

◇ 研究报告 ◇

氧化铟锡薄膜的磁感应热声分析*

王成 李双[†] 邱鑫 范学良 李成

(苏州大学轨道交通学院 苏州 213151)

摘要: 基于优良导体在磁场下的涡流效应理论和固体的热声效应理论,建立了氧化铟锡(ITO)导电薄膜磁-热-声效应的理论模型,推导了导电薄膜热致发声的温度振荡和输出声压表达式。对有基底的ITO导电膜进行了磁场下的热声理论计算和实验测试,结果表明:薄膜的温度振荡值随频率呈上升趋势,与电-热-声模型相比趋势相反;薄膜声压的理论值与实验值在频域内的变化趋势基本吻合,验证了理论模型的正确性。进而,根据磁-热-声的理论模型,分析了线圈相关参数对薄膜声压级的影响,结果表明:薄膜声压级随着线圈匝数的增加而增大,随着薄膜与线圈中心距离的增加而减小,随着线圈半径的增加而减小。文中的研究结果拓展了导电薄膜在扬声器等领域的应用。

关键词: 磁场;导电膜;热声效应;频率;声压级

中图法分类号: TB52+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2023)01-0116-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.015

Induction thermoacoustic analysis and application of the Indium Tin Oxide film

WANG Cheng LI Shuang QIU Xin FAN Xueliang LI Cheng

(School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 213151, China)

Abstract: Based on the theory of eddy current effect of an excellent conductor in magnetic field and the theory of thermoacoustic effect of solids, a theoretical model of the magneto-thermo-acoustic(MTA) effect of the Indium Tin Oxide (ITO) film was established. The temperature oscillation and the sound pressure expression of MTA from the film were derived. The thermoacoustic theoretical calculations and experimental test of ITO film with a substrate under magnetic field were carried out. The result shows that the temperature oscillation value of the film increases with the frequency, which is the opposite trend compared with the traditional electro-thermo-acoustic model; and the change trend of the theoretical value of the film sound pressure and the experimental value in the frequency domain is basically coincide, which effectively validates the theoretical model. Furthermore, according to the theoretical model of MTA, the influence of the relevant parameters of the coil on the sound pressure level of the film was analyzed, and it shows that the sound pressure level generated by film increases as the number of turns of the coil increases and decrease as the distance between the film and the center of the coil increases as well as the coil radius increases. This research to a certain extent expands the application of ITO films in loudspeakers and other fields.

Keywords: Magnetic field; Conductive film; Thermoacoustic; Frequency; Sound pressure level

2021-11-27 收稿; 2022-01-18 定稿

*国家自然科学基金面上项目(51875374, 11972240)

作者简介: 王成(1991-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向: 微纳米薄膜的热声特性分析及应用。

[†]通信作者 E-mail: lishuang@suda.edu.cn

0 引言

1917年, Arnold等^[1]系统地阐述了热致发声机理, 当通入交流电时, 薄膜发热, 薄膜表面产生温度振荡, 薄膜附近的介质热胀冷缩, 产生声音。不过由于材料的局限性, 热声效应在当时并没有取得实质性的研究进展。1999年, Shinoda等^[2]利用30 nm厚的铝薄膜和10 μm厚的多孔硅组成了一种热致超声发射模型。2008年, Xiao等^[3]发现了碳纳米管薄膜的热声效应并设计了热致发声器。近年来, 纳米技术突飞猛进, 给热致发声器的研究开辟了一条新的道路。2011年, Tian等^[4]设计制作了纸质基底的石墨烯薄膜声源并进行了实验; 2012年, Suk等^[5]对不同基底的石墨烯薄膜进行了声学测试研究; 2015年, Tian等^[6]以石墨烯薄膜为热声器件制作耳机, 从此人们对耳机发声也有了新的认知; 2016年, Kim等^[7]基于三维还原石墨烯氧化物的热声效应, 制作了扬声器阵列; 同年, Fei等^[8]以三维石墨烯泡沫为热声器件, 制作出了性能更优的扬声器。以上都是在薄膜电-热-声的基础上研究热致发声器的一些特性, 有一个共同点就是必须给薄膜添加电极材料。

为了使热致发声器能在更苛刻的条件下使用, 薄膜的光声效应被人们发掘并研究。1880年, Bell^[9]发现了光声效应。当时技术和设备的相对落后, 激光的强度较低, 使光声转换效率低, 只能产生微弱的声信号, 严重阻碍了光声效应的研究进展。直到大功率激光的出现, 光致声波技术才得到有力的提高, 并有了较广泛的应用^[10-11]。随着纳米技术的提高, 在以电信号为基础的热致发声器得到大力发展的同时, 关于光声效应的研究同样焕发了新的生机。2014年, 易宁波等^[12]通过理论和实验推导了石墨烯海绵中光声信号的表达式。2015年, 赵继民^[13]对多层石墨烯薄膜的光声效应进行了研究。薄膜光声现象的发现, 使得热致发声器在应用环境上有了由线到面的提升。

2019年, Mao等^[14]将静磁场应用到纳米薄膜的电-热-声理论模型, 使纳米薄膜在静磁场的作用下振动发声, 通过多场耦合来改善薄膜的声学响应。2021年, Mao等^[15]继续在纳米薄膜的电-热-声理论模型基础上, 对薄膜施加相同频率的周期性磁场以激发新的声场, 由此来提高薄膜的输出声压。虽然, 磁场被引入薄膜的热声效应, 但是Mao等仍然

是在电-热-声理论模型基础上来研究磁场对薄膜声场的影响, 并未单独建立薄膜的磁-热-声理论模型, 也未谈到其应用方向。

因此, 目前无论是薄膜的电-热-声, 还是薄膜的光-热-声, 都有各自的缺点。在电-热-声模型中, 电极和导线的存在会对薄膜产生的声波造成很大的影响; 在光-热-声模型中, 虽然薄膜可以应用于更苛刻的环境, 但前提是, 需要高质量的可控光源, 并且光源与薄膜之间没有任何障碍物。因此, 为了改善薄膜热致扬声器的应用环境, 拟在薄膜的电-热-声和光-热-声理论基础上, 研究导电膜在磁场下的热声现象, 建立导电膜的磁-热-声的理论模型, 通过实验验证模型的有效性。

1 薄膜的热声分析

1.1 热声理论

当交变的磁场穿过具有优良导电性的薄膜时, 磁场能就会被薄膜转化为涡流损耗, 转换成热能, 薄膜表面就会有温度振荡, 从而产生声压, 磁-热-声的理论模型如图1所示。

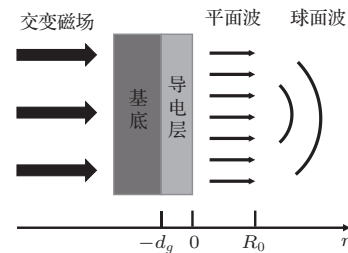


图1 氧化铟锡导电膜的磁-热-声理论模型

Fig. 1 Magneto-thermo-acoustic theoretical model of Indium Tin Oxide conductive film

以导电膜表面中心为坐标原点建立一维坐标系, 热声效应的近场声压公式为^[16]

$$P_m = \frac{\nabla T}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega k_g (\gamma - 1)}{\alpha_g C_0}} = \frac{P}{\sqrt{2A}} \frac{\gamma - 1}{C_0} \sqrt{\frac{\omega k_g}{\alpha_g N}} \quad (1)$$

在远场区域, 声波是球面波, 远场声压公式为^[16]

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{\nabla T}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega k_g (\gamma - 1) R_0}{\alpha_g C_0 r_0}} \\ &= \frac{P}{\sqrt{2A}} \frac{\gamma - 1}{C_0} \sqrt{\frac{\omega k_g R_0}{\alpha_g N r_0}} \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, P 是有效输入热功率, $P = P(t)/2$, $P(t)$ 为薄膜的瞬时涡流热功率, 下文给出其表达式; γ 为空气的比热容, $k_g/N\sqrt{1/\alpha_g}$ 为进入气体中交变

热流的比例因子,主要与薄膜的热容量、基底材料的热学性能有关,其中 N 的表达式在下文给出; ω 为声信号的角频率, α_g 为气体的热扩散系数, k_g 为气体热传导系数, C_0 是声速,瑞利距离^[17] $R_0 = A/\lambda$, A 为薄膜的面积,声波波长 $\lambda = C_0/f$, f 为声压频率, r_0 为声压点至薄膜中心的距离。

1.2 涡流损耗理论

导体在非均匀磁场中移动或处在随时间变化的磁场中时,导体内感生电流导致的能量损耗,叫做涡流损耗。当导电膜在时变磁场的作用下,根据法拉第电磁感应定律与欧姆定律可以得到^[18]

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (3)$$

$$J = \sigma E, \quad (4)$$

其中: E 为电场强度, B 为磁感应强度, J 为涡流电流密度, σ 为导电膜的导电率。

由于导电膜的对称性,方程(3)可以改写为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rE)}{\partial r} = -\frac{\partial B}{\partial t}. \quad (5)$$

因为 $B = B_0 e^{j\omega_1 t}$, 同时方程(5)对半径 r 进行积分可得到导电膜的电场强度公式:

$$E(r, t) = -\frac{j\omega_1 r B}{2}. \quad (6)$$

根据方程(4)和方程(6)可以得到任意时刻 t 和半径 r 的涡流损耗:

$$P(r, t) = |\sigma \pi r^2 d E^2(r, t)|, \quad (7)$$

方程(7)中, d 是导电膜的厚度,对半径 r 进行积分即可得到导电膜的径向截面内任意时刻的涡流热功率:

$$P(t) = \frac{1}{R} \int_0^R P(r, t) dr = \frac{\pi}{20} \sigma B^2 R^4 d \omega^2, \quad (8)$$

方程(8)中, r 为半径变量, R 为导电膜的半径;穿过导电膜的磁场由通电线圈提供,其中距离线圈中心 x 处的磁感应强度 B 可以近似的确定为^[19]

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r n S I}{2\pi (r_1^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (9)$$

式(9)中, μ_0 是真空磁导率, μ_r 是相对磁导率, n 是线圈的匝数, S 是圆线圈的横截面积, $I = I_0 e^{j\omega_1 t}$ 是

通入线圈的电流, ω_1 为输入信号的角频率; r_1 是圆线圈的横截面半径,如图2示。

从式(8)和式(9)中可以看出,导电膜的涡流热功率可以通过改变薄膜的物理参数来进行调节,也可以通过线圈的物理参数、薄膜与线圈之间的距离及线圈的电流等进行调节,有望拓展热声薄膜的应用领域。

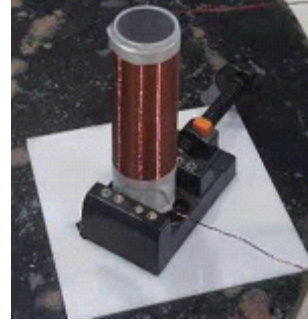


图2 线圈

Fig. 2 Coil

由于薄膜的厚度远小于磁场能达到薄膜的径向深度,所以在此不用考虑导电膜的集肤效应^[19]。

1.3 薄膜的温度振荡

温度振荡是热声信号产生的原因。目前,热成像仪无法捕捉到温度振荡,所以主要利用理论计算和间接实验方法来进行验证。温度振荡公式为^[16]

$$\nabla T = \frac{P}{A \cdot N}, \quad (10)$$

式(10)中,

$$N = \left[\left(\beta + k_g \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_g}} + k_b \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} \right)^2 + \left(k_g \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_g}} + k_b \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} + \omega c_s \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

式(11)中, $\beta = 23.2 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ ^[20] 为热散失率, ω 为声信号的角频率, α_g 和 α_s 分别为气体的热扩散系数和基底的热扩散系数, k_g 和 k_b 分别气体热传导系数和基底的热传导系数, c_s 为薄膜单位面积热容量,约为 $3.27 \times 10^{-2} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ 。在 300 K 的环境下,空气的相关参数如表1所示,基底的相关参数如表2所示。

表1 空气相关参数

Table 1 Air related constants

密度 $\rho_g/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容 $C_{p,g}/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	热传导系数 $k_g/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	声速 $v_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	热扩散系数 $\alpha_g/(\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	热容比 γ_g
1.16	1006	0.0262	347	2.25×10^{-5}	1.4

表2 基底材料相关参数
Table 2 Material parameters of ITO film

基底材料	比热容 $C_{p,g}/(\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3})$	热传导系数 $k_g/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	密度 $\rho_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热扩散系数 $\alpha_s/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	厚度 H/mm
PET	1172	0.15	1390	9.21×10^{-8}	0.05

2 理论计算与实验测试

上文已建立了氧化铟锡 (Indium Tin Oxide, ITO) 导电膜的磁-热-声效应理论模型, 给出了导电膜的输出声压公式。利用该公式对薄膜的声压进行计算, 计算结果列于下文的图中, 与实验结果对比分析。

2.1 实验测试

实验中的发声器是常用作太阳能电极材料的ITO导电膜(导电膜的厚度为 $1.2 \mu\text{m}$, 半径为 1.8 cm , 导电率为 $10^7 \text{ s}\cdot\text{m}$), 导电膜的基底为PET, 如图3所示。搭建了ITO导电膜声学实验平台, 实验系统如图4所示。薄膜圆面中心与线圈横截面中心重合, 当线圈通入交流电, 线圈产生交变磁场, 导电膜在交变磁场的作用下产生声信号, 并由传声器接收, 通过数据采集仪输入到DASP信号分析软件中进行处理。磁-热-声实验在半消声室内进行, 半消声室的本地噪声低于 20 dB(A) 。

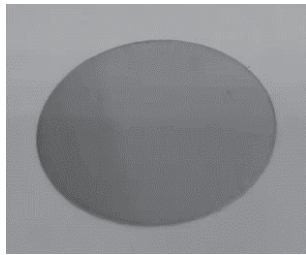


图3 ITO导电膜

Fig. 3 ITOconductive film

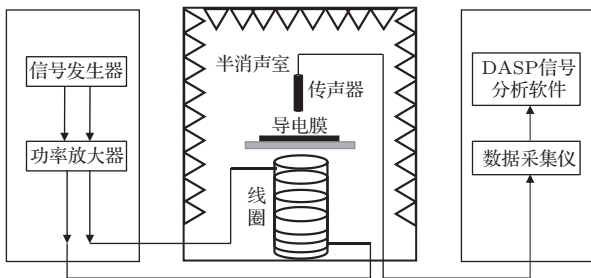


图4 实验系统分布图

Fig. 4 Distribution diagram of experimental system

现场测试如图5所示, 为了防止线圈产生干扰, 对其进行了相应的固定。交流信号由信号发生器提供给线圈, 让其产生交变的磁场, 以供导电膜完成无接触式发声。声信号的拾取点布置在薄膜的中轴线上。



图5 实验现场

Fig. 5 Field experiment diagram

2.2 结果分析

图6所示是导电薄膜的输出声压和涡流热功率的关系。实验中, 输入信号的频率选取 6000 Hz , 其瑞利距离为 4.3 cm , 本次的测距为 3.5 cm , 因此测得的是近场声压。将计算所需的参数(见表1和表2)代入公式(1), 求得薄膜声压的理论值, 列于图6中。从图6中可以分析得出, 实验值与理论值基本吻合, 薄膜输出声压和薄膜的涡流热功率呈线性关系; 随着线圈的输入电流增加, 导线和线圈的热损耗也在逐渐增加, 使得测试值与理论值之间的误差也逐渐变大, 说明实际的热声转换效率随输入电流增大而降低。

由薄膜声压公式(1)和公式(2)可知, 在远场区域薄膜输出声压与测点距离存在关系 $P_m \propto 1/r_0$, 输入频率为 4000 Hz 的交流信号, 其瑞利距离为 2.4 cm , 控制薄膜的输入功率不变, 测点的距离为 $1\sim 8 \text{ cm}$, 得到薄膜输出声压随测点距离变化如图7所示, 理论值与实验值的变化趋势基本一致, 吻合良好。

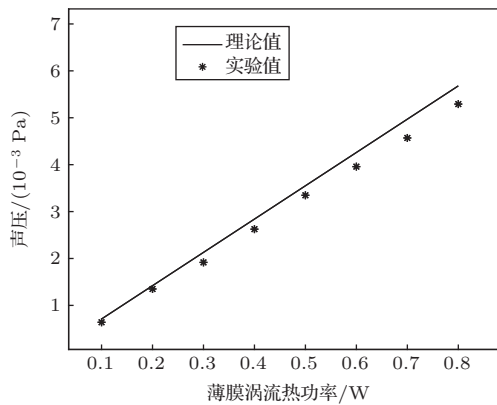


图6 薄膜的输出声压与薄膜涡流热功率的关系

Fig. 6 The relationship between film sound pressure and film eddy current heat power

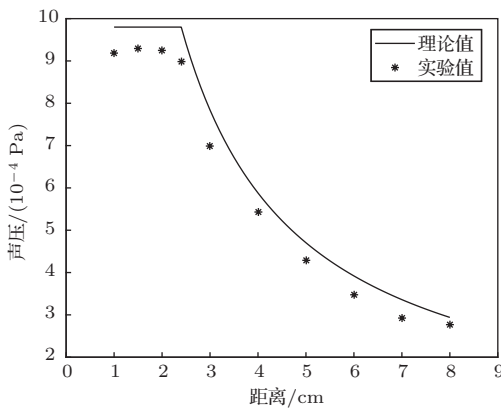


图7 薄膜的输出声压与测量距离的关系

Fig. 7 The relationship between the sound pressure of the membrane and the measurement distance

由于本次薄膜声压测量距离为1.5 cm, 所以将计算所需的参数代入式(1), 可得导电膜输出声压级随频率的变化如图8所示。虽然, 薄膜的测量值与理论值有些偏差, 但二者整体变化规律和趋势基本吻合。

上述测试值与理论计算值的对比结果验证了磁-热-声理论模型的正确性, 其中影响薄膜声信号的因素除了薄膜自身的物理参数, 交变磁场(热源)的存在使得控制薄膜声压的参数多元化, 更容易实现并优化无接触式热声效应。

当薄膜的周期性热源为交流电时, 电-热-声模型中薄膜温度振荡值随着交流信号频率增大而降低^[21]; 当热源为交变磁场时, 将计算所需的参数代入式(10), 可得温度振荡值随着频率增大而升高, 如图9所示。

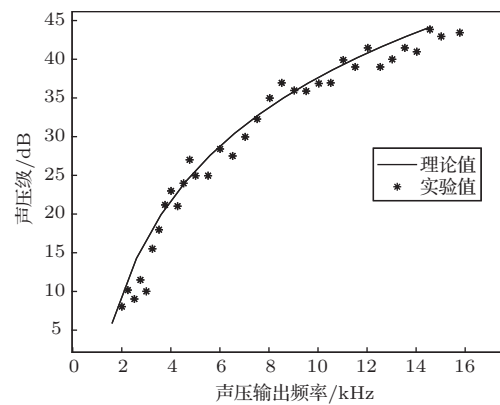


图8 ITO 导电膜输出声压级和频率的关系

Fig. 8 The relationship between output sound pressure level and frequency of ITO conductive film

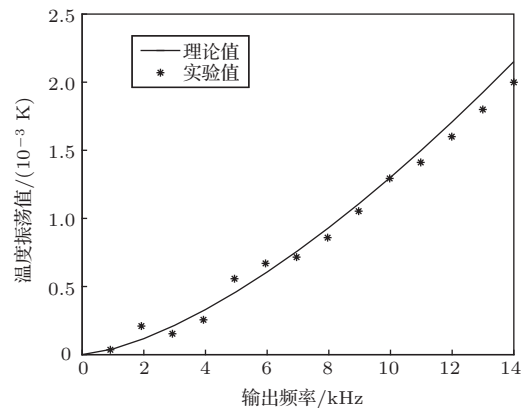


图9 温度振荡值随频率的变化关系(热源为交变磁场, 强度为36 mT)

Fig. 9 The relationship between the temperature oscillation value and the frequency (the heat source is an alternating magnetic field with an intensity of 36 mT)

由于温度振荡是热成像仪无法捕捉的, 所以之前的研究者都是以仿真试验来验证, 但仿真环境与真正实验环境有一定的差距。图9中用间接的实验方法来得到薄膜的温度振荡值, 即将薄膜输出声压的测试值代入磁-热-声模型下的声压公式(前面已经验证其正确性), 计算得出温度振荡值, 将其作为实验值与式(10)的理论值进行对比, 二者吻合较好, 进一步验证了磁-热-声理论模型的正确性。

3 薄膜输出声压的可控参数

与电-热-声、光-热-声模型相比, 在磁-热-声模型中, 当薄膜始终覆盖于交变磁场, 此时薄膜声压

级的可控参数不再是单一输入电信号或者光信号的强弱,其中提供交变磁场的线圈匝数 n 、薄膜与线圈中心之间的距离 x 以及线圈的横截面圆半径 r_1 等对薄膜声压级都有较好的调节效果,这对于薄膜扬声器的设计具有重要的指导意义。

3.1 线圈匝数 n 与薄膜声压级关系

从式(8)和式(9)中可以分析得出,线圈匝数 n 与薄膜的涡流热功率呈正相关,而薄膜的涡流热功率又与薄膜声压呈正相关,所以线圈匝数 n 也就间接地成为薄膜声压级的一个可控参数,两者的关系如图10所示,可看出薄膜声压级随着线圈匝数的增加而变大。从实际情况分析,当线圈匝数增加时,线圈的阻抗也会增加,线圈在输入相同电流时,电压升高,导致薄膜的热声转换效率降低。所以薄膜声压级可能不会随着线圈匝数增加一直变大,是否会产生拐点需要进一步的研究验证。

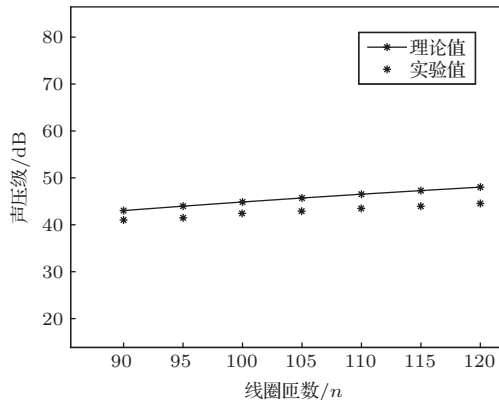


图10 线圈匝数与薄膜声压级的关系($r_0 = 3.5$ cm为测距, $f = 6000$ Hz为输入信号的频率)

Fig. 10 The relationship between the number of coil turns and the sound pressure level of the film ($r = 3.5$ cm is the distance measurement, $f = 6000$ Hz is the frequency of the input signal)

3.2 薄膜至线圈轴线中心的距离 x 与薄膜声压的关系

随着薄膜与线圈轴线中心的距离扩大,磁感应强度也在逐渐地变弱,所以导电膜的涡流热功率也在减小,从而薄膜的声压级也在降低,其关系如图11所示。

3.3 线圈的横截面圆半径 r_1 与薄膜声压级的关系

随着线圈横截面圆半径的增大,从式(9)中可以分析得出,磁感应强度随之降低,所以导电膜的输

入功率也在逐渐地变小,从而导致薄膜的声压级逐渐降低,其关系如图12所示。

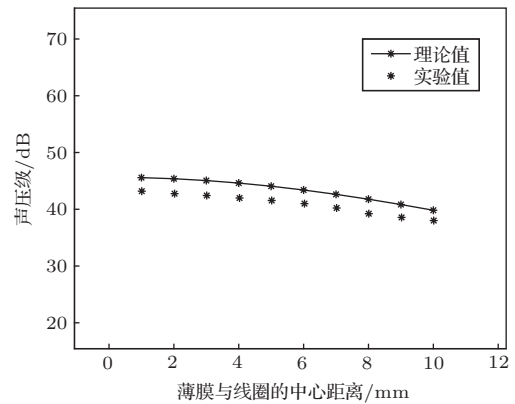


图11 薄膜至线圈轴线中心的距离 x 与薄膜声压级的关系($r_0 = 3.5$ cm为测距, $f = 6000$ Hz为输入信号频率)

Fig. 11 The relationship between the distance x between the film and the center of the coil axis and the sound pressure level of the film ($r = 3.5$ cm is the distance measurement, $f = 6000$ Hz is the frequency of the input signal)

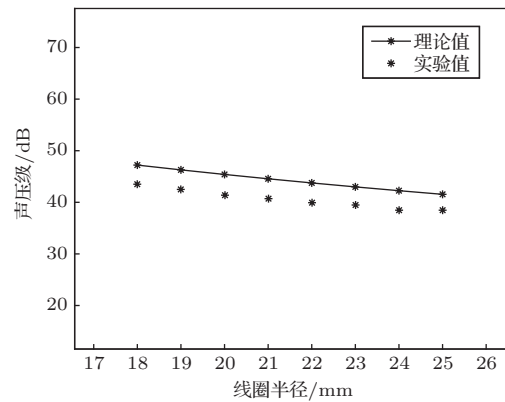


图12 线圈的横截面圆半径 r_1 与薄膜声压级的关系($r_0 = 3.5$ cm为测距, $f = 6000$ Hz为输入信号的频率)

Fig. 12 The relationship between the cross-sectional circle radius r_1 of the coil and the sound pressure level of the film ($r = 3.5$ cm is the distance measurement, $f = 6000$ Hz is the frequency of the input signal)

从图10~图12可以看出,薄膜声压的实验值与理论值变化趋势基本相同,实验值比理论值略低1~2 dB,产生误差的可能原因:(1)线圈的材质和结构未达到理论中的状态,本身存在损耗,使其并不能产生与理论相等的磁感应强度;(2)薄膜的材质和

结构未达到理论中的状态,甚至可能存在局部损坏,导致温度振荡下降或热声转换效率降低。

4 结论

基于优良导体在磁场下的涡流效应理论和固体的热声效应理论,构建了薄膜新的热声理论模型即磁-热-声理论模型,根据理论模型算出薄膜输出声压;测试了ITO导电膜在磁场下的输出声压并将其与理论计算值对比,分析了输出声压与输入功率、距离及频率之间的关系;最后,分析了影响薄膜声压级的可控参数,包括线圈的匝数 n 、薄膜至线圈轴线中心的距离 x 以及线圈的横截面圆半径 r_1 。研究结果表明:

(1) 薄膜产生声压的理论计算值与实验测试值基本吻合验证了磁-热-声理论模型的正确性。

(2) 温度振荡值随着频率增大而升高,理论值与间接实验值基本吻合,磁-热-声理论模型的正确性得到进一步验证。

(3) 在远场中薄膜输出声压与薄膜输入功率线性相关,随距离增加而降低,随频率升高而上升。

(4) 随着线圈匝数的增加,薄膜输出声压级上升;随着线圈横截面圆半径的增大,薄膜输出声压级降低;随着薄膜与线圈轴线中心距离的增大,薄膜输出声压级降低。

参 考 文 献

- [1] Arnold H D, Crandall I B. The thermophone as a precision source of sound[J]. *Physical Review*, 1917, 10(1): 22–38.
- [2] Shinoda H, Nakajima Y, Ueno K, et al. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon[J]. *Nature*, 1999, 400: 853–855.
- [3] Xiao L, Chen Z, Feng C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(12): 4539–4545.
- [4] Tian H, Ren T, Xie D, et al. Graphene-on-paper sound source devices[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(6): 4878–4885.
- [5] Suk J W, Kirk K, Hao Y, et al. Thermoacoustic sound generation from monolayer graphene for transparent and flexible sound sources[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(47): 6342–6347.
- [6] Tian H, Xie D, Yang Y, et al. Flexible, ultrathin, and transparent sound-emitting device using silver nanowires film[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(25): 253507.
- [7] Kim C S, Lee K E, Lee J M, et al. Application of N-doped three-dimensional reduced graphene oxide aerogel to thin film loudspeaker[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(34): 22295–22300.
- [8] Fei W, Zhou J, Guo W. Graphene foams: low-voltage driven graphene foam thermoacoustic speaker[J]. *Small*, 2015, 11(19): 2344–2344.
- [9] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light[J]. *American Journal of Science*, 1880, s3-20(118): 305–324.
- [10] 王谦, 谭华勇, 胡可. 基于激光超声转换技术的GIS内部缺陷检测方法[J]. *应用激光*, 2019, 39(4): 666–670.
Wang Qian, Tan Huayong, Hu Ke. GIS internal defect detection method based on laser ultrasonic conversion technology[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 666–670.
- [11] 贾广福, 郑宾, 郭华玲, 等. 基于激光超声透射波波包能量的缺陷定量检测研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(1): 158–163.
Jia Guangfu, Zheng Bin, Guo Hualing, et al. Quantitative detection of defects based on wave packet energy of laser ultrasonic transmission wave[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(1): 158–163.
- [12] 易宁波, 肖培双, 吴英鹏, 等. 石墨烯海绵的光声效应[J]. *科学通报*, 2014, 59(33): 3329–3336.
Yi Ningbo, Xiao Peishuang, Wu Yingpeng, et al. Photoacoustic effect of three dimensional graphene sponge[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(33): 3329–3336.
- [13] 赵继民. 石墨烯片中的光致发声现象[J]. *物理*, 2015, 44(9): 619–622.
- [14] Mao Y D, Lim C W, Li T Y. Multi-field coupling thermoacoustic radiation using free-standing nano-thin films in a static magnetic field[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2019, 42(6): 769–786.
- [15] Mao Y D, Lim C W, Li T Y, et al. Thermo-magnetic induced monodirectional periodic acoustic emission from free-standing nano-thin film[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 490: 115569.
- [16] 卞安华, 李双, 邢倩荷, 等. 考虑基底热传导的石墨烯薄膜的热声理论[J]. *声学学报*, 2017, 42(6): 755–761.
Bian Anhua, Li Shuang, Xing Qianhe, et al. Thermoacoustic theory of graphene films considering heat transfer of substrate[J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(6): 755–761.
- [17] Lim C W, Tong L H, Li Y C. Theory of suspended carbon nanotube thin film as a thermal-acoustic source[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(21): 5451–5461.
- [18] 刘慧芳, 王汉玉, 杨国哲, 等. 考虑磁场分布的精密磁致伸缩驱动器的涡流损耗特性研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(6): 814–819.
Liu Huifang, Wang Hanyu, Yang Guozhe, et al. Study on eddy current loss characteristics of precision giant magnetostrictive actuator considering magnetic field eddy[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(6): 814–819.
- [19] Kallel B, Bouattour G, Kanoun O, et al. Wireless power transmission via a multi-coil inductive system[M]//*Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks*, Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2018: 221–236.
- [20] Xiao L, Liu P, Liu L, et al. High frequency response of carbon nanotube thin film speaker in gases[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(8): 084311–084315.
- [21] 邢倩荷. 石墨烯薄膜热声扬声器热声特性分析及应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2018: 39–40.