

# 利用声致发光成像技术的液体中超声场 动态分布的实时测量方法\*

丁春峰 邢 达

(华南师范大学激光生命研究所 广州 510631)

2002 年 11 月 4 日收到

2003 年 9 月 30 日定稿

**摘要** 根据超声空化原理,运用声致发光成像技术测量超声在液体中的动态分布。利用高灵敏度的 ICCD 成像系统记录水在超声作用下的声致发光图像,并且分析了声致发光的分布和强度与作用超声的关系。结果表明,超声作用下的发光图像能够反映该作用超声在水中的分布情况,从而提出利用声致发光成像技术测量液体中超声场的分布是一种动态测量声场强度的新方法。

PACS 数: 43.35, 43.85

## Real time measurement method of ultrasound field dynamic distribution in liquid with sonoluminescence imaging technology

DING Chunfeng XING Da

(Institute of Laser Life Science, South China Normal University Guangzhou 510631)

Received Nov. 4, 2002

Revised Sept. 30, 2003

**Abstract** A sonoluminescence(SL) imaging method based on ultrasonic cavitation is employed to determine the distributing intensity of ultrasound in liquid. A high-sensitive ICCD imaging system was used to record the SL image resulted from ultrasonic cavitation. The relationship between the SL intensity and ultrasonic intensity was studied. The results show that the SL image can reflect the distribution of ultrasound, accordingly, the SL imaging can be considered a method to measure the intensity of ultrasound dynamically.

### 引言

声致发光(sonoluminescence)是液体介质在超声空化作用下产生的一种弱光发射,自1934年 Frenzel<sup>[1]</sup>等发现声致发光现象以后,人们就对其发光机制进行了深入的研究<sup>[2-5]</sup>,研究表明,空化气泡在崩塌的瞬间产生的高温、高压是声致发光产生的原因。气泡内产生的高温高压与超声压强、频率、液体温度、气泡内气体的含量以及气体的性质等条件有关,当这些条件改变时,声致发光强度就会发生显著的变化。超声强度的大小对声致发光能够产生很大的影响, Hntanka 等人<sup>[6]</sup>发现:当超声强度改变时,液体中声致发光的区域面积会改变,发光的强度也会随之改变。因此液体中各处发光强度的不同反映了超声在各处分布的不同。

本文的目的就是找出这种发光强度随超声强度的变化关系,利用高灵敏度的 ICCD 成像系统记录液体中各处的声致发光强度,通过发光强度来反映液体中各处的声场强度。

## 1 成像装置及成像原理

### 1.1 增强型 ICCD 成像系统

图1是 ICCD 图像探测系统原理图,整套装置放置在暗室里,样品室内部涂黑,反应池放在三维可调架上。光电探测系统是以微通道板像增强器为核心的超高灵敏度的成像系统。该系统是由变焦物镜、微通道板像增强器、中继镜(相对孔径 1:1.4)、CCD 探测系统、控制器以及计算机组成。其中,照像镜头选

\* 国家重大基础研究前期专项(2002CCC00400)和广东省自然科学基金团队(015012)资助项目

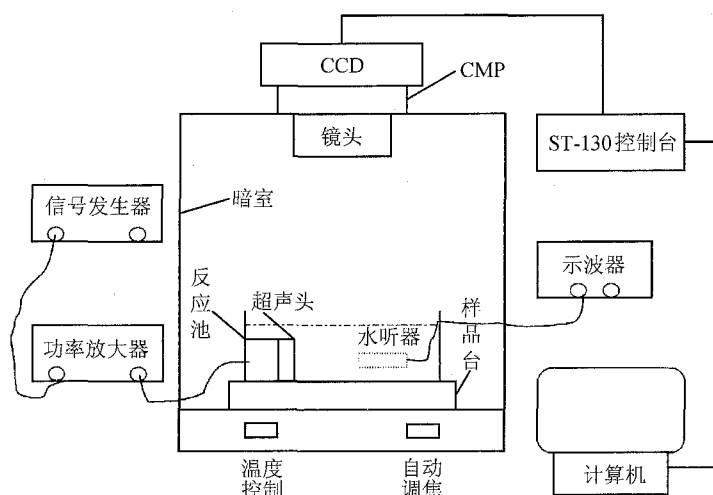


图 1

用适用于弱光拍摄的 Nikon 公司制造的大数值孔镜头 (50 mm, f/1.8 型), 探测器选用美国 Princeton Instruments 公司制造的 ICCD-576-S/1(增强型 CCD), 模数转换器选用美国 Princeton Instruments 公司制造的 ST-130 型控制器, 计算机选用 Intel 公司的 Pentium III 微机, 数据处理软件选用 WINVIEW。

### 1.2 ICCD 成像原理

待测超声对水空化产生的发光经变焦物镜成像在微通道板像增强器的光阴极上。光阴极的光敏波长在 330~930 nm 范围内, 透过输入窗口在像增强器光阴极上的光子由于光电效应转换成电子图像。电子透镜将电子图像藕合到微通道板上, 在像增强器微通道板的每一个光纤通道内, 电子经过不断地撞击, 每个入射电子便会产生大约 100 个电子, 并保持图像的空间分布信息不丢失。从微通道板出射的电子撞击荧光屏, 重新激发出光子图像, 再经中继镜投射到 CCD 上。数据经控制器采集到计算机里, 再由计算机进行处理。

### 1.3 超声场的产生

超声发生组件由信号发生器、功率放大器和超声头组成。其中, 信号发生器选用美国 Tektronics 公司生产的 AFG320 信号发生器, 功率放大器选用英国 ENI 公司产的 2100L 变频功率放大器, 超声头由广州明珠超声仪器公司生产的换能器加工而成。反应池为  $30 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  的玻璃器皿, 反应池里装有蒸馏水, 水位要求能浸没超声头, 由信号发生器发出的正弦信号经功率放大器放大后加到超声头的压电陶瓷晶片上。陶瓷晶片将电信号转换成超声波。

## 2 实验结果与分析

实验中选用信号发生器发出的频率为 500 kHz、

幅度为 4.2 V 的正弦信号, 经功率放大器放大 31 倍后驱动超声头。超声从左向右发射, 对进行空化作用产生发光信号, 经过 ICCD 成像探测系统得到水在超声作用下的发光图像, 如图 2 所示。图中一个个明亮的圆斑是由超声在玻璃池中形成的驻波场产生的。图像采集时间为 5 s。

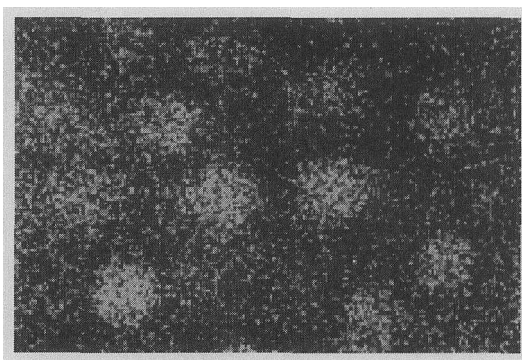


图 2 频率为 500 kHz、幅度为 4.2 V 的正弦信号驱动超声, 放大 31 倍后产生的发光图像

为了寻找声致发光的强度和声压的关系, 将水听器置于水中超声场某点处 ( $z$  轴上距声源中心 10 cm), 逐步改变输入信号的大小, 每改变一次, 用 ICCD 记录该点的发光, 同时用水听器记录该点的相对声压。得到发光强度、水中相对声压随输入信号变化的关系曲线, 如图 3 和图 4 所示。

实验中所使用的超声源是一个共振频率为 500 kHz 圆形活塞式声源, 它实际上相当于一种平面状的振子, 当它沿平面的法线方向振动时, 其面上各点的振动速度、幅值和位相都是相同的, 在声场中离中心距离为  $r$ 、与中心连线与  $z$  轴夹角为  $\theta$  的场点的声压  $p$  可由公式<sup>[7]</sup>

$$p = j\omega \frac{\rho u_0 a^2}{2r} \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

计算获得, 其中,  $a$  为圆形活塞源的半径,  $\omega$  为驱动超声的角频率,  $\rho$  为液体的密度。对于实验中所使用的超声源, 其直径  $d = 5$  cm, 频率  $f = 500$  kHz, 在输入正弦信号幅度为 3.4 V 时, 根据公式 (1), 距超声源中心 10 cm 的  $z$  轴上的点  $P$  的声压约为  $2.95 \times 10^5$  Pa, 与直接用水听器在该点测得的相对声压基本一致 ( $z$  轴上 10 cm 处水听器测得的相对声压为 3.015 V, 换算成声压为  $2.942 \times 10^5$  Pa)。与之相对应的发光强度约为 895 counts, 可见, 声致发光强度能够和理论计算所得的声场强度很好地对应。由于圆形活塞声源是一种常用的非聚焦超声源, 该声源的特点是: 近声源处声场起伏大, 远场区声压逐渐减小, 声压随侧向距离变化也有起伏, 除声轴上有最大值外, 还有旁瓣。所以超声波在水中传播时, 随着传播距离的增加, 传播范围的扩大, 其强度也将逐渐减弱, 不同位置的超声强度的分布不相同。当声压超过某一定值能够产生声致发光时, 在一定范围内发光强度随着声压的增加而增加<sup>[6,8]</sup>, 所以, 在超声作用下, 水中不同位置的发光强度也不相同。

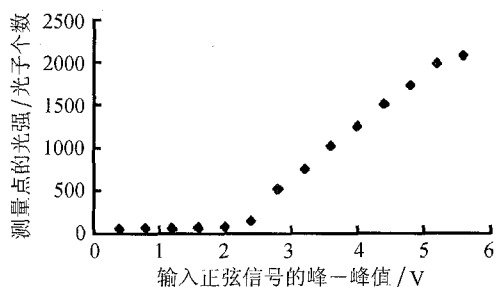


图 3 测量点的发光强度随输入信号变化关系曲线

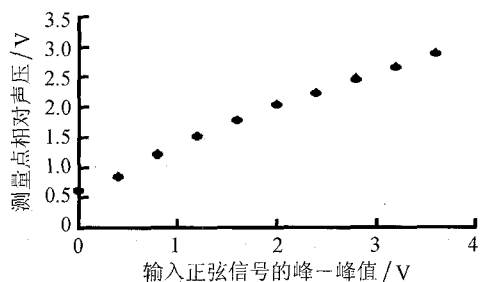


图 4 测量点的相对声压随输入信号变化关系曲线

图 2 中所显示的一个个圆形光斑正是由该超声头发出的超声的一个个驻波节点及旁瓣产生的。这些光斑的发光强度很不均匀, 靠近超声头的发光较强, 离超声头越远, 发光就越弱; 超声换能片轴线上的发光较强, 随着半径的增加, 发光越来越弱, 这些发光点很好地反映出了相应位置处声场的强弱。图 3 和图 4 分别反映的是发光强度、相对声压和输入信号的关系。从图 3 可以看出, 输入信号幅度达到某一值后, 发光强度随着输入信号的增加近似线性地增加。而图 4 则反映出发光点处的相对声压与输入信

号也存在着近似的线性关系。结合图 3 和图 4 可以得出这样的结论: 可以用水中某点发光的强弱来表示该点超声的强弱。

改变信号发生器输出的正弦信号的幅度, 超声的强度相应地要跟着改变, 整个声场形成的声致发光现象也会随之改变, 如图 5 所示。

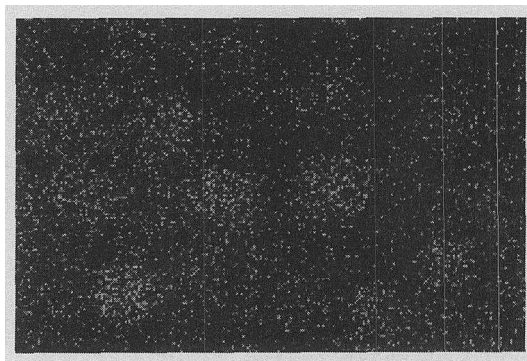


图 5 输出幅度为 3.8 V, 功率放大 28 倍的正弦信号驱动超声头产生的发光图像

与图 2 相比可以看出, 图 5 中的发光强度和范围明显地减小。其原因在于: 超声头输出功率的减小, 使超声强度变小, 相应的发光信号要变弱, 并且水中某些地方的超声强度已经低于水的空化阈值, 所以这些地方已经没有光信号产生。

经过以上的分析可知, 超声强度超过水的空化阈值以后, 声致发光强度与声压呈近似的线性关系, 超声的微小改变就会导致与之对应的发光图像的改变。因此用声致发光图像可以很灵敏地反映水中作用超声的强弱和分布范围。为验证此方法的正确性, 我们选用一已知共振频率为 207.7 kHz, 水中焦距为 2.31 cm 的环形聚焦超声源为待测超声源, 经理论计算其焦斑的轴向 3 dB 宽 2.11 cm, 侧向 3 dB 宽 0.48 cm, 在输入信号幅度为 3.8 V 的条件下对水溶液进行空化实验, 得到如图 6 所示的图像, 结果发现,

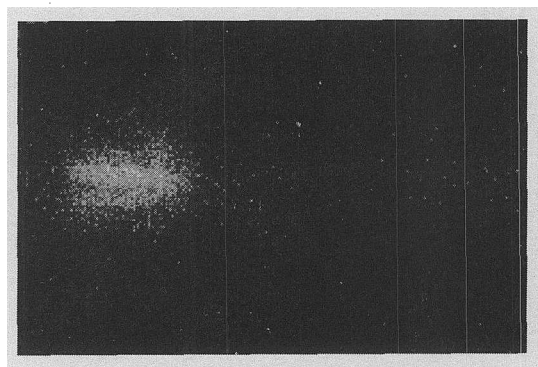


图 6 已知共振频率为 207.7 kHz, 水中焦距为 2.35 cm, 轴向 3 dB 宽 2.15 cm, 侧向 3 dB 宽 0.5 cm 的环形聚焦超声源的发光图像, 输入信号幅度: 3.8 V

实验中测得的焦距和图像中焦斑的大小与理论计算所得值基本吻合。

### 3 讨论

在某一固定频率条件下,液体中的声压只有超过声致发光阈值声压时,液体中才会出现发光现象。Gaitan 等<sup>[9]</sup>在研究单泡声致发光时指出:声致发光的驱动声压存在下限和上限,只有当声压在该上下限范围内时,液体中才会出现发光。但是由于多泡声致发光的机理<sup>[10,11]</sup>与单泡声致发光<sup>[12,13]</sup>不同,它只有一个下限阈值,只要液体中的某点声压超过该阈值,该点就能产生发光,并且声压越大,发光越强,液体中发光的范围也越大。多泡声致发光与超声的声压是一种正相关的关系,所以可以用多泡声致发光的强弱来反映声场的强弱。

超声的频率不同,其声致发光阈值也不相同。研究发现:频率越高,声致发光的阈值也随之升高。并且,由于声信号在一个振动周期内就能产生一次发光,所以在单位时间内,不同频率的超声产生的发光次数也不同,因此,即使是在同一声压条件下不同的超声频率发光强度也不相同<sup>[14,15]</sup>。所以不同频率条件下的超声具有不同的光强~声压关系曲线。

CCD 探测器的灵敏度也是影响测量结果的一个重要因素,灵敏度越高,测量的结果越精确。实验时采用高灵敏度的 ICCD 成像系统,发现当水中一点的声压每增加  $0.02 \times 10^5$  Pa 时,测得的发光强度平均能增加 100 counts 左右,此时已经能够明显地看到发光图像的改变。因此利用声致发光图像来测量液体中超声强度时,至少能够精确到  $0.02 \times 10^5$  Pa。如果采用更高灵敏度的 CCD,则测量的精确度会进一步提高。

### 4 结论

本文提出了一种利用声致发光成像技术测量液体中超声分布的方法,并设计了一套用该方法测量液体中超声分布的实验装置,用该方法测得的液体中某一点的超声强度与计算理论计算所得的强度基

本相同。通过实验验证了该方法的可行性,并讨论了该方法的测量条件。和其他测量方法相比<sup>[16]</sup>,利用声致发光成像技术测量液体中的超声分布具有更直观、更形象的优点,并且能从整体上实时地描述超声场的分布。因此,在超声的测量和应用中将起到很大的作用。

### 参 考 文 献

- 1 Frenzel H, Schultes H. Lumineszenz Imultraschallbeschickten Wasser. *Z. Phy. Chem. Abt. B*, 1934; **27B**: 421—424
- 2 Crum L A, Sonoluminescence. *Physics Today*, 1994; **47**(9): 22—29
- 3 Hilgenfeldt S, Grossmann S, Lohse D. Sonoluminescence light emission. *J. Fluids*, 1999b; **11**(6): 1318—1330
- 4 安 宇, 周铁英. 声致发光气泡内的气体热力学性质. *声学学报*, 2000; **25**(2): 103—107
- 5 钱梦霖, 程 茜, 葛曹燕. 单泡声致发光中气泡的动力学特性一振子模型. *声学学报*, 2002; **27**(4): 289—294
- 6 Hntanka S, Yasui K, Tuziuti T, Mitome H. Difference in, threshold between sono- and sonochemical luminescence. *Jpn. J. Appl. phys*, 2000; **39**(5B): 2962—2966
- 7 钱盛友. 生物医学中声光技术结合及光热、光声效应的研究. 华南师范大学, 2001: 6—8
- 8 Bradley P *et al.* Defining the Unknowns of Sonoluminescence. *Physics Reports*, 1997; **281**(2): 65—143
- 9 Gatian *et al.* Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble, *Acoust. Soc. Am*, 1992; **91**(6): 3166—3183
- 10 Suslick K S. Sonochemistry. *Science*, 1990; **247**(23): 1439—1445
- 11 McNamara W B, III, Didenko Y T, Suslick K S. Sonoluminescence temperatures during multi-bubble cavitation. *Nature*(London), 1999; **401**(21): 772—775
- 12 Hammer D, Frommhold L. Spectra of sonoluminescent rare-gas bubbles. *Phys. Rev. Lett.*, 2000b; **85**(6): 1326—1329
- 13 Hammer D, Frommhold L. Sonoluminescence: how bubbles glow. *J. Mod. Opt.*, 2001; **48**(2): 239—277
- 14 Sponer J. Dependence of ultrasonic cavitation threshold on the ultrasonic frequency. *Czech J Phys B*, 1990; **40**(3): 1123—1132
- 15 Beckett M A, Inez Hua\*. Impact of ultrasonic frequency on aqueous sonoluminescence and sonochemistry. *J. Phys. Chem. A*, 2001; **105**(15): 3796—3802
- 16 冯 若, 李化茂. 声化学及其应用. 安徽: 安徽科学技术出版社, 1992: 100—120