交归一,即 $\int \psi(t) \psi(t-k) dt = \delta_k$;4)小波函数可由尺度函数求出来.尺度函数为低通函数,长度有限,支撑域在 $f=0-(2N-1)$ 范围内. $\psi(t)$ 是 $\varphi(2t)$ 的位移加权和

$$\psi(t) = \sum g_k \varphi(2t-k)$$

式中 k 值为 $2 \sim (2N-1)$, N 值不同,权值 g_k 也不同.

3 小波变换对激光等离子体声波分析结果

由于激光等离子体辐射的声波信号的频带很宽,频率组成相当丰富,故利用小波变换对声波信号进行频谱分析.通过把声信号分解到不同的频率通道,可以获取在不同的频带上被分析信号中的不同频率成分的特征.本文采用 db5 小波基对不同作用激光能量,不同作用金属以及不同激光波长情况下的声信号试验数据进行 6 级小波分解,得到各典型信号的频谱图,频谱图中为每个分解尺度对应的频谱信息,图中标注的 a 和 d 分别表示经过小波分解后得到的低频信号和低频信号, a 和 d 后面的数字表示小波分解的级数.

3.1 改变作用激光能量

使入射激光波长为 1 064 nm,能量分别为 100 mJ、140 mJ、180 mJ、220 mJ、260 mJ、300 mJ,在不同能量下得到的激光等离子体声波信号进行小波分析,得到典型信号的频谱图,图 4(a)是能量为 100 mJ 时的频谱图,图 4(b)是能量为 300 mJ 时的频谱图,各级能量占总能量的比例如表 1.

通过对不同激光能量产生的声波频谱图与能量比例表分析,不同激光能量时,激光等离子体声波频谱分布基本相同,主要频带集中在 $0 \sim 150$ kHz 范

表 1 不同激光能量下声波信号小波变换后各级所占能量的比例
Table 1 Energy ratio of wavelet transfer for sound wave signal by different laser energy

Laser energy/ mJ	Proportion of the whole energy/(%)						
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	a_6
100	0.3	1.4	8.7	11.6	14.5	20.2	43.4
140	0.1	2.1	8.5	10.6	10.6	21.2	46.7
180	0.08	2.1	8.5	10.6	10.6	21.2	46.7
220	1.2	1.5	7.6	7.6	10.6	15.1	57.5
260	0.1	1.3	6.4	6.4	12.8	19.2	48.7
300	0.04	3.3	5.5	5.5	11.0	22.0	52.7

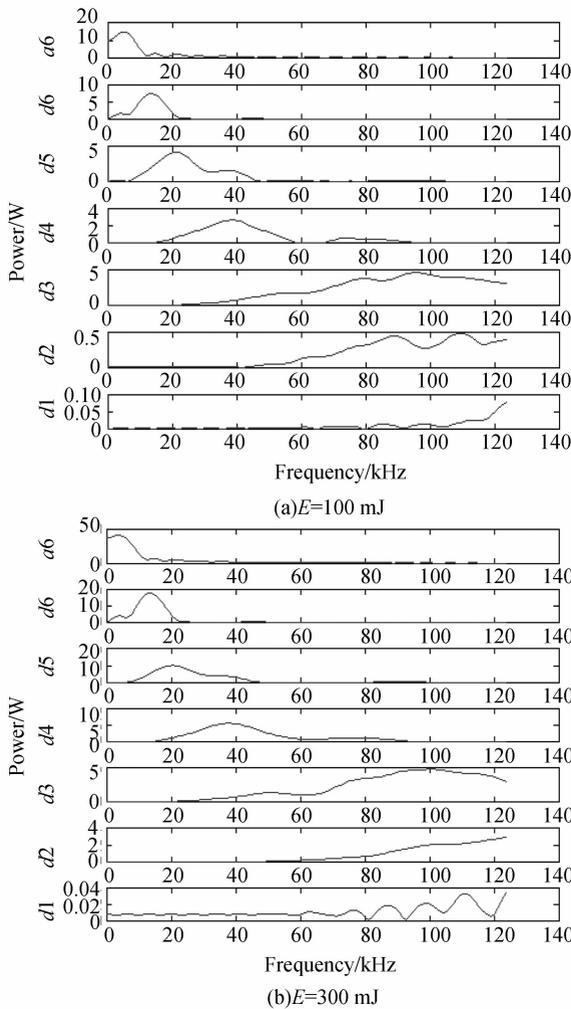


图 4 声波信号小波变换后的各段频谱($E=100$ mJ, $E=300$ mJ)
Fig. 4 Plasma sound wave, wavelet transfer results and all spectra of 100 mJ and 300 mJ

围,激光能量改变主要是影响到了信号的幅度,幅度随着激光能量的增强而增大,激光能量对整个频率范围影响不大;经小波分解表明,激光等离子体声波能量主要集中在低频段的 a_6 级,该级占总能量的绝大部分,其余各级能量所占比重,按 d_6 级到 d_1 级依次减少; a_6 级是整个激光等离子体声波信号的主要频率成分集中的部分,主要频率成分在 $0 \sim 10$ kHz,其峰值频率在 5 kHz 左右,频率范围与频率峰值并没有随着能量的改变而发生改变;其余各

级的频率范围与峰值频率也不受激光能量的影响,分布基本相同, d_6 级到 d_4 的峰值频率依次为 15 kHz、20 kHz、40 kHz、100 kHz.

3.2 改变作用金属固壁面

在作用激光波长为 1 064 nm,作用能量保持在 300 mJ 的条件下,改变作用金属分别为 Al、Cu、Fe,对激光等离子体声波信号进行小波变换,各典型信号的频谱图如图 5,各级能量占总能量的比例如表 2.

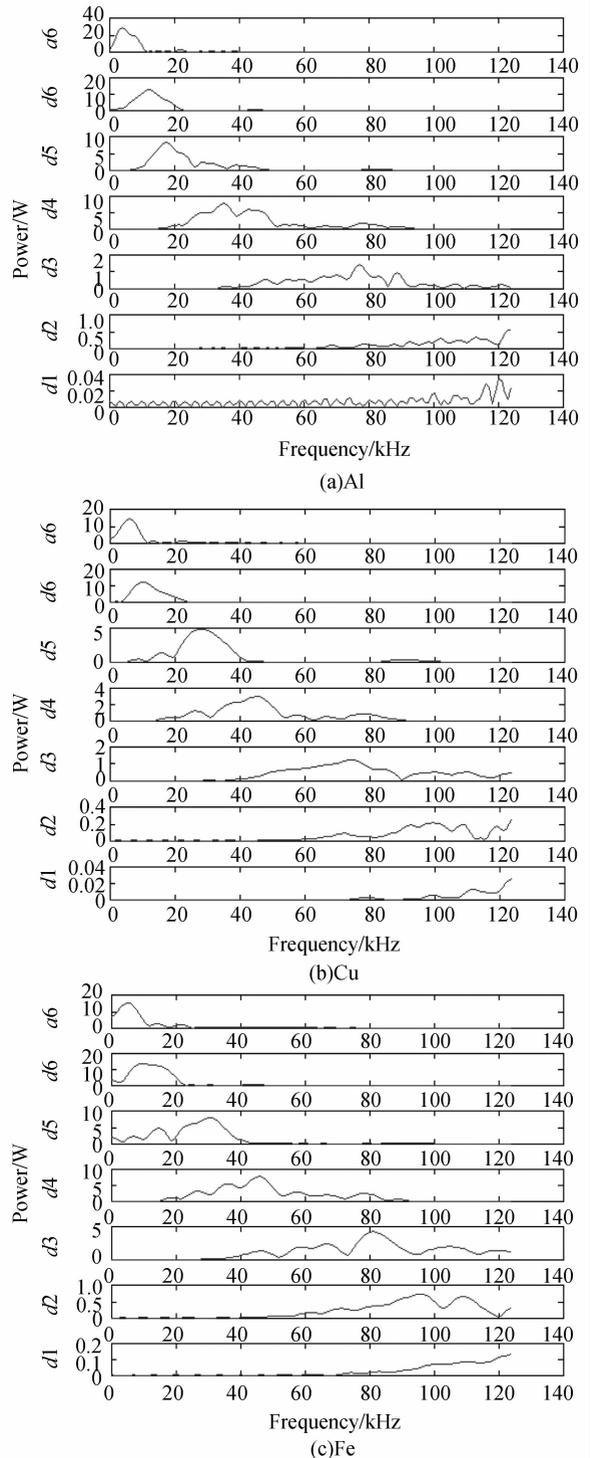


图 5 声波信号小波变换后的各段频谱(Al、Cu 和 Fe)
Fig. 5 Plasma sound wave, wavelet transfer results and all spectra of Al, Cu and Fe

表2 不同金属固壁面下声波信号小波变换后各级所占能量比例

Metal	Proportion of the whole energy/(%)						
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	a6
Al	0.07	0.9	2.7	12.8	12.8	17.8	53.5
Cu	0.06	0.6	2.9	8.8	14.6	29.2	43.8
Fe	0.2	1.6	14.3	14.3	21.2	24.5	36.8

对频谱图以及能量比例表进行分析,激光与不同金属作用产生的等离子体声波频率范围为0~150 kHz,作用金属固壁面的改变并没有影响到等离子体声波的频率范围;在各级分层的频谱图中,a6级所占的能量占总能量的绝大部分,但是Al、Cu、Fe的离化能由低到高变化^[11],导致a6级所占能量的比例逐渐减少,其频率范围为0~10 kHz左右,峰值频率为5 kHz左右;不同金属固壁面时,d6~d1级所占能量比例逐渐减少,频率分布基本相同。

3.3 改变激光波长

对作用波长为532 nm,能量为300 mJ情况下采集的激光等离子体声波信号进行小波变换,其典型信号的频谱图如图6,各级能量占总能量的比例如表3,并与作用波长1 064 nm情况下的频谱图4(b)进行比较。

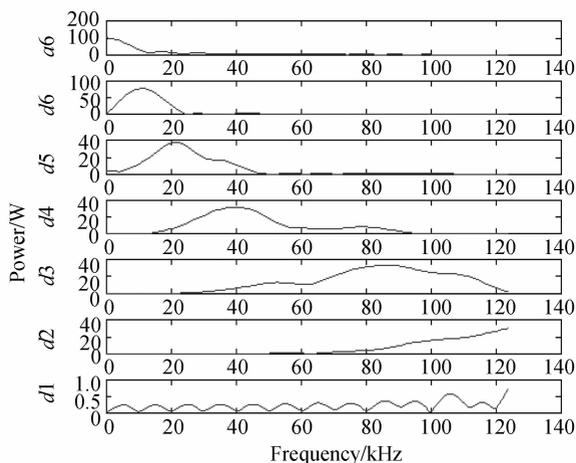


图6 声波信号小波变换后的各段频谱
($\lambda=532\text{ nm}$, $E=300\text{ mJ}$)

Fig. 6 Plasma sound wave, wavelet transfer results and all spectra of 532 nm

由于532 nm激光相对于1 064 nm激光,在水下穿透性比较好,532 nm激光光声转换效率比较高,图6中小波变换后的各级幅度明显高于图4(b)中的幅度。但是,波长的改变,对水下激光等离子体声波的频率分布并没有明显的影响,仍为0~150 kHz;能量主要集中在a6级,频率范围为0~10 kHz,峰值频率5 kHz左右;d6~d1级能量比例逐级减少。

表3 不同作用波长下声波信号小波变换后各级所占能量比例

Wave length /nm	Proportion of the whole energy/(%)						
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	a6
532	0.3	8.1	9.8	9.8	13.1	26.1	32.7
1064	0.0	3.3	5.5	5.5	11.0	22.0	52.7

4 结论

本文采用PZT对水下激光等离子体声波进行了实验研究.利用小波变换对不同激光能量、不同作用金属物质、不同波长下检测的激光等离子体声波信号各级频谱特性进行了分析.结果表明:激光能量、金属物质与波长的改变对液体中激光等离子体声波的频率分布范围并没有太大的影响,主要频率集中在0~150 kHz范围内;激光等离子体声波能量主要集中在a6级,表明激光等离子体声波主要为低频信号,频率范围为0~10 kHz左右,峰值频率5 kHz左右;激光与不同金属物质作用产生激光等离子体声波时,a6级所占能量比重随着金属离化能的增大而减少;532 nm激光由于水下穿透性优于1064 nm激光,所以其光声转换效率高,产生等离子体声波幅度高.以上研究结果有助于建立液体中光击穿条件下激光等离子体声波信号的物理模型,为激光等离子体声波的广泛应用奠定基础。

参考文献

- [1] LYAMSHEY L M. 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] SCHAFFER C B, NASHIMURA N, GLEZER E N, et al. Dynamics of femtosecond laser-induced breakdown in water from femtoseconds to microseconds[J]. *Opt Express*, 2002, **10**(3): 196-203.
- [3] TIAN Zuo-xi, GENG Song, LIU Yan-qiong, et al. Laser induced sound in water [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*. 2004, **41**(11): 15-19.
田作喜,耿松,刘彦琼,等.激光引发水下声波[J],激光与光电子学进展,2004, **41**(11): 15-19.
- [4] YU Yang, WANG Jiang-an, JIANG Xing-zhou. The study of theory of directivity of laser-induced sound radiating field in water[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(1): 26-28.
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): 26-28.
- [5] QI Yi-rang, ZHANG De-yong, XU Long-jiang. Ultrasonic pulse excited by laser in liquid[J]. *Nature Magazine*, 2003, **25**(2): 63-70.
戚怡让,张德勇,许龙江.液体中的激光超声脉冲[J].自然杂志,2003, **25**(2): 63-70.
- [6] LI Jin-song, LIU Kun, ZHANG Wei-jun, et al. The influence of CO₂ molecular relaxation dynamics on photoacoustic signal in near infrared (NIR) range [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(9): 1953-1957.
李劲松,刘锬,张为俊,等.近红外波段CO₂分子弛豫动力学效应对光声信号的影响[J].光谱学与光谱分析,2008, **28**(9):

- 1953-1957.
- [7] CHEN Qing-ming, CHENG Zu-hai, ZHU Hai-hong. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulse laser in water[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(3):341-344. 陈清明,程祖海,朱海红. 脉冲激光在水中激发声脉冲的光声能量转换效率[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):341-344.
- [8] CHEN Qing-ming. Characteristics of photoacoustics induced by pulse laser in liquid[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(3):28-31. 陈清明. 脉冲激光在液体中激发的声波特性研究[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(3):28-31.
- [9] LI Sheng-yong, ZHU Qiang-hua, ZHAO Rui, *et al.* The study on properties of laser-induced cavitation bubble sound waves in viscous fluid[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2082-2086. 李胜勇,朱强华,赵瑞,等. 粘性液体中激光空泡辐射声波的特性研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8):2082-2086.
- [10] ZHANG Jian-sheng, LIN Shu-yu, MIAO Run-cai, *et al.* Wavelet analysis on managing of scattered optical semaphore from bubble films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 557-564. 张建生,林书玉,苗润才,等. 小波分析在气泡幕散射光信号处理中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3):557-564.
- [11] JI Yun-ying, Tong Chao-xia, BIAN Bao-min, *et al.* Effect of target material on electrical potential signals of targets induced by laser plasma[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7):1301-1304. 纪运景,童朝霞,卞保民,等. 靶材对激光等离子体诱导靶上电势信号的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7):1301-1304.

Properties Investigation of Laser-induced Plasma Sound Waves in Liquids

LI Sheng-yong¹, RAO De-hu¹, SHEN Zhong-hua², NI Xiao-wu²

(1 College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(2 Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: By the piezoelectric transducer hydrophone, laser-induced plasma sound waves in liquids were measured through experiments. Wavelet transform was applied to analyze the spectra characteristics of these signals acquired at different laser energy, different metal solid boundary and different laser wavelength. The results show that laser-induced plasma sound waves frequency range is 0~150 kHz, and changes of the laser energy, the metal boundary underwater and the laser wavelength have little effect on distribution of frequency of waves. Most energy of plasma sound waves is concentrated at the *a6* level, and the proportion of the whole energy decreases with the increase of ionization energy of metal. The main frequency of sound waves is within 0~10 kHz, and the frequency peak is 5 kHz.

Key words: Laser technique; Laser-induced plasma sound waves underwater; Wavelet analysis; Spectrum characteristics



LI Sheng-yong was born in 1976, and received the M. S. degree from Naval University of Engineering in 2007. Now he works as a lecturer and his research interests focus on interaction of photoelectricity countmeasure.