光电倍增管在磷酸液声致发光实验中的应用

买买提吐送·买买提明†

（新疆和田地区教育学院（师范学校） 理科部 新疆和田 848000）

摘要 对不同厚度液体进行光强测量，深入探索空化气泡的运动，研究发光机理很有意义。用超声激励法在磷酸液体中实现多泡声致发光，研究不同共振频率下发光的特点。利用光电倍增管多次测量发光强度相互比较，结果是在液体厚度 10 cm、驱动频率 f = 21.061 kHz 和 f = 20.316 kHz 时，周期性较好为 50 μs，液体通过漩涡集中气泡可以使更多气泡发光；在液体厚度 3 mm、驱动频率 f = 17.91 kHz 和 f = 19 kHz 时，周期性很好为 25 μs；且光信号都较强。结论是磷酸中声致发光强度、周期与液体厚度、驱动频率密切相关。本文以磷酸液多泡声致发光实验研究为基础，从内部和外部原理来出发，详细介绍了光电倍增管在多泡声致发光光强测量中的实用，为今后研究者提供了一些经验。根据实验过程中遇到的一些实际问题提出了建议和改善意见。

关键词 多泡声致发光，光强图，CR131 型侧窗型光电倍增管，CC171 型光电倍增管管座，光电倍增管故障辨别

中图分类号：TN152+.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-310X(2013)04-0325-07

Application of photomultiplier tube in the phosphoric acid liquid sonoluminescence

MAIMAITITUSONG Maimaitiming

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

Abstract It is of great importance to measure light intensity in different thickness of liquid, explore movement of cavitation bubble and study luminous mechanism. By using ultrasonic irradiation method, sound luminescence in the phosphoric acid liquid has been achieved and its luminescence feature in different resonant frequency was studied. Using photomultiplier to measure light intensity in the phosphoric acid liquid, it was found that stronger light intensity and good cyclicity can be achieved with liquid thickness of 10cm, driver frequency between f = 21.061 kHz and f = 20.316 kHz. When thickness of liquid was 3 mm and its frequency was between f = 17.91 kHz and f = 19 kHz. Its cyclicity was 25 μs and optical signal was stronger. So conclusion is that luminescence intensity and cyclicality in phosphoric acid is closely related to its liquid's thickness and driving frequency. Based on phosphoric acid liquid multiple bubble luminescence, the application of photomultiplier in measurement of light intensity is described in detail and suggestions on its improvement are discussed in this paper.

Key words Multi-bubble sonoluminescence, Light intensity chart, CR131 type photomultiplier tube, CC171tybe photomultiplier tube, Photomultiplier fault discrimination.

2012-12-13 收稿; 2013-05-20 定稿

作者简介: 买买提吐送.买买提明 (1965-), 男(维吾尔族), 新疆洛浦县人, 理学学士, 物理专业高级讲师, 主要从事电子电工教学和研究。

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

1 引言

1934 年，人们发现了一种由声引起的发光现象一声致发光（Sonoluminescence），它是一种瞬态的、不定位的大量空化泡的爆炸发光现象，现在人们称之为多泡声致发光[1]。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研究，才逐渐对空化现象的本质有了真正的了解和认识[2]。利用泡内局域高温，可以加速化学反应；并利用它在空化泡中内爆塌缩时能量高度集中的特点，可以为研究可控核聚变提供模型[3]等等。

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。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。因此就选择磷酸（比硫酸安全）观察声致发光现象。

自从声致发光现象被发现以来，人们主要通过光强，光谱测量等手段对多泡声致发光现象进行了大量的研究[4]。光电倍增管作为较先进的微光探测器件，测量声致发光强度起着重要的作用。

光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）于 1934 年第一次研制成功，它作为弱光探测器已有 70 多年的发展历史。自 80 年代开始，光电倍增管进入了飞速发展的阶段，结构和功能不同的光电倍增管层出不穷，性能参数也不断地提高。近些年来人们使用 PMT 研究声致发光光强都是对其光强、光谱的研究，或者是对其溶液中产物的研究。陈岐岱等[5]人使用流体动力学实验方法实现声致发光，使用光电倍增管测量光强，但此法缺点是单次运行，重复性不好；何寿杰等[6]人改进的 U 形管圆锥气泡发光装置得到的声致发光强度较强，但是产生发光的装置较复杂、应用的光电倍增管价格贵，同时还未能解决光脉冲出现规律；侯广利、刘岩等[7-8]人利用 PMT 根据检测不同浓度水物质产生的声致发光强度，从而判断水样的水质；王巧霞等[9]人对鲁米诺溶液中声致发光进行了研究，但超声激励频率固定，利用光电倍增管只显示出不同功率密度下的光脉冲强度，未能体现出具体光强图；崔炜程等[4]人研究不同溶质水溶液中单泡声致发光现象时，使用 PMT 测量光强。

杨凯等[10]人研究磷酸中多泡声致发光时，使用 PMT 测量不同的发光强度。我们在这实验研究基础上更新光强测量及存储信息部件，实验研究中得到了比较强、清晰的光强度为今后的研究提供了基础。本实验研究方法具有操作简单、使用设备少、实验液体不需要与外界隔离、超声波激励频率和功率可连续调、存取光强信息比较方便等特点；特别是光电转换、数据存储部分使用了性能较强的 PMT 和 DPO 数字示波器得到了较好的光强度并提高了数据可靠性。

2 声致发光的实验研究系统与光电倍增管内外偏置电路

本实验研究主要由磷酸中实现声致发光系统和光强测量系统组成。图 1 可以看出，实现声致发光的核心器件是谐振腔体；谐振腔体具有固定电容特性，信号源、功放、可调电感及谐振腔体形成 LC 串联谐振回路。由信号源输出 20 kHz 左右的超声激励波通过功率放大器放大，经可调电感接入紧贴在圆柱形谐振腔外壁的压电换能器（PZT）的两端使得腔体发生振动，从而在液体中形成超声波的传递。回路发生谐振时，腔内液体受到的超声波能量很强就能实现声致发光。腔体下方磁力搅拌器在液体中实现机械旋转产生漩涡集中气泡，成功地克服多泡声致发光中泡分散，不稳定，观测不易的缺点，实现稳定的长时间可观测的多泡发光。光强测量系统由光电倍增管 CR131、光电倍增管供电高压电源 CC171（简称 PMT 管座（CC171 型）），稳压电源

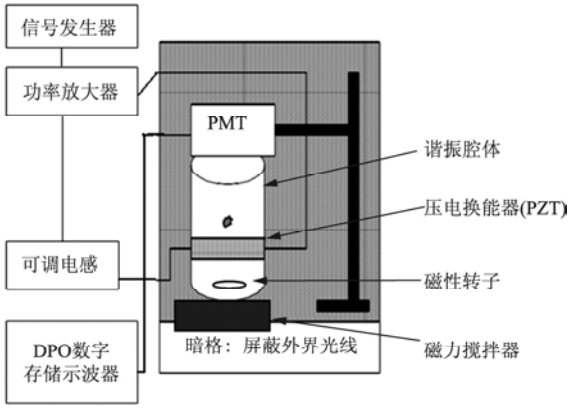


图 1 实验装置示意图

（光电倍增管外接提供电源），数字存储示波器组成；实验研究中光电倍增管是否正确使用、性能、工作状态、周围环境等都对实验数据的准确性起到关键性作用。即使气泡发光强烈、稳定，示波器工作状态良好，如果光电倍增管使用不当就会造成数据不可靠，会导致实验失败。

CR131 各管脚高压偏置电压由 PMT 管座外接控制电路来控制，PMT 管座外加控制方式有两种，即外加电阻控制方式和外加电压控制方式。为了使光电倍增管工作在最佳的状态，应适当的选用外加控制方式并正确连接和进行调整。

图 2 所示 PMT 管座（CC171 型）的内部结构和实物图。

两种外加控制方式如图 3 所示，都用黄线向内部输入的控制电压可控制在 0 V~2.5 V 范围内，即达到调整光电倍增管的灵敏度目的；控制（黄线）端电压为 0 V 时，负高压最小，光电倍增管灵敏度最低几乎没有工作；控制（黄线）端电压为 2.5 V 时，负高压最大，光电倍增管灵敏度最高；这时在黑暗的环境下也吸收外面杂散光线，示波器显示的波形发生杂乱；本实验研究中始终用到的是外加电阻控制方式，控制端电压始终放在中间 1.25 V 位置；微调电阻，用万用表同时可观察控制端的电压变化。

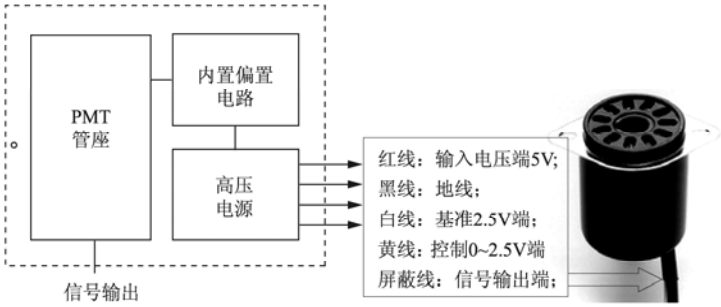


图 2　光电倍增管管座（CC171 型）的内部结构和实物图

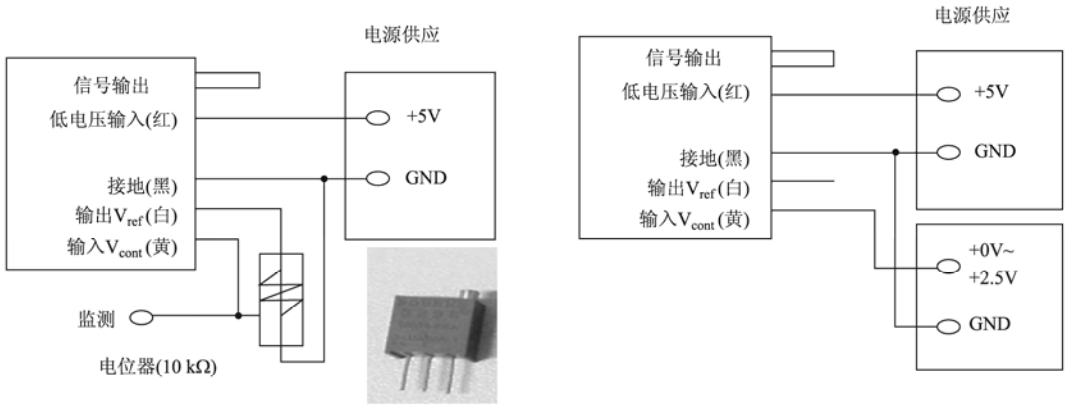


图 3　光电倍增管管座（CC171 型）外加电阻和外加电压控制方式示意图

3　光电倍增管在实验研究中的应用

3.1　光电倍增管实用与光强测量

(1) 圆柱形玻璃瓶谐振腔内装入 10 cm 厚度的磷酸液进入暗格并放在磁力搅拌器上。光电倍增管管座（CC171 型）外接电路正常接入并调好后，把 PMT 插入管座放入暗格内，固定在铁架上，光电倍增管的侧窗刚好对准液面放在圆柱形谐振腔侧方（图 4）或平面形谐振腔（图 5）上方。

(2) 当光电倍增管后续回路信号接收端与连接电缆的特性阻抗匹配时，光电倍增管的传输波形不会失真[11]。图 2 所示的屏蔽线是 PMT 信号输出端，PMT 把微弱光变成电信号，通过这根线送到示波器供给显示和存储；PMT 输出端与示波器之间通过 50 Ω/1 MΩ 阻抗匹配器实现阻抗匹配。

(3) 为了避免外界干扰影响，光电倍增管的信

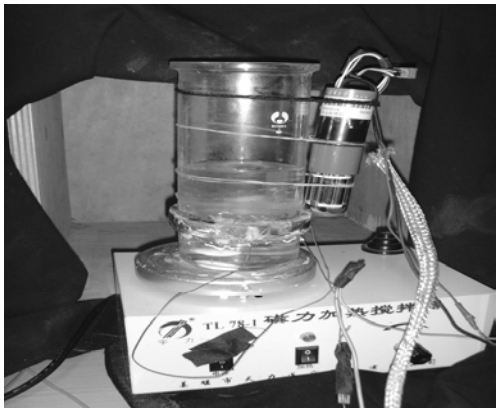


图 4　圆柱形谐振腔侧方测量方式

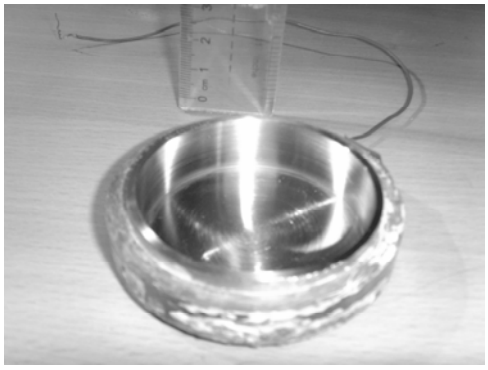


图 5　平面形谐振腔

号输出线从头到尾重新封闭后跟示波器外壳接地。

(4) 谐振腔内出现比较强的发光现象时，接通电源使光电倍增管开始工作，同时示波器屏幕上开始出现对应的光强信号图。然后用 USB 存储对应的光强数据，再利用电脑容易得到光电倍增管输出的光强度。

3.2　实验结果与分析

光信号采集使用 CR131 型光电倍增管光谱响应范围为 185~870 nm，峰值波长为 400±30 nm，典型增益为 8×10^6 倍，暗电流为 5~50Typ.nA，采用设计特殊的抗滞后结构，并具有极好的输出稳定性。比其它类型的光电倍增管具有宽广的光谱响应特征，增益高、暗电流低、工作稳定等优点，实验研究中是个理想的光电转换器。

光强信号显示、存储用 DPO2024 型数字存储示波器，带宽 200 MHz，采样率 1 Gs/s，输入阻抗 1 MHz。

(1) 磷酸液体厚度 10 cm 时，连续改变信号源频率和可调电感电感量，驱动频率 $f=$ 21.061 kHz 时，用肉眼看到液体中比较强的发光现象。图 6，驱动频率 $f=$ 21.061 kHz 时，光电倍增管在圆柱形谐振腔上方时，磷酸中多气泡发光强度。

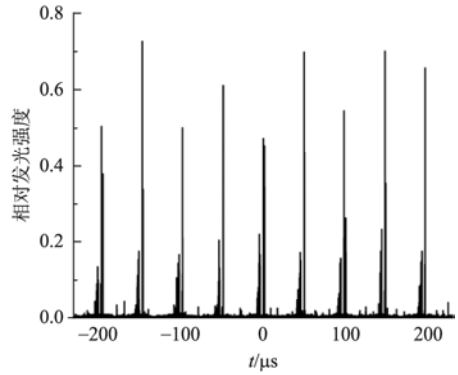


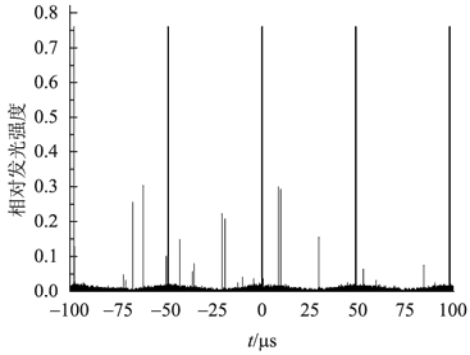
图 6　驱动频率 f=21.061 kHz 磷酸中多泡声致发光光强

(2) 磷酸液体厚度 10 cm 时，连续改变信号源频率和可调电感电感量，驱动频率 20.316 kHz~20.335 kHz 时，用肉眼看到液体中的发光现象；其中驱动频率 $f=$ 20.316 kHz 时，发光强度最强。图 7(a) 驱动频率 $f=$ 20.316 kHz 时，光电倍增管在圆柱形谐振腔侧方（图 4）时，多气泡发光强度。其他条件都没有变化的情况下，打开磁力搅拌机对液体进行漩涡集中气泡时，磷酸中多气泡发光强度，图 7(b) 所示。

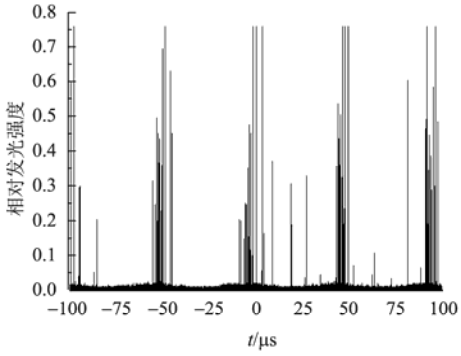
(3) 磷酸液体厚度 3 mm 时，连续改变信号源频率和可调电感电感量，驱动频率 17.894 kHz~17.934 kHz 范围时，用肉眼看到液体中的发光现象；其中驱动频率 $f=$ 17.91 kHz 时，发光强度最强（图 8(a)）。液体厚度不变时，再连续调整信号源频率和可调电感电感量，在驱动频率 19 kHz~19.282 kHz 范围内，用肉眼看到液体中的发光现象；其中驱动频率 19 kHz 时，发光强度比较强（图 8(b)）。

磷酸液体厚度 2 mm 时，用同样的方法，在驱动频率 19.964 kHz~20.18 kHz 范围时，用肉眼看到液体中的发光现象；其中驱动频率 $f=$ 20.18 kHz 时，发光强度比较强（图 8(c)）。磷酸液体厚度 4 mm 时，连续改变信号源频率和可调电感电感量寻找谐振频率，虽然液体受到较高的声压但用肉眼没能看到液体中的发光现象，用光电倍增管也没能检测到对应的光强；

图 8 液体厚度分别为 3 mm 和 2 mm，驱动频率分别为 $f=$ 17.91 kHz、$f=$ 19 kHz 和 $f=$ 20.18 kHz 时，光电倍增管在平面形不锈钢谐振腔（图 5）上放时，用光电倍增管测量的磷酸中多气泡发光强度。



(a) 没通过漩涡



(b) 通过漩涡集中气泡

图 7　驱动频率 f = 20.316 kHz 磷酸中多泡声致发光光强

图 6、图 7(a)和 7(b)可以看出，磷酸液体厚度较大（10 cm）时，发光强度较大的（相对光强 0.7 以上）主级气泡周期性很好，时间间隔均为 50 μs；发光强度较低的（相对光强 0.4 以下）次级气泡周期性不是很好，但有一定的规律性；液体通过漩涡集中气泡时，可以使更多气泡发光。

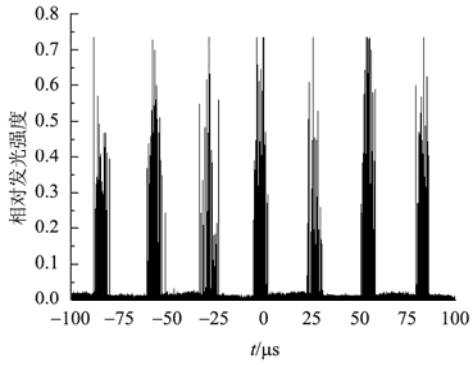
从图 8(a)和 8(b)可以看出，磷酸液体厚度较薄（3 mm）时，在谐振频率范围内，某一驱动频率或不同驱动频率下气泡发光有很好的周期性，间隔为 25 μs；并几乎没有次级发光气泡。图 8(c)可以看出液体厚度 2 mm 时，有些发光点相对强度变低、发光气泡数量减小，同时出现以 50 μs 和 25 μs 为周期的光脉冲及极少散光；液体厚度 4 mm 时，虽然电路匹配但没能实现声致发光。

实验研究结果中可以看到，多泡声致发光比较复杂，随着时间的不同，在同样液体厚度下，有不同的驱动发光频率，这意味着多泡声致发光外界环境依赖性很强。不过无论怎么样，磷酸多泡声致发光驱动频率都在 20 kHz 附近。

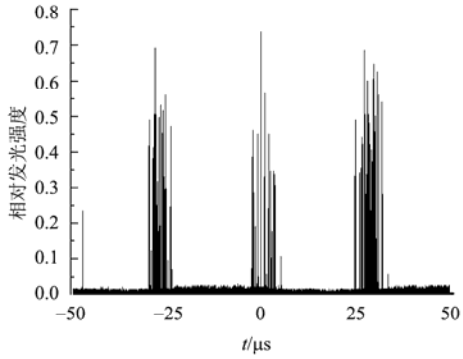
各种光强度图中最高相对发光强度均接近 0.75，没能超过这个值。这是否就是最大相对发光强度？还是有些情况下虽然相对光强很强，因受到光电倍增管最大输出线性范围的限制而是否没能够完整的输出？在光电倍增管应用方面上，这些问题应进一步研究。

光强图中，区别光脉冲与背景光（噪声）的简单方法是:没有发光或光电倍增管不工作时出现的信号就是背景光（噪声）。

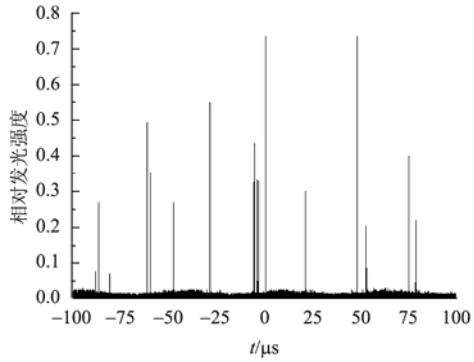
到目前为止磷酸液的声致发光强度：黑暗背景下，眼睛可见；低于 1 mW 左右。



(a) 液体厚度3 mm，驱动频率为f=17.91 kHz



(b) 液体厚度3 mm，驱动频率为f=19 kHz



(c) 液体厚度2 mm，驱动频率为f=20.18 kHz

图 8　不同厚度、不同驱动频率下磷酸液体中多气泡发光强度

3.3 实验中应注意的问题

3.3.1 采取隔热措施，有效控制液体和 PMT 受热

光电倍增管在完全黑暗的环境下仍有微小的电流输出，这个微小的电流叫做阳极暗电流，它是决定光电倍增管对微弱光信号的检出能力的重要因素之一。降低光电倍增管的使用环境温度可以减少热电子发射，从而降低暗电流。另外，光电倍增管的灵敏度也会受到温度的影响[12]。由于噪音随温度升高而急剧增加，所以在长时间工作时，一定要考虑降温措施，以控制暗电流的增长[13]。试验研究中电路开始谐振时，特别是液体中出现声致发光时，紧贴在圆柱形玻璃瓶的压电换能器才得到比较高的声压能量，所以这时压电换能器发热甚至会烫手。图 4 光电倍增管用侧方测量方式可以看出，紧贴在玻璃瓶侧方的光电倍增管同时受热；实验结果证明，声致发光的出现对液体温度依赖性很强，即液体温度越低声致发光很强，反而很弱或不出现；总而言之，液体温度的升高无论微弱光的出现还是光强的测量都有很大程度的反作用，所以制作谐振腔时，压电换能器和玻璃瓶之间设法形成隔热层，有效控制液体和 PMT 受热。

3.3.2 适当调整灵敏度使 PMT 处于最佳工作状态

光电倍增管的工作偏置电压对信号电流的增益和非线性有很大的影响。一般来说，偏置电压越高信号增益越大，同时非线性也越强。当偏置电压进一步提高时，信号电流就会逐渐饱和，而暗电流则随电压的升高而迅速增大，光电倍增管的暗电流随偏压增大而增大，从而导致信噪比降低。为了使光电倍增管有较高的工作灵敏度，又不受噪声的影响太大，需要精心选择光电倍增管的最佳偏置电压[11]。实验研究中控制端电压始终放在中间 1.25 V 位置，因为再次提高控制电压时，示波器屏幕上显示的对应光强的阴影比较多并会影响观察正常的光强；可能是由光电倍增管的非线性引起的，也可能是外界光线干扰、示波器带宽及采样速率低引起的，这些现象应进一步研究；进一步遮住外界光线干扰的同时，应适当的调整控制偏置电压来可以提高光电倍增管的工作灵敏度，但是不能盲目地大幅度提高控制电压，因为大幅度提高控制电压从而提高阴极负高压和光电倍增管的各脚端偏置电压时，会引起光电倍增管进入比较强的非线性区域，同时暗电流迅速增大而导致信噪比降低。

3.3.3 掌握简单故障的处理能力

如果实验过程中突然出现光电倍增管不工作、调整控制电压不起作用时，利用以下方法就能判别 PMT 或管座的好坏。由于 PMT 管座有良好的自保护能力，无论是 PMT 还是管座本身，当其发生故障时往往表现为无负高压输出或负高压不能正常调节，因此出现 PMT 不能正常工作的现象时，首先应判别 PMT 本身故障还是 PMT 管座故障引起的。具体判别方法是：使用万用表检查 PMT 管座（CC171）供电电源及外接控制电压电路是否正常，PMT 是否出现短路。首先把 PMT 从管座中拔出，电源的负载（PMT）换接一个电阻为 10 MΩ 左右的假负载，即管座的黑色输出（地线）线端与管座第 11 管脚（阴极负高压输入端）之间接一个 10 MΩ 左右的电阻，然后给管座供电，此时在第 11 管脚口有负高压并且可以调节就说明管座（CC171）内部电路正常，故障在 PMT 本身，更换 PMT 后故障可以排除；此时如果管座第 11 管脚口有或无负高压，但不能调节就说明故障在管座（CC171）内部，更换后故障会被排除。

3.4 改善的建议

(1) 外电磁场对光电倍增管的灵敏度、能量和时间分辨率的影响很大，外电磁场将会改变管子中的电子运动轨道，所以必须采取屏蔽措施[13]。我们这个实验就是靠电路谐振进行的；那么整个实验环境和过程都处于频率不高（20 kHz 左右）但比较强的电磁场环境中；如果信号封闭处理不好，信号发生器的信号以无线方式直接进入示波器跟光信号混合，这现象很容易发生，也曾出现过。所以对信号输送电缆进行较好的封闭措施。

(2) 光电倍增管管座（CC171 型）内部电路跟 CC131 连接方式决定了它对光、磁、电屏蔽的能力很低，所以必须采取措施。对于解决这个问题，已经有 H9305、H9306、H9307 系列及 H11462 系列上市的全金属封装，具有电、磁、光屏蔽性能强的 CR131 型光电倍增管为核心的弱光探测产品（CR131 和管座一体化的封装产品，在管座内部还集成有纹波处理电路系统，具有高速、紧凑、高灵敏等优点，可方便的应用于各种微弱光探测领域）；用这种产品代替 CR131 和管座（CC171），本人认为可以有效地解决这个问题。

(3) 型号为 PMTH-S1-CR131 的全封闭性光电

倍增管与 7IP1100/7IP1500 型光电倍增管配套高压电源配合使用也可以得到同样的效果。

4　结论

对于三维（厚度 10 cm）磷酸液体在 f = 21.061 kHz 和 f = 20.316 kHz 驱动频率下，基本上以 50 μs 为周期能实现较强的多泡发光，液体通过漩涡集中气泡可以使更多气泡发光。对于二维（厚度 3 mm）磷酸液体时，在谐振频率范围内在驱动频率 f = 17.91 kHz 和 f = 19 kHz 下可以看到较强（相对强度达到 0.75 以上）的光脉冲，周期性很好，周期为 25 μs，为三维液体发光周期的半倍。

用光电倍增管测量的磷酸中多气泡发光强度可以清晰地看到，虽然有许多气泡分散在空化场中发光，但由于气泡之间的相互作用，这些气泡大致是同时发光，发光周期大致就是驱动超声波周期。另一方面，我们也可以清楚地看到，空化气泡发光并不是完全同时的，事件有一定分布，这种时间上的差异与气泡之间的相互作用密切相关。利用光电倍增管测量光信号，可以对空化气泡间相互作用作进一步研究。

参　考　文　献

[1] 申建华, 陈伟中, 卢美军. 不同温度下的频率失谐对单泡声致发光影响的实验观察[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(4): 540-546.

[2] 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.

[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.

[4] 崔炜程. 不同溶质水溶液中单泡声致发光实验研究[D]. 南京: 南京大学, 2012 年 5 月.

[5] 陈岐岱, 王龙. 声致发光的流体动力学实验方法[J]. 物理, 2004, 33(12): 913-917.

[6] 何寿杰, 陈岐岱, 李雪辰, 等. 圆锥气泡声致发光光脉冲和光谱[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 977-981.

[7] 侯广利, 张颖, 汤永佐, 等. 利用声致发光原理检测水质装置的设计[J]. 山东科学, 2013, 26(1): 65-68.

[8] 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.

[9] 王巧霞, 牛勇. 声致发光法测量超声空化场的实验研究[J]. 陕西师范大学学报, 2008, 36(6): 43-46.

[10] 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.

[11] 王挺峰. 光子计数用光电倍增管的外围工作电路[J]. 光机电信息, 2009, 26(2): 39-44.

[12] 武兴建, 吴金宏. 光电倍增管原理、特性与应用[J]. 国外电子元器件, 2001, (8): 13-17.

[13] 金圣经. 光电倍增管[J]. 物理, 1986, 15(10): 601-607.

一种超薄高效吸声结构

香港科技大学和华南理工大学的学者联合研制出一种超薄的高效吸声结构，对空气中 100~1000 Hz 范围内的声波有很强的吸收能力，个别频率吸声系数高达 99%。覆盖吸声结构的物体在特定频率下接近于理想的声学黑体，因而这种复合吸声结构也被称为暗声学材料。

这种吸声体由若干结构单元组成。每个单元包含一块厚度 0.2 mm 的弹性薄膜，每块膜薄表面镶嵌有一对厚度 1 mm，半径 6 mm 的半圆形铁片。铁片在共振频率处发生“拍动”，其边界处位移一阶空间导数不连续，导致局部范围内聚集了密度极高的弹性曲率能量。由于薄膜拍动模式与声辐射模式耦合作用很弱，局域高密度弹性曲率能量无法形成声辐射只能耗散掉，因而结构整体吸声能力显著增强。实验表明，这种深度亚波长结构对斜入射声波也有很好的吸收效果。

（胡文林　译自[1] Nature Communications, 2012, 3: 756; [2] U.S. Patent 20,130,133,979, 2013-5-30.）