

声致发光的流体动力学实验方法*

陈岐岱 王龙[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 介绍两种使用流体动力学实现声致发光的方法: 刹管法和 U 管圆锥泡法. 这两种方法的设备简单, 操作方便, 容易在普通物理实验中进行, 所得结果和传统单泡声致发光有所不同. U 管圆锥泡法创造了发光功率和单脉冲能量的新记录, 并首次用条纹相机得到了时间分辨发射光谱.

关键词 声致发光, 刹管法, U 管圆锥泡法

Sonoluminescence obtained by hydrodynamical methods

CHEN Qi-Dai WANG Long[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Two hydrodynamic methods to realize sonoluminescence are described, one using tube arrest and the other a conical bubble U tube. Both methods only require simple apparatus and are easy to operate, so they can be performed in any conventional physics laboratory. The experimental results obtained differ from those of traditional single bubble sonoluminescence. New records for the luminescence power and energy emission from single events have been created, and the first time-resolved emission spectrum of sonoluminescence has been obtained with a streak camera by the U tube method.

Key words sonoluminescence, tube arrest method, conical bubble U tube method

1 引言

声致发光(sonoluminescence)一词出现于 1937 年^[1],系指用超声波在液体中产生气泡(称空化, cavitation),气泡在坍塌时发光的现象. 这样的气泡尺寸小,数量大,在时空上随机分布,单个气泡寿命短,难于进行实验测量和研究. 这样的现象后来称为多泡发光(multibubble sonoluminescence, MBSL),主要在声学界进行研究.

1989 年,美国密西西比大学的研究生 Gaitan 在他的导师 Crum 指导下,成功地获得了超声驱动下单一气泡的发光现象,后来称之为单泡声致发光(single bubble sonoluminescence, SBSL)^[2]. 单泡声致发光的实现使声致发光研究进入了一个新阶段,

并开始在物理学界受到普遍重视.

这一实验使用一个透明的超声共振腔,一般用普通的玻璃烧瓶即可,其中装满液体,一般用除气的蒸馏水. 当通过换能器将超声波加到液体中时,在容器中心形成波腹,将一个小气泡约束在固定位置,并对其进行周期性压缩. 小气泡可以注入,或用加热丝在液体中产生,或电解产生. 小气泡在被重复压缩时发出周期性光脉冲. 通常声压为 1.1—1.5 atm ($1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$),声场频率 10—50 kHz,压缩前小气泡半径为几十微米. 所发射的光很弱,眼睛要在暗室里适应一段时间才能看到.

* 国家自然科学基金(批准号:19934001)、科技部重大项目前期预研(批准号 2002CCA03400)和中国科学院院长基金资助项目 2004-07-28 收到初稿 2004-09-27 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: wanglong@aphy.iphys.ac.cn

这样的单泡发光有很多独特的性质,涉及物理问题极其丰富.它将声波这种非局域性的波长很长的机械波转换成波长很短的光波,能量密度可达 10^{12} 倍的聚集和增强.它的光脉冲非常短,为几十到几百皮秒,同步性很好.理论和实验研究表明,气泡内部可能存在 10^6 K 的高温和 10^9 Pa 以上的高压.十几年来,对这一研究课题进行了大量工作,对有关物理问题也进行了一些总结^[3].但还有很多疑问未能得到解决.其中至关重要的,一为发光机制,二为究竟达到了多高的温度.

从实验方法来看,这样的实验装置有一定的缺点.它所容许的实验参数空间过于狭窄.这是气泡重复压缩和发光过程的稳定性所要求的.气泡尺寸太小,不足以进行任何内部测量;光脉冲也太短,很难进行时间分辨测量.

最近,Putterman 等实现了 1MHz 的稳定单泡声致发光,扩展了实验参数空间^[4].另一改进是 Tale-yarkhan 等作出的.他们没用通常的气泡产生方法,而是从核物理的气泡室得到启发,在声波张力相时用脉冲中子源注入中子束,在其途径上产生 10 nm 的小气泡.这些气泡膨胀后被压缩时达到高温并发光.他们说,每次产生的气泡有几千个,半径压缩比达到 5 个量级.因为这样的方法产生的气泡是瞬态的,对稳定性要求不高,所以容许高达 15atm 的声压强,以及高的压缩比^[5].他们使用相变系数低,饱和蒸汽压低的氘代丙酮做液体介质,声称观测到了聚变中子.对这一实验的讨论可以参考评述性文献[6].两年之后,这一结果以更高的测量信噪比得到重复因而引起更普遍的重视^[7].

除去超声方法外,其他的实验方法也不断提出.严格地说,非超声方法产生的发光不能称为声致发光,而只能准确地称为空化发光(cavitation luminescence).但由于这些方法产生的气泡和发光与传统 SBSL 有很多共同之处,也经常被泛称为声致发光.空化发光可按气泡产生的方法分类如表 1.

流体动力学方法是借助于流体的宏观流动产生气泡并压缩使其发光.我们将在下面详细介绍其中的刹管法和 U 管圆锥泡法(简称 U 管法).至于文氏管(Venturi tube),它是一个内径随长度变化的长管,中间流过液体(图 1).当液体从狭窄的 A 段进入 B 段后,其中的气泡开始膨胀,然后在 C 段坍塌而发出很微弱的光^[8].

在局域能量沉积一类里,较常用的是用聚焦的激光束在水中产生气泡的方法.其发光脉冲的光谱

和时刻均显著不同于激光束的散射光及等离子体的发光,所以很容易区分.它的气泡比较大,有几个毫米,光脉冲也比较宽,达到几个纳秒.^[9]

表 1 空化发光的分类

流体张力	声空化	单泡
		多泡
局域能量沉积	流体动力学	刹管法
		U 管法
		文氏管
局域能量沉积	光	激光泡
	热	过热流
	高能粒子	气泡室

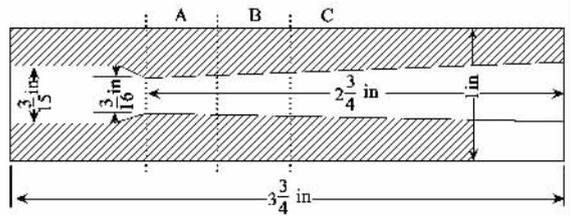


图 1 文氏管原理图(液体从左向右流动)

将过热的水蒸气注入水中,气泡快速膨胀,然后坍塌时会发光,可用光电倍增管探测.其光脉冲也很窄,用光电倍增管无法测量宽度.光强基本和水温无关.这一点与其他发光产生方法不同^[10].

气泡室是核物理和粒子物理中探测射线和粒子流的实验方法,无法单独用于声致发光. Tale-yarkhan 的实验实际上是这一方法和声空化两种方法的结合.

下面重点介绍我们使用的两种流体动力学方法.

2 刹管法

1952 年, Chestman 为了研究液体中的单个孤立瞬态气泡而提出刹管法^[11].基本构型如图 2 所示.一根下端封闭,盛着液体的玻璃管用弹簧悬浮.实验时,将玻璃管向下拉一段距离,然后松手使其在弹簧作用下向上运动,遇到一个挡头突然停止.这时,其中的液体继续运动并跟管底脱落,就会产生气泡.他用这样的设备研究了气泡的生长过程,但未观察发光.1959 年, Schmid 首次在这样的装置上用肉眼观察到发光现象^[12].他的文章是用德文发表的,很少有人注意到.

1960 年代,中国科学院声学研究所的汪承灏和张德俊在应崇福先生建议下,改进了刹管法的实验装置,用注入法产生直径达 2 cm 的较大单一气泡.

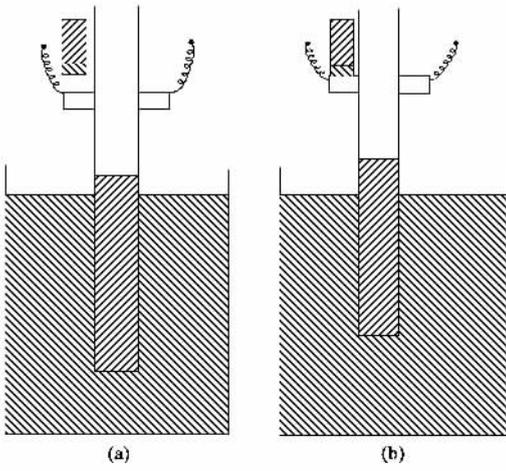


图2 刹管法装置原理图

他们将玻璃管安装在一个导轨上使运动更为稳定. 另一主要改进是: 用一个细的直杆, 下端面挖一个小坑. 当杆垂直从上方浸入液体时, 在坑内自然储有一个小体积的气体作为气泡的种子气体. 这个杆在空间是固定的, 不随玻璃管运动. 当运动液体停止时, 液体内部产生一个张力波, 气泡随之膨胀, 气泡膨胀到最大后被压缩发光. 液体再次反弹, 可经历几个膨胀压缩周期, 气泡也可发几个光脉冲. 他们用光散射法和高速相机测量了气泡的形态变化, 用光电倍增管确认了闪光发生在气泡的坍塌时刻^[13]. 他们的论文是用中文发表的, 又由于当时的封闭状态, 他们的先行工作也不为国际学术界所知. 他们的装置和图3差不多, 但在玻璃管下端还连接一个较大圆瓶.

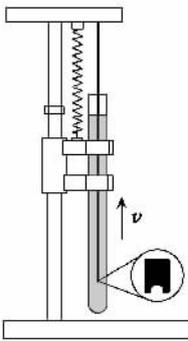


图3 文献 [16] 所用刹管法实验装置

这样的实验的要点是液体要充分除气. 方法可用机械真空泵连续抽几十分钟. 如果除气不充分, 液体在拉伸时, 会脱离玻璃管底, 或者说, 会在管底产生气泡. 这样的气泡也会发光. 另一注意事项是实验装置必须有足够的机械强度, 否则容易损坏.

自1990年代 SBSL 实现以来, 用不同的空化方

法研究声致发光有了新的意义和目标. 这种方法自然也受到重视. 2003年, Putterman 用类似的方法(他称为水锤法)创造了单次发光强度的新记录^[14]. 最近, Chakravarty 等用这一方法在磷酸中的氩气泡得到了新的记录 2×10^{12} 光子/脉冲^[15].

我们和声学研究所合作, 又对刹管法进行了改进和研究(图3). 技术上有两点小改进. 一是原来在玻璃管下端连接一个玻璃瓶, 气泡在玻璃瓶中膨胀压缩. 我们取消了这个玻璃瓶, 改成直管. 这样的设计使耐冲击力大大增强. 我们后来又进一步改进, 把弹簧绕在玻璃管的外围, 使整个系统的对称性好, 而且整体体积小了很多. 这样也便于将玻璃管下半部放在冰箱里进行低温实验(图4).

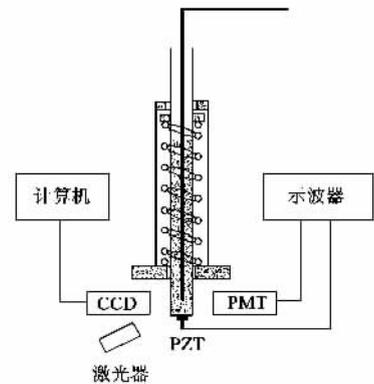


图4 刹管法实验设备的改进

我们的测量方法基本是重复汪承灏他们的, 使用了水、甘油、酒精、植物油等液体介质. 主要结果是: 可以得到相当大的泡, 直径达3cm以上, 直至接触到管壁变成圆柱形. 光强大约比传统的 SBSL 大半个数级. 得到纯甘油的发光^[16].

主要研究的和没有完全解决的是这种刹管法声致发光是单泡还多泡的问题. 在第一次坍塌和以后的几次反弹中均观察到光脉冲. 但对于水介质来说, 它们的幅度分布有随机性, 第一个脉冲不一定最强. 一般气泡每次坍塌时产生的光脉冲由几个脉冲组成. 这样的脉冲组里的脉冲距离有两个时间尺度. 一个是几个纳秒, 另一是几十纳秒尺度. 观察高速照相图片, 每一次压缩反弹后重新出现的气泡都是一团气泡云. 第一次坍塌由于高速照相时间分辨率不够, 看不出是在什么时候发的光, 但从光脉冲形态看, 也是多泡发光. 至于两种时间尺度, 可能反映了 MBSL 的发光成团性. 单个光脉冲宽度在 300ps 以下, 和传统 SBSL 接近.

甘油由于粘性大, 从高速照相图片看出其中的

气泡在压缩时始终保持,并不破裂.其光脉冲一般也是个很宽的单个脉冲.所以几乎可以肯定甘油介质是单泡.所以这一方法视液体介质不同,可以是单泡,也可以是多泡.把两种原来很不一样的两种发光联系在一起.所以这一实验方法还是值得继续使用并可期望得出更多的物理结果.

3 U 管圆锥泡法

U 管圆锥泡法装置的基本构型是一根 U 形金属管,其右端跟一个内圆锥相连,左端装有一个快速放气阀.实验时,将液体灌进 U 管,右端基本充满,只在圆锥顶部留有一个小气泡.然后对左臂抽气,右端圆锥顶部的小气泡膨胀.然后快速打开放气阀,一个大气压的气体冲入左端,推动液体快速压缩气泡.最先使用这种装置并观测到发光的是 Leighton 等人^[17].他们使用透明的锥体,在侧面观测到气泡的压缩和运动.

我们对这一技术做了几点改进:开始注入液体时,使 U 管两端液面存在一定的高度差;在两端都装有真空阀门,装上液体后,首先在两侧同时抽气,然后在右端液体上方充以一定量的气体,通常几百 Pa(图 5).这样的程序便于控制被压缩的气体量和种类.而更重要的是,气体在被压缩前是室温.而以前的各种实验方法都是气泡先膨胀再压缩.所以我们的方法保证气体有较高的初始内能.^[18]

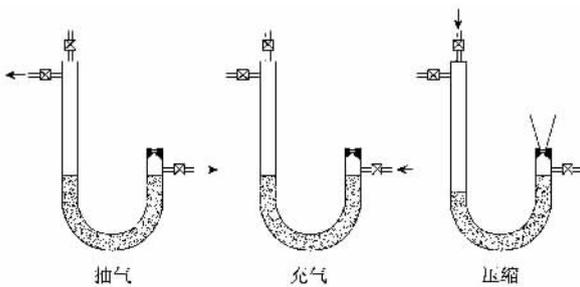


图 5 改进 U 管圆锥泡法实验装置和程序

我们用这样的设备和实验方法,用 1,2-丙二醇做实验液体充入氩气时得到了非常强的发光.其单次光脉冲不但在明亮的环境下可以用肉眼观察,而且可以在黑暗环境下作为照明源,用普通相机和胶卷拍摄物体的照片.用波长范围 400—1100nm 的光功率计测量单次光脉冲的总能量约 1.4 mJ.如果发光辐射是各向同性的,且每个光子的能量平均为 2eV,则每个光脉冲包含光子数为 5×10^{15} .从拍摄照片所需亮度估计,也得到同数量级的结果.这一单脉

冲光子数较传统 SBSL 高 9 个量级,较 2003 年水锤法结果^[14]高 7 个量级,较最新的记录^[15]也高 3 个量级.用光电倍增管测光脉冲波形,其宽度约为 150 μs,远较其他声致发光宽得多.由此计算可见区发光功率为 10W,相当于普通灯泡.所以,光脉冲强的主要原因是脉冲长,但平均功率也创造了新记录.

因为单次脉冲功率高,首次成功用条纹相机拍摄了时间分辨可见光谱.它由连续谱和谱带两部分组成.连续谱可用黑体辐射公式很好拟合,最高黑体温度 3800K.不同波长辐射的脉冲宽度不同也符合黑体辐射特征.又从单位表面亮度估计,也与黑体辐射公式一致.以前传统 SBSL 均未得到类似结果.这也不难解释.因为传统 SBSL 的时间和空间尺度都很小,可能不足以得到热平衡.谱带由 C₂, CN, CH 等准分子的振动带组成,在脉冲中出现较晚.从位于 450—550 nm 的 C₂ 的 Swan 带可以计算分子等效振动温度,最高值比 3800K 略高.

从 Swan 带出现的时间特征,从光脉冲上升慢下降快的轮廓特征,以及从光学窗口所拍摄的发光体照片来判断,使用 1,2-丙二醇液体时,发光体是一个单泡,但在发光最强时刻分裂成几个泡.破裂时刻可能是气泡在锥体内被压扁时.

我们还使用了乙二醇和水为液体介质,得到的结果非常不同于 1,2-丙二醇.首先,他们所发的光远比 1,2-丙二醇弱.其次,其时间行为也大不相同.乙二醇的光脉冲近似对称,似乎为单泡未破裂.水的发光由一些窄的脉冲构成,有点像剥管法的结果.水的粘滞性远比其他两液体介质低,可能在作为单泡压缩时不发光,而在破碎为若干小泡再进一步压缩时发光.由于这些介质的发光比传统 SBSL 高,也适于研究一些原子分子过程的物理问题.

如上所述,这样尺度的实验装置和工作介质只能产生几千度的温度.其内部状态非常接近于激波管.这样的实验也产生很强的激波,所以可看做微型激波管.与此相关的是在水激波管中也观察到空化现象^[19].锥体上的光学窗口一般使用 1.5cm 厚的石英玻璃,经常在实验中被击碎飞出.所以在实验中不得直接用眼睛观察窗口,以免出现人身事故.

4 结论

流体动力学空化发光可视为传统 SBSL 的驱动频率的低频极限.在这个意义上可称为广义的声致发光.这类声致发光的共同特点是气泡尺度大,脉冲时间长,发光强.这些都有利于实验测量.缺点是单

次运行 重复性不好. 但由于近年来用这些方法连续创造单脉冲发光的新记录 这类方法值得重视.

本文主要对两种流体动力学方法及其改进做了介绍. 它们, 特别是改进 U 管法, 有一些独特的特点, 值得注意. 当然还有很多没弄清楚的问题, 如为什么不同的液体介质行为完全不同, 以及对装置尺度的定标律, 都是很重要的研究题目.

实用方面, 可以想象到的是作为高温化学实验室, 研究在通常条件下难以进行的化学反应. 其他方面的应用也值得探讨. 我们撰写此文的目的, 就是向大家介绍这两种在普通物理实验室中很容易进行的实验, 并希望在广泛范围内寻找其应用.

致谢 感谢应崇福院士、沈建中、邓京军、张建平、艾希成、安宇教授, 吴先梅、付立民博士的帮助.

参 考 文 献

- [1] Frenzel H, Schultes H. Z. Phys. Chem. , 1937 , B27 : 421
 [2] Gaitan D F , Crum L A. J. Acoust. Soc. Am. Suppl. , 1990 , 87 S141
 [3] Brenner M P *et al.* Rev. Mod. Phys. , 2002 , 74 : 425

- [4] Camara C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 : 124301
 [5] Taleyarkhan R P *et al.* Science , 2002 , 295 : 1868
 [6] 王龙. 物理 , 2002 , 31 : 272 [Wang L. Wuli (Physics) , 2002 , 31 : 272 (in Chinese)]
 [7] Taleyarkhan R P *et al.* Phys. Rev. E , 2004 , 69 : 036109
 [8] Jarman P D , Taylor K J. Brit. J. Appl. Phys. , 1964 , 15 : 321
 [9] Ohl C D *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 80 : 393
 [10] Chakravarty A *et al.* J. Luminescence , 2001 , 92 : 27
 [11] Chesterman W D. Proc. Phys. Soc. , 1952 , B52 : 85
 [12] Schmid J. Acustica , 1959 , 9 : 32
 [13] 汪承灏, 张德俊. 声学学报, 1964 , 1 : 59; 张德俊, 汪承灏. 声学学报, 1966 , 3 : 14; 汪承灏, 张德俊, 宗健. 物理学报, 1977 , 26 : 381 [Wang C H , Zhang D J. Acta Acustica , 1964 , 1 : 59 ; Zhang D J , Wang C H. Acta Acustica , 1966 , 3 : 14 ; Wang C H , Zhang D J , Zong J. Acta Physica Sinica , 1977 , 26 : 381 (in Chinese)]
 [14] Camera C , Putterman S J. Phys. Fluids , 2003 , 15 : 4 : 57
 [15] Chakravarty A , Georghiou T , Phillipson T E , Walton A J. Phys. Rev. E , 2004 , 69 : 066317
 [16] Chen Q D , Wang L. Chinese Physics , 2004 , 13 : 564 ; Chen Q D , Wang L. Chin. Phys. Lett. , to be published
 [17] Leighton T G , Ho W L , Flaxman R. Ultrasonics , 1997 , 35 : 399
 [18] Chen Q D , Fu L M *et al.* Phys. Rev. E , 2004 , 70 (4) : 047301
 [19] Richards B E , Trevena D H , Edwards D H. J. Phys. D : Appl. Phys. , 1980 , 13 : 1315

BSOE 北京晨辉日升光电技术有限公司

BEIJING SUNRISE OPTOELECTRONICS CO., LTD.

——专业激光及光电产品代理商

德国 Radiant Dyes 公司

连续可调谐环型腔激光器

调谐范围: 570-610nm (R6G, 可选其它染料), 700-970nm (Ti:Sa);
 线宽: 1MHz; 频率漂移: 100MHz/小时; 扫描范围: 30GHz;
 模式: TEM₀₀.

驻波染料激光器

调谐范围 560-650nm (可选其它染料), 线宽: <200GHz (单双折射滤光片), <40GHz (多双折射滤光片).

荷兰 Avantes 公司

AvaSpec 系列微型光纤光谱仪

波长范围 200nm-1100nm-2200nm, 分辨率 0.04-20nm, 还有多种光源、光纤探头及附件, 是性价比高的在线检测和科学分析用微型光谱仪。可应用于颜色测量、吸收率测量、发光测量、LED 测量、薄膜厚度测量、镀膜过程监控、氧含量测量、宝石成分检测、喇曼光谱、无损血液成分分析、颜色混合及匹配等领域。



欲了解我公司产品详细信息, 请参阅我公司网站: www.bjlaser.com

公司地址: 中国北京市朝阳区望京新城 A5 区 422 楼 806 室

邮编: 100102

电话: 010-84718152

传真: 010-64740680

电子邮件: zzw512@vip.sina.com