

浅谈磷酸中声致发光测量实验装置

买买提吐送·买买提明

(新疆和田地区教育学院, 新疆和田 848000)

摘要: 简单地介绍了声致发光现象以及研究这一现象的意义。在此基础上详细地介绍了液体中实现声致发光的实验装置及其工作原理, 以及声致发光光强测量装置。较为详细地叙述了信号发生器、功率放大器、可调电感、谐振腔(压电换能器)、磁力搅拌器、数字电压表、光电倍增管及数字示波器等部件在实验中的功能和作用、具体操作方法和实验步骤。根据测量得到的实验数据总结了影响声致发光现象的主要因素, 即实验环境温度、驱动声压信号频率及驱动声压大小等等。对实验过程中遇到的一些问题给出解决方案, 并提出了改善实验仪器的建议。

关键词: 声致发光实验装置; 光强测量装置; 压电换能器; 光电倍增管; 数字存储示波器

中图分类号: O426.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-04-0268-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.04.002

An experimental apparatus for sonoluminescence in phosphoric acid

MAIMAITITUSONG Maimai-timing

(Hetian Institute of Education, Hetian 848000, Xinjiang, China)

Abstract: The phenomena of sonoluminescence and the significance of studying this subject is introduced in this paper. In addition, the apparatus for observing sonoluminescence in liquid, its working principle, and the equipment for detecting the light intensity of sonoluminescence are explained. Also, the functions, the operation methods and the testing procedures for all devices in the experiment including signal generator, power amplifier, adjustable inductance, resonant chamber, magnetic stirrer, digital voltmeter, photomultiplier tube and digital storage oscilloscope, are described. According to the data measured, the primary factors affecting the sonoluminescence, such as the ambient temperature, the frequency of driving acoustic wave and the amplitude of the driving acoustic pressure are discussed. At the end, the solution to the problem one might meet in the operation processes and suggestion for improving the experimental devices are presented.

key words: apparatus of sonoluminescence; measurement equipment for light intensity; piezoelectric transducer; photomultiplier tube; digital storage oscilloscope

0 引言

声致发光是指将声场能量转化为光能量的一种物理现象。超声波在液体中传播时, 液体中的压力随着声波而起伏变化, 当液体中的声压超过一定的阈值, 液体中就会产生大量的气泡, 这个现象被称为声空化(cavitation), 这些气泡称为空化气泡。继续加大声压, 这些气泡就会发光, 这就是声致发光^[1-3]。由于空化过程过于复杂, 所以研究进展缓慢, 直到单气泡声致发光现象的发现和认识, 人们对空化现象的本质才有了真正的了解和认识^[4]。

声致发光原指利用声学方法实现液体中气泡

的发光现象, 也泛指用流体动力学和其他方法在液体中产生气泡的发光现象。

声致发光最主要的特征是它具有极高的能量汇聚度。在从机械能转变为光能的过程中能量密度可达到 10^{11} 倍的聚积。一些理论和实验研究表明, 气泡内部达到 10^5K 的高温和 10^8Pa 以上的高压。因此, 声致发光气泡被认为是一种研究极端条件下物理化学过程的微型实验^[5-8]。

声致发光现象可以是单个气泡发光, 也可以是多气泡空化云发光。随着发光气泡脉动, 周围液体蒸汽进出气泡; 即在负压相时气泡生长, 蒸汽进入气泡, 正压相时气泡被压缩, 里面的蒸汽扩散出气泡。但在气泡溃灭时仍有部分蒸汽残留其中, 这些蒸汽随高温分解, 吸收大量热量, 从而影响气泡升温, 减弱气泡发光强度。一般声致发光现象可以在水中观察, 环境温度低时, 水的蒸汽压也低, 有利

收稿日期: 2012-11-07; 修回日期: 2013-02-08

作者简介: 买买提吐送·买买提明(1965—), 男, 新疆洛浦县人, 维吾尔族, 高级讲师, 研究方向为电子与电工技术。

通讯作者: 买买提吐送·买买提明, E-mail: mt.tursun@163.com

于空化气泡发光。有些液体蒸汽压远低于水，而这些液体的粘滞度常温下也很大。粘滞不利于气泡脉动，损耗声能。比如，甘油蒸汽压很低，但粘滞度太大，此两物理特征使声致发光因素此消彼长，如用一般声压驱动，是不容易观察到声致发光现象的。而有些液体比如硫酸或磷酸，其蒸汽压很低，同时粘滞度也不是很大，所以空化气泡发光强度远远大于其处于水中的情况^[4]。因此可以选择磷酸(比硫酸安全)观察声致发光现象。在磷酸中，很难实现单气泡声致发光，即使除气很久，也观察不到单个气泡发光现象。但只要驱动声压达到一定阈值，不但多气泡空化很容易发生，而且这些气泡发光也很亮。

声致发光有广泛的应用前景：利用其稳定性，可以开发一种廉价的高精度频率源；利用泡内局域高温，可以加速化学反应；利用能量高度集中的特点，可以为研究可控核聚变提供模型^[3,9]。

1 磷酸溶液声致发光实验研究装置

本文介绍的是在清华大学物理系参加“超声空化实验课题研究”时，自己动手操作的实验装置。本实验所达到的目标是对于磷酸液体中不同的声波频率、声波强度对应的发光强度图和数据保存到外部存储器，并对波形数据进行分析，为找出多气泡声致发光规律打下基础。磷酸液体声致发光光强测量研究装置由实现声致发光的实验装置和声致发光强度测量装置两部分组成的。

1.1 实现声致发光的实验装置

实现声致发光的实验需要信号源、功率放大器、谐振腔体(压电换能器)、可调电感、数字交流电压表和辅助设备磁力搅拌器，其中主要部件是信号源、谐振腔体和可调电感。图1和图2分别是实验装置电路图和光强测量实验装置示意图。

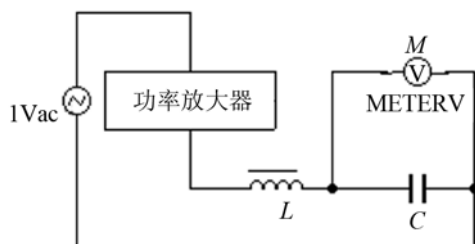


图1 实验装置电路图

Fig.1 The circuit diagram of the experimental apparatus

根据电工学原理，整个压电换能器(谐振腔体)内部等效电路主要具有电容特性(见图3)，所以信

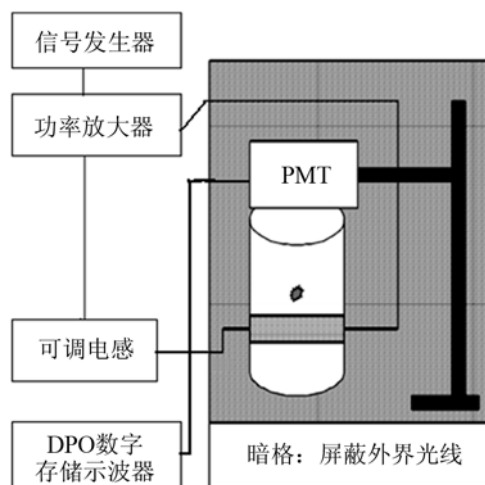


图2 光强测量实验装置示意图

Fig.2 Sketch of the apparatus for detecting light intensity

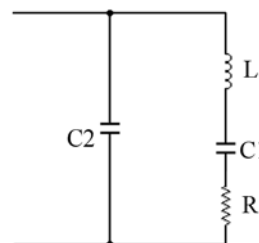


图3 换能器的等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of the transducer

号源、谐振腔体和可调电感形成RLC串联回路(见图1)。当电路出现谐振时，信号源频率 f 、谐振腔体(压电换能器)等效电容 C 与可调电感感量 L 的关系如下式所示：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

因为实验中谐振腔(压电换能器)的等效电容 C 始终是固定值，所以在一定范围内改变信号发生器的输出信号频率 f 或改变可调电感 L ，能使电路发生谐振。

实验核心器件是谐振腔体。本实验中采用压电陶瓷附着在腔体外壁的形式使得腔体发生振动，在驱动电压的作用下，PZT带动烧瓶振动，在液体中形成驻波声场。谐振时因液体中的超声波能量最大而使内部产生空化气泡，气泡会发出微光。

(1) 信号发生器：本实验使用的XD-7S型低频信号发生器产生周期性正弦驱动信号，送入功率放大器作为试验中的驱动信号源。适当调整信号发生器的“频率粗调”或“频率微调”旋钮，可改变输出信号频率，使谐振腔产生谐振。

(2) 功率放大器：HY5885A MODEL-400型功率放大器把来自信号发生器的幅度为1V左右的电信号进行功率放大，然后提供给谐振回路，以达到足够的能量去驱动压电换能器。

(3) 可变电感: 电路中使用了一个至三个缠绕的电感进行调谐, 每个电感可调范围约为 0~50mH, 电感由粗铜线绕制, 中间是可以上下旋转的钢芯。如图 4 所示。



图 4 可变电感实物图

Fig.4 Photo of the adjustable inductance

(4) 谐振腔: 本实验中所用到的谐振腔有两种, 即圆柱形玻璃谐振腔和平面形不锈钢谐振腔。如图 5 和图 6 所示。



图 5 圆柱形玻璃谐振腔实物图

Fig.5 Photo of the cylindrical glass resonant chamber



图 6 平面形不锈钢谐振腔实物图

Fig.6 Photo of the thin stainless steel resonant chamber

装在圆柱形玻璃谐振腔中的液体高度为 10 cm 左右, 可看成三维腔体; 平面形不锈钢谐振腔中的液体薄装至 3 mm 左右, 可以看成二维平面液体。在实验中分别利用两种不同谐振腔的主要目的, 就是要分析液体厚度对声致发光的影响。

两种谐振腔用的是同样的磷酸液体, 用纯度为 85% 的磷酸钠晶体(十二水磷酸钠结晶)稀释。

(5) TL 78-1 型磁力搅拌器: 工作区间为 50~1200rpm, 是个辅助设备, 其主要作用是通过旋转容器中的溶液使中间形成一个“漩涡”, 这样,

发光气泡就大量地集中在瓶子中间的漩涡尾巴上, 发光的强度就明显增强。

(6) 数字电压表: 数字电压表 SX48-ACV 在实验中并联在 PZT8 压电换能器(谐振腔)两端, 通过电压表的示数来反映电路的谐振情况, 以参考实际共振点的寻找。慢慢调节可调电感, 使电压表出现极大值, 这表明电路的匹配基本可以达到了。通过观察容器两端的电压随不同频率的变化来判断电路是否达到了共振。

1.2 声致发光光强测量装置

声致发光光强测量装置由光电倍增管、供电高压模块、稳压电源、数字存储示波器组成。光电倍增管的输出端接在数字示波器上。谐振腔发生共振时, 把空化气泡发出的微弱的光信号变成电信号, 送到示波器, 在示波器屏幕上显示对应的光信号波形图及其数据存储, 为分析声致发光现象提供实验数据。

(1) 光电倍增管 PMT(PhotoMultiplier Tube): 光电倍增管是一种能将微弱的光信号转换成可测电信号的光电转换器件。在本实验光强测量中用的是北京滨松 CR131 侧窗型光电倍增管以及 CC171 系列管座型高压模块, 它具有线性输出范围宽、功耗低的特点。

(2) 稳压电源: 主要用于为高压模块提供 5~6V 电压, 高压模块把这低电压倍压成 -110~ -1100V 的高压, 经管座并提供给 PMT 各极, 保证光电倍增管的正常工作。

(3) 数字示波器: 本实验所用的是美国泰克 (Tektronix) 公司生产的 DPO2024 型数字荧光示波器。200MHz 带宽型号。所有通道上具有 1 GS/s 的采样率与 1M 点的记录长度。面板上提供了 USB 2.0 主机端口, 可迅速简便地存储数据。

2 实验过程

按照图 1 所示, 信号发生器、功率放大器、谐振腔(压电换能器)、可调电感和数字电压表相互连接。按照图 2 所示, 把光电倍增管灯泡插入高压管座固定在支架上, 信号输出电缆连接到示波器第一通道信号输入端。

2.1 实验步骤

(1) 将 85% 的磷酸倒入在圆柱形玻璃谐振腔内, 液体总高度为 10 cm 左右, 放置在暗箱中。如果要用平面型不锈钢谐振腔, 则液体厚度为 3 mm 左右。

(2) 打开信号发生器将信号幅度调到 1V 位置、输出频率调到 20kHz 左右；打开功率放大器，使音量调节调到 100W 档位置；调整电感，当电路谐振时，可变电感两端的电压接近 1000V 左右，所以两手戴上塑料手套。若数字电压表示数很低(12V 左右)，说明电路不匹配，需要重新调试信号频率和可变电感，直至电路谐振。

(3) 达到空化条件，在黑暗中可以观察到液体内部出现发散的、带有空间分布结构的发光气泡串或气泡云。此时打开磁力搅拌器，液体随之旋转，可以观察到出现旋涡，那些发光气泡由于压力差被集中到旋涡中，形成发光的龙卷风尾，非常漂亮。图 7 是玻璃瓶圆柱型谐振腔内(液体高度 10cm)观察到发光的龙卷风尾时 PZT 两端电压随信号频率变化而变化的实验数据图。

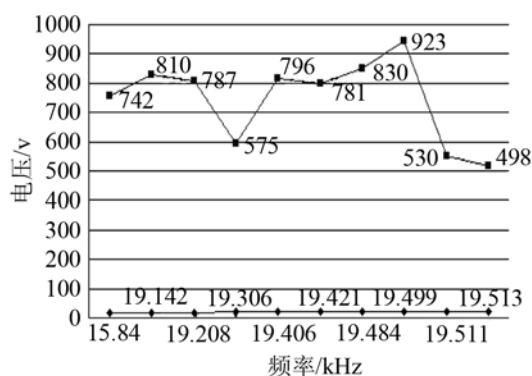


图 7 玻璃圆柱型谐振腔压电陶瓷两端电压随信号频率变化图
Fig.7 The variation of the voltage on the PZT with the input signal frequency for the cylindrical glass resonant chamber

(4) 在平面型不锈钢谐振腔内，磷酸液体薄层(液体厚度 2mm)也会出现比较强的声致发光现象。图 8 是此时 PZT 两端电压随信号频率变化而变化的实验数据图。

(5) 光电倍增管(PMT)放入暗箱内，其侧窗

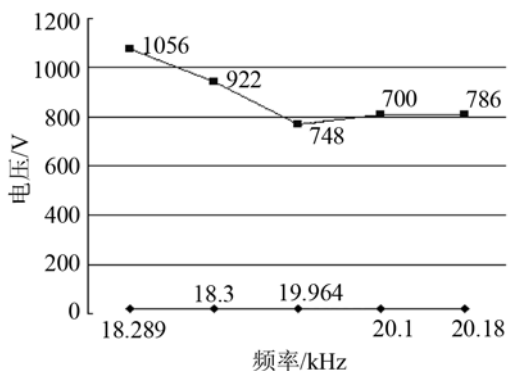


图 8 平面型不锈钢谐振腔(PZT)两端电压随信号频率变化图
Fig.8 The variation of the voltage on the PZT with the input signal frequency for the thin stainless steel resonant chamber

(PMT 的眼镜)刚好对准液体上面或液体侧面，离液

面距离越近越好。

(6) 打开数字存储示波器的电源开关；光电倍增管接到 5V 电源让它正式开始工作。打开示波器通道开关，进行输入信号简单的设置使在屏幕上显示稳定的光信号图。

(7) 将 U 盘插入示波器上的 USB 接口，捕捉波形图，执行波形数据保存操作。图 9、10 分别是在玻璃瓶型谐振腔(液体高度 10 cm)和平面型不锈钢谐振腔内磷酸液体(液体厚度 3 mm)出现比较强的声致发光现象时，示波器屏幕上对应的光强图。

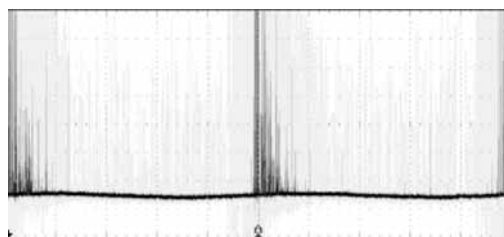


图 9 玻璃型谐振腔液体内出现声致发光时，示波器屏幕上的光强图
Fig.9 The light intensity diagram appearing on the oscilloscope screen when the sonoluminescence occurs in the cylindrical glass resonant chamber filled with phosphoric acid

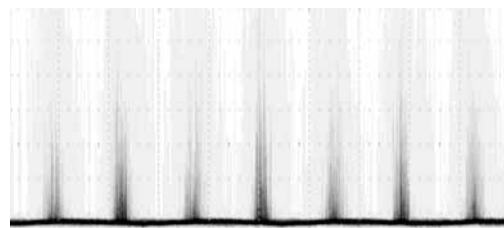


图 10 平面型不锈钢谐振腔内出现声致发光时，示波器屏幕上的光强图
Fig.10 The light intensity diagram appearing on the oscilloscope screen when the sonoluminescence occurs in the thin stainless steel resonant chamber filled with phosphoric acid

2.2 实验过程中应注意的事项

(1) 实验整个过程是产生光、观察光、测量光强的过程，所以要尽量避免外光照射。特别是光电倍增管开始工作时，外界光线绝不能影响它，否则严重影响测量数据的准确性。所以实验应始终在暗室、温度比较低的环境里进行。

(2) 从图 7 和 8 可以看出，电路开始谐振时，电压的变化对频率很敏感。这时应对电感或信号频率进行微调。

(3) 进行光强度测量时，为避免信号发生器的电信号直接进入示波器对光所示信号进行干扰，光电倍增管的光信号输入线应使用屏蔽线，并与示波器外壳一起严格地接地。

2.3 建议

(1) 电路刚开始谐振时，可调电感两端电压较高、电流较大，会引起发热和震动。这时不能直接

用手调电感,对电感的微调带来很大的不便;有时震动引起电感量的变化会严重影响实验的稳定性。操作经验发现电感可调范围较小,有时需要把两、三个可调电感串联接入。所以需要配备安全、稳定性好、可调范围较大的电感。

(2) 实验过程发现,不能把 PZT 重复擦洗,也不能长时间浸入水内,否则 PZT 外皮容易脱落,导致电容量减少,影响超声发射强度。

(3) 从图 9 和图 10 可以看出, DPO2024 型示波器虽然数据存入、取出很方便,但是它的带宽、速度还不能满足声致发光信号波形显示的要求。实验过程中波形图始终带有影子。其代替仪器为带宽为 500MHz、模拟通道取样速率高达 4GS/s 的 DSO LT372 型数字示波器,适当进行调整,可完全消除波形中的影子。

3 结 论

声致发光对于实验参数有着强烈的依赖性,包括驱动声压、频率、环境温度、液体中惰性气体含量等。本实验主要涉及驱动声压、频率、环境温度这三个要素。

(1) 驱动声压:从图 7 和 8 可以看出,声致发光对于驱动声压的变化是十分敏感的。一般情况下,声致发光强度随着驱动声压的增大而上升。

(2) 频率:只有合适的频率形成的驻波才能使气泡基本稳定地悬浮在液体之中,使其发光。

(3) 环境温度对于声致发光有着巨大影响,当水温从室温降至摄氏零度时,发光强度可增强百倍,低温更有利于声致发光。因此,实验中环境温度基本保持在 10℃ 左右。

参 考 文 献

[1] 杨凯. 磷酸中声致发光现象的实验研究[D]. 北京:清华大学,

2011, (S2): 1.

YANG Kai. The Experimental investigation on sonoluminescence in phosphoric acid[D]. Beijing: Department of Physics, Tsinghua University, 2011, (S2): 1.

[2] 李朝辉, 安宇. 声致发光的计算[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(2): 167-174.

LI Chaohui, AN Yu. On sonoluminescence single bubble[J]. Sci Sin Phys Mech Astron, 2009, 39(2): 343-349.

[3] 杨阳, 宗丰德. 超声驱动下激励参数对单泡空化振动的影响[J]. 力学学报, 2009, 41(1): 8-14.

YANG Yang, ZONG Fengde. Influence of exciting parameters on the vibration of single cavitation bubble driven by intensive sound[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(1): 8-14.

[4] 安宇. 空化气泡发光机理[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(4): 343-349.

AN Yu. Mechanism of cavitation bubble luminescence (in Chinese)[J]. Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41(4): 343-349.

[5] 何寿杰. 丙三醇溶液声致发光中的黑体辐射谱[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 621-624.

HE Shoujie. Blackbody radiation of cavitation luminescence from Glycerin[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 621-624.

[6] 应崇福. 新世纪内声空化声致发光的研究进展—兼论声致热核聚变和声(致)化学[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2007, 37(2): 129-136.

YING Chongfu. Sci Sin Phys Mech Astron, 2007, 37(2): 129-136.

[7] 刘岩, 孙继昌, 侯广利, 等. 应用超声空化效应多泡声致发光技术测量海水总有机碳(TOC)[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 182-184.

LIU Yan, SUN Jichang, HOU Guangli, et al. Multiple bubbles sonoluminescence technology of ultrasound cavitation effect to measure total organic carbon(TOC)in sea water[J]. Marine Evironmental Science, 2007, 26(2): 182-184.

[8] 谢志行, 陈伟中, 魏荣爵. 声致发光[J]. 物理, 1998, 27(1): 24-29. XIE Zhixing, CHEN Weizhong, WEI Rongjue. Sonoluminescence[J]. Physics, 1998, 27(1): 24-29.

[9] 袁学德. 单气泡声致发光研究[J]. 大连大学学报, 2004, 25(4): 16-18.

YUAN Xuede. Research of the phenomenon of single bubble sonoluminescence[J]. Journal of Dalian University, 2004, 25(4): 16-18.