

文章编号:1005-4642(2020)12-0028-05

专
题



薄炭黑层光致发声效应的实验探究

唐鸿洋,陆青山

(内蒙古大学 物理科学与技术学院,内蒙古 呼和浩特 010021)

摘 要:研究了带盖玻璃罐经蜡烛熏黑一半内壁,在交流电白炽灯照射时产生“嗡嗡”声的原理.结果表明:光白炽灯光周期性加热了炭黑颗粒导致其体积周期性膨胀,空气被扰动发声,玻璃罐起到回声放大的作用.

关键词:光声效应;热弹性;IYPT

中图分类号:O421

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.12.005

2013 年国际青年物理学家竞赛(IYPT)第 7 题为:请研究蜡烛熏黑一侧内壁的带盖玻璃罐子,经交流电白炽灯照射时会发出“嗡嗡”声的原理.光致发声(又称作光声效应)描述了物质受到调幅光照射时产生声音信号的现象^[1-2].路峻岭等^[3]认为产生声音信号是因为交变光激发了瓶中空气柱的声波共振模,用市电供电的白炽灯辐照时观察不到该实验现象.赵杰等^[4]认为声音信号强度与光通量成正比关系,但没有给出详细的理论解释.上述 2 项工作存在的共同问题是:没有对声音信号的波形及其频谱进行具体的研究;实验环境比较嘈杂,信噪比较低;以罐子内空气被加热为理论基础,没有考虑炭黑颗粒的热胀冷缩扰动空气的影响.本文应用热弹性振动理论,构建实验系统及其物理和数学模型,利用 Matlab 进行仿真,分析声音信号波形及其频谱特性,揭示该现象的物理机制.

1 炭黑的显微结构

通过几何光学计算^[5-7],显微镜景深约 $1\ \mu\text{m}$,这为观察炭黑层显微结构提供了保证.实验使用江西凤凰牌生物显微镜,型号 XSP-06,放大倍数为 400 倍.用镊子夹住盖玻片,在蜡烛火焰尖上将其单面熏黑.该黑灰即蜡烛燃烧不充分所形成的炭黑^[8-9],样品如图 1 所示.盖玻片被熏黑后,

将其放在载玻片上(炭黑层面向上)利用显微镜观察炭黑的结构.可见炭黑层基底紧密,越靠近表面,结构越疏松.

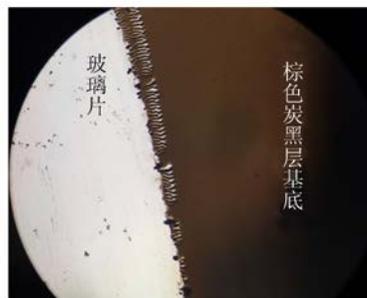


图 1 短时间熏黑的玻璃片样品

2 实验设计

2.1 制作光声转换装置

玻璃罐主要对炭黑层发出的微小声音信号起回声放大的作用,因此其体积不能太小.经过实验验证,炭黑层必须熏在瓶子内表面,且分布在一个侧面,炭黑层厚度达到目视不透光.与炭黑层相对的玻璃面要求洁净透亮.制作好的光声转换装置实物如图 2 所示.在盖子上打孔,孔径以麦克风收音孔为准,然后用胶带将麦克风粘紧.光源选用 200 W 白炽灯泡.

收稿日期:2020-04-06;修改日期:2020-06-18

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(No. 2018MS05014)

作者简介:唐鸿洋(1997-),男,天津人,内蒙古大学物理科学与技术学院 2016 级本科生.

通讯作者:陆青山(1981-),男,内蒙古呼和浩特人,内蒙古大学物理科学与技术学院副教授,博士,研究方向为储能材料与器件. E-mail:luqs@imu.edu.cn





(a)正视图 (b)侧视图

图 2 光声转换装置

2.2 白炽灯电路

实验使用的电源是市电. 灯座开关有 3 挡, 分别为白炽灯提供全波电压、半波整流电压以及开路断电, 电路图如图 3 所示.

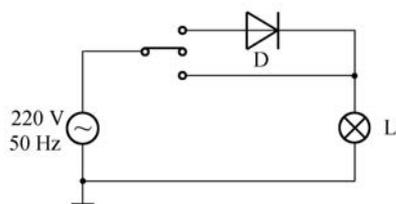


图 3 电路图

2.3 搭建实验装置

实验装置如图 4 所示. 使用智能手机录制声音信号, 利用 Matlab 分析音频文件. 由于实验中装置温度较高, 注意导线不要接触玻璃罐, 防止绝缘层被烧熔.



图 4 实验装置实物图

3 实验现象

3.1 声音信号

采集 3 000 s 声音信号, 如图 5 所示, 声音信号强度不随时间而发生明显的改变, 信号基本稳定. 声音信号的轻微波动与实验时市电供电的电压不稳有关.

图 5 中纵坐标只标明了振幅, 其具体数值由 Matlab 直接读取手机的录音文件得到, 为电信号

强度, 实验中无法确定单位电信号对应的声音信号振动幅度, 但这不影响研究声音信号衰减以及声音信号的波形.

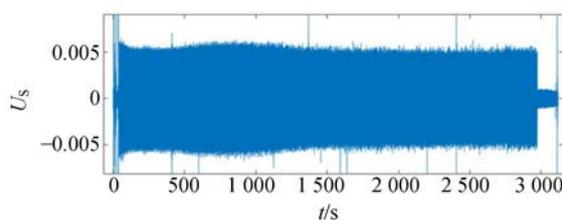
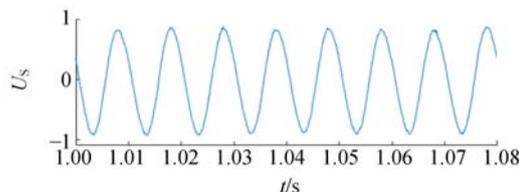


图 5 声音信号

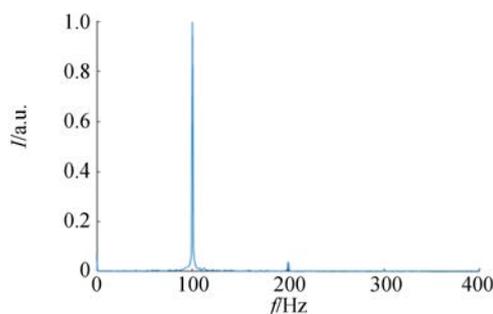
3.2 声音信号的波形分析

图 6 和图 7 分别为全波电压和半波整流电压输入时的声音信号及其频谱.

由图 6 和图 7 可见, 全波电压工作的光源照射光声转换装置时, 人耳可听见 (即相对振幅最高的基频率) 100 Hz 的声音; 而半波整流电压工作的光源照射光声转换装置时, 基频率为 50 Hz. 之所以会出现整流后频率向低频方向移动, 主要原因为光源的热辐射频率向低频方向移动.

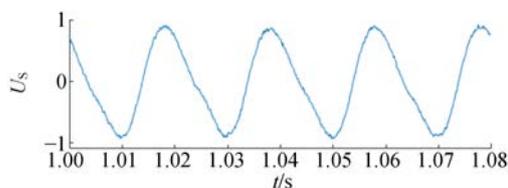


(a)声音信号

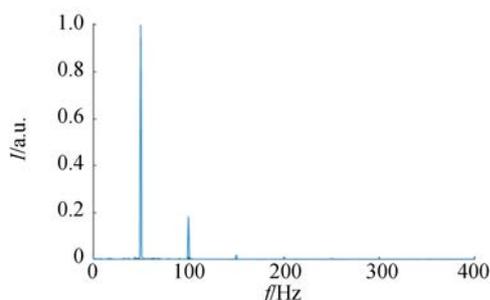


(b)频谱图

图 6 全波电压输入时的声音信号及其频谱图



(a)声音信号



(b) 频谱图

图 7 半波整流电压输入时的声音信号及其频谱图

全波电压与半波整流电压及其电功率波形如图 8 所示. 光源的热辐射功率 $P(t)$ 主要取决于该时刻电压值 $U_i(t)$ 的平方与元件电阻 R 的比值. 市电供电的 50 Hz 正弦全波电压做平方后, 其功率函数的频率为 100 Hz; 但半波整流后的电压做平方后, 其功率函数的频率仍为 50 Hz. 由于除电压外, 其他参量也随时间变化, 因此可从辐射源头解释声音信号基频向低频移动的原因, 其他谐频变化还要进行更细致的建模讨论与仿真模拟.

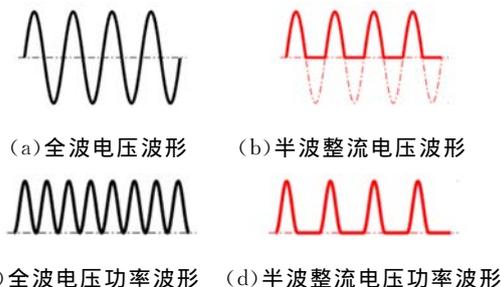


图 8 全波电压与半波整流电压及其电功率波形

4 建模与仿真

4.1 物理模型

使用家用电源为白炽灯供电, 白炽灯也是电-光(或电-热辐射)转换装置. 热辐射输入光声转换装置, 辐射能量在其中转换为罐子和炭黑层的内能、声音信号的声能和向环境散发的热能. 整个系统运行(图 9)基于核心假设: 炭黑颗粒在周期性热辐射下产生周期性热胀冷缩发声, 炭黑颗粒始终与室温有温差使得该装置得以持续运行.

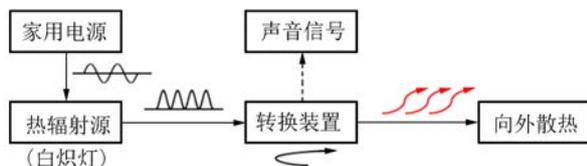


图 9 系统运行图

4.2 数学建模

家用电源 $U_i(t)$ 为有效电压值 220 V、频率 50 Hz 正弦交流电. 在本模型中设实际供电严格按照该标准, 没有幅度波动.

对于白炽灯, 忽略交流电对灯丝电阻 R_L 的影响, 热辐射功率为

$$P(t) = \frac{U_i^2(t)}{R_L} \propto U_i^2(t). \quad (1)$$

当灯丝温度约 3 500 K, 如图 10 所示, 灯丝温度按照红色曲线波动时, 白炽灯工作在近线性区, 对外辐射能量变化如蓝色曲线所示, 两曲线形状相似.

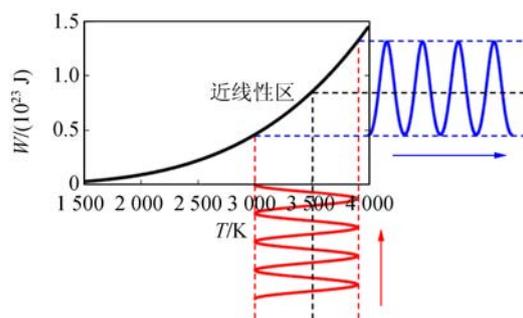


图 10 灯丝温度变化造成的辐射能量变化

尽管黑体辐射能量与温度满足 Stefan-Boltzmann 定律^[10-11], 但在此处近线性, 可简化模型.

设固体膨胀系数为 α , 则

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}, \quad (2)$$

由式(2)可积分得 $V = V(T)$ 在热平衡时的理论表达式为

$$V = V_0 \exp(\alpha T). \quad (3)$$

因为温度从 $T = 0$ K 积分, 所以式(3)中 V_0 是绝对零度时的固体体积, 该数值大小并不重要, 本研究主要关注体积随时间的变化率, 而声音和该变化率同步变化^[4].

周期性辐射源强度为 $W = W(t)$ 入射光声转换装置, 装置内工作物质炭黑总比热容为 C , 为了简便, 假设 C 为常量.

设炭黑的热弹性形变并不是瞬间发生的, 其热弹性变化有弛豫系数 ξ . 炭黑热平衡时, 在温度 T_1 时体积为 V_1 , 在 T_2 时体积为 V_2 , 设在某一时刻, 炭黑温度由 T_1 瞬间变为 T_2 , 但体积变化不是瞬间完成的, 设 t 时刻, 其体积为 V_t , 满足

$$\frac{dV_t}{dt} = \xi(V_t - V_2). \quad (4)$$

假设环境温度不变,光声转换装置对环境的散热符合傅里叶定律,

$$J_Q = -\kappa \nabla T. \tag{5}$$

其中, κ 为热传导系数. 式(5)简化为热流 J_Q 正比于炭黑层温度与室温 T_0 的温差 ΔT ,

$$J_Q = -\kappa \Delta T, \tag{6}$$

方便之后的运算.

4.3 仿真结果

基于上述讨论,针对光声转换过程,构建了微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = \frac{W}{C} - \kappa(T - T_0), \\ \frac{dV}{dt} = -\xi[V - V_0 \exp(\alpha T)], \\ W(t) \propto P(t) \propto U_i^2(t). \end{cases} \tag{7}$$

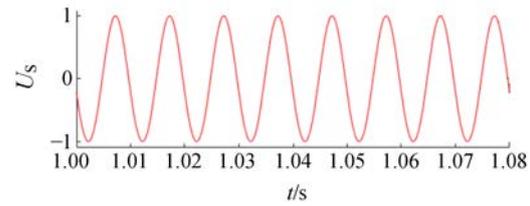
由电压 U_i 随时间变化确定热辐射功率 P 随时间变化,进而确定温度 T 和体积 V 随时间变化. 由于初始条件复杂,算式之间存在耦合,因此直接使用 Matlab 数值求解. 仿真实验使用 Matlab 编程,只需取很小的时间步长即可在短时间内做误差极小的仿真^[12].

全波电压输入和半波整流电压输入的仿真结果如图 11 和图 12 所示. 图 11(c)和图 12(c)为热辐射波形、装置温度和炭黑颗粒体积随时间的变化情况. 由于热辐射有效值大于零而且为周期性波动,根据热传导方程可得出:装置温度随辐照时间负自然指数增长且波动^[13]. 由于炭黑颗粒热胀冷缩随温度变化存在弛豫,使得炭黑颗粒体积具有类似 Logistic 回归^[14]增长的趋势. 由于炭黑颗粒周期性的热胀冷缩扰动空气发出声音信号,因此声音信号与炭黑颗粒周期性热胀冷缩同步.

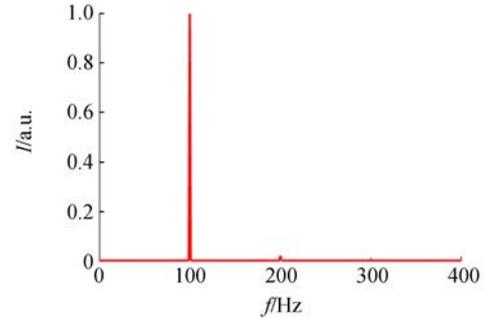
与实际测量的声音信号波形和频谱相比较,各个分频率的频率值及相对强度均保持不变,仿真结果与实验结果符合得很好.

此外,由该模型得出的结果与工作电压的波形有关,而与其他物理量数值大小无关,即在合理的条件下(例如比热容必须大于零)设置数值,其频谱图的相对强度保持恒定,这也是在市电供电条件下做实验测得的声音频率都相同的原因——物理本质并不会因为具体数值选取而改变.

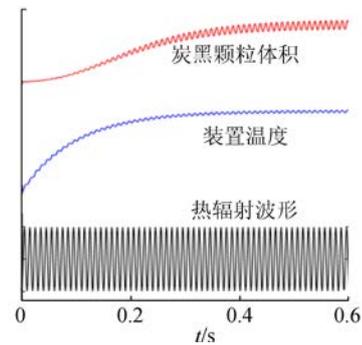
通过仿真可知,只要电源一直供电,最终导致炭黑颗粒体积始终发生周期性变化,这是系统声音信号不会衰减的原因.



(a) 声音信号波形

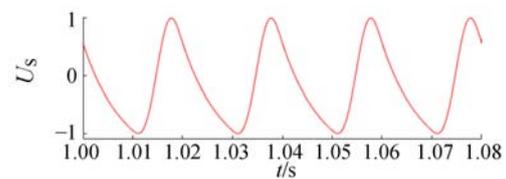


(b) 声音信号频谱

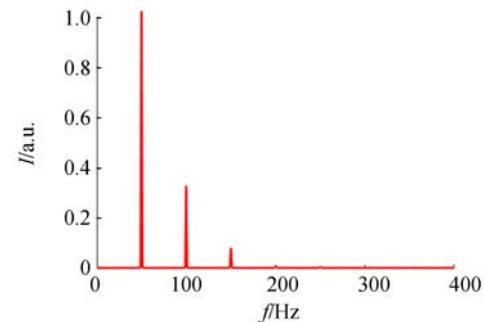


(c) 热辐射波形、装置温度和炭黑颗粒体积随时间变化

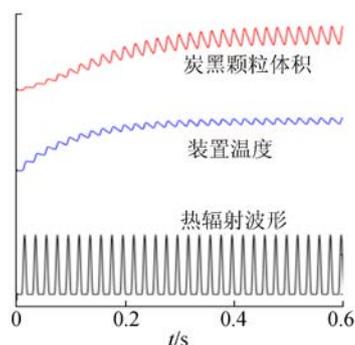
图 11 全波电压的仿真结果



(a) 声音信号波形



(b) 声音信号频谱



(c)热辐射波形、装置温度和炭黑颗粒体积随时间变化

图 12 半波整流电压的仿真结果

5 结 论

光通量、室温一定时,声音信号强度不随时间衰减。炭黑层面积一定时,光通量越大,声音信号强度越大。薄炭黑层光致发声的原理是:白炽灯发出的光主要分布在红外波段,具有强烈的热效应。白炽灯在交流电源作用下周期性加热炭黑颗粒,导致其发生周期性的热胀冷缩并扰动罐子内气体发出声音。罐子主要起到回声放大的作用。

参考文献:

- [1] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light [J]. American Journal of Science, 1880,20(3):305-324.
- [2] Bell A G. The production of sound by radiant energy [J]. Science, 1881,49(2):242-253.

- [3] 路峻岭,秦联华,任乃敬,等. “听到光”实验[J]. 大学物理,2014,33(10):24-25.
- [4] 赵杰,房颐,徐慧. 对光声现象的研究[J]. 物理实验,2016,36(1):28-34.
- [5] 李晓彤,岑兆丰,范世福. 几何光学像差光学设计[M]. 3版. 杭州:浙江大学出版社,2018:191-195.
- [6] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 重排本. 北京:北京大学出版社,2019:195-260.
- [7] 姚启钧. 光学教程[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2017:166-202.
- [8] Su Z X, Zhou W Z, Zhang Y. New insight into the soot nanoparticles in a candle flame [J]. Chem. Commun., 2011,47:4700-4720.
- [9] Rissler J, Messing M E, Malik A I, et al. Effective density characterization of soot agglomerates from various sources and comparison to aggregation theory [J]. Aerosol Science and Technology, 2013,47(7):792-805.
- [10] 梁希侠,班士良. 统计热力学[M]. 3版. 北京:科学出版社,2018:178-180.
- [11] 汪志诚. 热力学·统计物理[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2018:236-237.
- [12] 刘浩,韩晶. MATLAB R2014a 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2016:1-195.
- [13] 梁昆森,刘法,缪国庆. 数学物理方法[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2018:177-186.
- [14] Frank R G, William P F, Steven B H. 数学建模[M]. 叶其孝,姜启源,译. 5版. 北京:机械工业出版社,2019:364-367.

Photoacoustic effect in a thin carbon black layer

TANG Hong-yang, LU Qing-shan

(School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: The glass jar blackened in half inside buzzed when it was illuminated by AC incandescent lamp. The photoacoustic effect was investigated. The results showed that the carbon black particles were heated by periodic AM light, which caused their periodic thermal expansion and disturbed the surrounding air to generate sound effect. The glass jar mainly played the role of echo amplification.

Key words: photoacoustic effect; thermoelastic theory; IYPT

[责任编辑:任德香]