

石墨烯电声换能器的设计与对比*

杨鹏,程先哲,张勇,刘冠军,邱静

(国防科技大学装备综合保障技术重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要:为了使石墨烯电声换能器获得最优性能,主要针对石墨烯热致发声器件和静电式发声器件进行了发声机理研究,通过理论建模和分析,得到了薄膜尺寸、厚度以及应力等结构参数对两种电声换能器的频率响应特性的影响规律。通过微纳加工制造方法设计和制备了一批不同结构参数下的电声换能器,并对这些器件进行了性能测试和对比分析,结果表明:薄膜厚度对热致电声换能器发声声压影响显著,即薄膜越薄,该电声换能器的发声声压越大;薄膜半径、厚度和应力对静电式电声换能器的频带影响较大,即薄膜半径越大,厚度越薄,应力越小,该电声换能器频带越宽。以上研究为优化选取石墨烯电声换能器的类型,优化设计结构参数,提升器件发声性能奠定了基础。

关键词:电声换能;石墨烯;热致发声;发声器件;频响曲线

中图分类号:TH14 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)04-171-06

Design and comparison of graphene electroacoustic transducer

YANG Peng, CHENG Xianzhe, ZHANG Yong, LIU Guanjun, QIU Jing

(Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to optimize the performance of graphene electroacoustic transducer, the research on the electroacoustic mechanism of graphene thermoacoustic sound device and graphene electrostatic sound device was conducted. Through theory modeling and analysis, the influence of structural parameters such as size, thickness and stress of graphene film on the frequency response characteristics of two kinds of electroacoustic transducers was obtained. Finally, a batch of electroacoustic transducers with different structural parameters were designed and fabricated. The performance test and comparison analysis of these devices show that the thickness of graphene film has a significant influence on the sound pressure of the thermoacoustic transducer, that is, the thinner the film is, the larger the sound pressure of the electroacoustic transducer is. The electrostatic transducer is influenced by the radius, thickness and stress of graphene film, that is, the corresponding film with larger radius, thinner thickness and smaller stress of the electrostatic transducer will have a wider frequency bandwidth. This research can lend support for the optimizing selection of graphene electroacoustic transducer, the optimizing design of structural parameters and the improvement of the device's sound performance.

Keywords: electroacoustic; graphene; thermoacoustic; sound device; frequency response curve

电声换能器是一种实现电能与声能相互转换的器件,其在声学定位、声波探测以及声学成像等国防工业领域应用十分广泛,尤其是在机械设备状态监控与故障诊断中具有重要的作用^[1-2]。石墨烯薄膜是一种新型纳米材料,具有质量轻、厚度薄、强度大等优异物理特性^[3],近几年将其应用于电声换能领域取得了重大研究突破^[4-9],分别研制出了基于热致发声原理的电声换能器和基于静电电容结构的电声换能器(以下分别简称石墨烯热致发声器件和静电式发声器件),获得了比商用发声器件更优的频谱特性,电声换能器件发展前景广阔。

2011年,Tian等^[4-6]首次研制出了石墨烯热致发声器件,充分利用石墨烯材料厚度薄、热导率高和热容量小等优异物理特性,实现了在超声频率范围内的宽频带特性。2013年,Zhou等^[7-8]将石墨烯材料用于构建静电式发声器件的振膜,研制出了小型发声单元,经测试,该发声单元在可听阈(20 Hz ~ 20 kHz)频率范围内具有宽频带特性,在高频段性能甚至超过了商用耳机。

石墨烯薄膜电声换能应用研究尚处于实验室探索阶段,目前对器件发声性能的影响因素认识并不全面^[10]。为了进一步优化器件发声性

* 收稿日期:2018-10-02

基金项目:国防科技大学科研计划资助项目(ZK18-03-52)

作者简介:杨鹏(1978—),男,湖北宜昌人,讲师,博士,E-mail:nudtyp7894@163.com

能,需要掌握石墨烯结构参数对器件发声频率特性的影响规律。本文以石墨烯热致发声器件和静电式发声器件为研究对象,旨在通过理论分析和实验测试的方法探究石墨烯结构参数对器件发声性能的影响规律,着重对石墨烯薄膜尺寸、厚度及应力等参数展开对比分析研究,从而为石墨烯发声器件性能优化设计提供理论和实验支撑。

1 器件原理与模型分析

1.1 热致发声器件原理模型

石墨烯热致发声器件基本工作原理如图 1 所示。

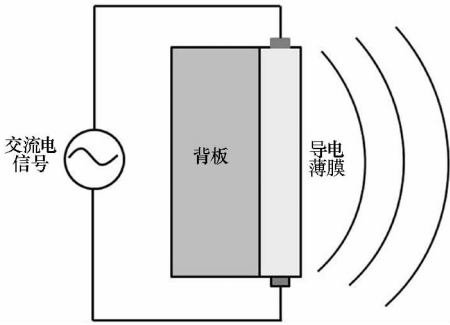


图 1 热致发声器件工作原理

Fig. 1 Operational principle of thermoacoustic sound device

石墨烯薄膜在交流电信号的作用下产生周期性的焦耳热,使薄膜表面的空气受热振动从而实现发声^[11-12]。

对于热致发声器件,目前普遍采用的声压模型如下^[13]:

$$p_g = \begin{cases} \frac{\gamma - 1}{c_0} \frac{e_g}{Me_s + e_g} q_0 e^{-j\frac{\omega x}{c_0}}, & d_s < 2\pi\mu_s \text{ (低频)} \\ \frac{\gamma - 1}{c_0} \frac{e_g}{e_s + e_g} q_0 e^{-j\frac{\omega x}{c_0}}, & d_s > 2\pi\mu_s \text{ (高频)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,下标 s 和 g 分别指代薄膜和空气,各参数的物理意义见表 1。

该声压模型反映出了石墨烯热致发声器件的频率特性:在低频段主要受到背板热损耗的影响,发声声压随频率呈线性增长;高频时发声声压趋于稳定,具有宽频带特性。对于单位面积的薄膜,石墨烯热致发声器件的发声性能主要受到石墨烯厚度的影响。

表 1 热致发声器件模型参数

Tab. 1 Model parameters of thermoacoustic sound device

| 参数 | 符号 | 单位 |
|--------|----------|---------------------------------|
| 输出声压 | p | Pa |
| 空气比热比 | γ | |
| 空气传声速度 | c_0 | m/s |
| 蓄热系数 | e | $J/(m^2 \cdot K \cdot s^{0.5})$ |
| 损耗因子 | M | |
| 热通量 | q_0 | W/m^2 |
| 声频率 | ω | rad/s |
| 测试距离 | x | m |
| 背板厚度 | d | m |
| 热扩散长度 | μ | m |

1.2 静电式发声器件原理模型

石墨烯静电式发声器件基本工作原理如图 2 所示^[7]。

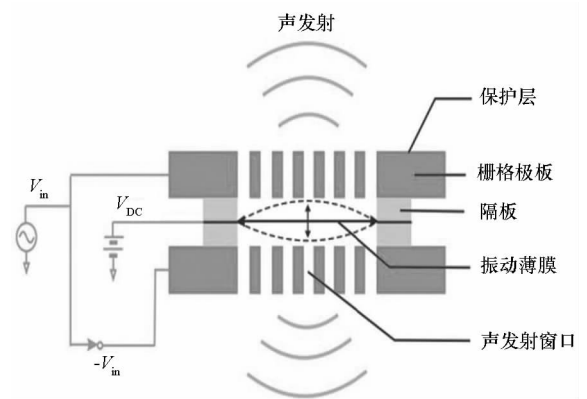


图 2 静电式发声器件工作原理^[7]

Fig. 2 Operational principle of electrostatic sound device^[7]

图 2 中,上下极板在交流电信号的作用下产生交变电场,使带电薄膜受到静电力驱动从而实现振动发声。

对于静电式发声器件,采用质量-弹簧-阻尼模型对薄膜振动过程进行等效分析,可求得器件声压模型如下^[14]:

$$p = c_0 \rho_0 \frac{|F|}{\left| \zeta - 1.56j \frac{\sigma t}{\omega r^2} + 0.27j \rho t \omega \right|} \quad (2)$$

式中各参数的物理意义见表 2。

该声压模型表明,石墨烯静电式发声器件的频率特性主要受到石墨烯薄膜半径、厚度以及应力的影响,为了获得更大的宽频带范围,即要求输出声压基本不随频率变化,需使得空气阻尼 ζ 在分母中占据主导,由此可知:低频段性能受到薄膜

表2 静电式发声器件模型参数

Tab.2 Model parameters of electrostatic sound device

| 参数 | 符号 | 单位 |
|--------|----------|------------------------|
| 输出声压 | p | Pa |
| 空气传声速度 | c_0 | m/s |
| 空气密度 | ρ_0 | kg/m ³ |
| 空气阻尼 | ζ | kg/(m ² ·s) |
| 静电驱动力 | F | N |
| 振膜半径 | r | m |
| 振膜厚度 | t | m |
| 振膜应力 | σ | Pa |
| 声频率 | ω | rad/s |

半径、厚度以及应力的共同作用,薄膜半径越大,厚度越薄,应力越小,对应器件低频特性越好,其中薄膜半径对器件性能的影响最为显著,而高频段主要受到薄膜厚度的影响,薄膜厚度越薄,高频特性越好。

2 器件设计与制作

分别对两种类型的石墨烯发声器件展开设计与制作,工艺过程包括石墨烯制备、石墨烯转移以及引线组装等,流程图如图3所示。

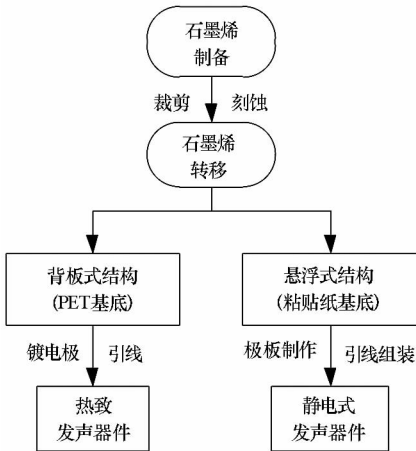


图3 石墨烯发声器件加工制作流程图

Fig.3 Process of graphene sound device

首先,采用化学气相沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)在镍基表面制备石墨烯薄膜,经原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)扫描测试(石墨烯厚度表征测试结果如图4所示,从上至下三条扫描线段对应的薄膜厚度分别为127 nm、150 nm和172 nm。注:严格来说10层以下的石墨薄膜才能称作石墨烯,由于本文制备的

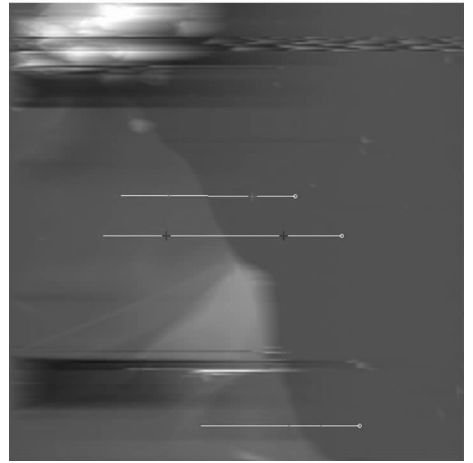


图4 薄膜厚度表征原子力显微镜图

Fig.4 AFM microscope of surface morphology of the graphene

薄膜厚度相对较厚,因此后文将说法改为薄膜),得到该薄膜平均厚度在150 nm左右;然后,裁剪得到特定大小的镍基薄膜,采用湿法刻蚀去除镍金属基底,再将薄膜转移至目标基底;最后,分别按照两种器件的结构进行引线 and 组装,得到对应的发声器件。

对于热致发声器件,在薄膜转移过程中直接将其转移至聚对苯二甲酸乙二醇酯(PolyEthylene Terephthalate, PET)基底上,在薄膜两端涂抹导电银胶并连接铜导线,待导电银胶晾干后即完成热致发声器件的制作。制备得到的热致发声器件原型如图5所示。

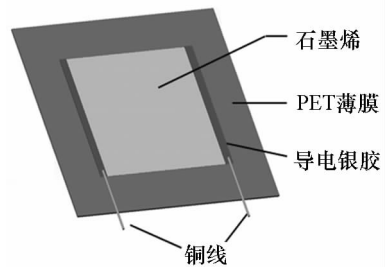


图5 热致发声器件原型

Fig.5 Prototype of graphene thermoacoustic sound device

对于静电式发声器件,首先将薄膜转移至中心带圆孔的粘贴纸上方,得到悬浮振膜结构;然后在硅片极板上通过光刻和刻蚀工艺得到通孔阵列结构,即完成导电栅格极板的制作;最后分别对振膜结构和栅格极板结构进行引线,选择PET薄膜作为隔板,按照图2中的三明治结构组装贴合,即制备得到静电式发声器件,器件

原型如图 6 所示。

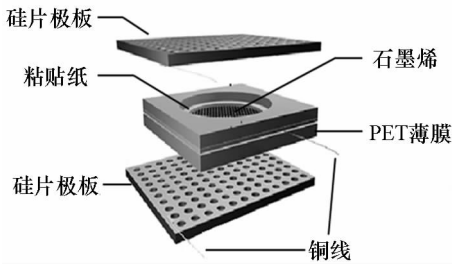


图 6 静电式发声器件原型

Fig. 6 Prototype of graphene electrostatic sound device

3 性能测试与对比分析

3.1 测试平台设计

在半消声室环境中对两种发声器件展开性能测试,以减小环境噪声对测试系统的干扰。在热致发声器件测试过程中,信号发生器产生交流信号,经功率放大器后直接连接薄膜两端,即可驱动器件发声,其测试平台结构如图 7 所示。对于静电式发声器件,信号发生器通过升压变压器进行电压放大,两端信号分别连接至上下两片极板,中间输出端与高压直流电源的负极相连,薄膜连接直流电源正极,如图 8 所示。

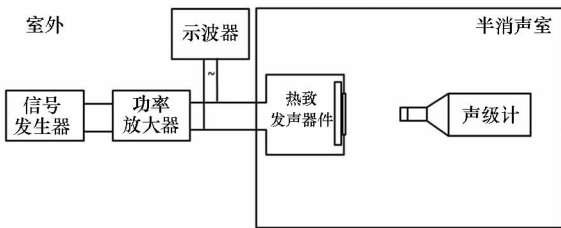


图 7 热致发声器件测试平台结构简图

Fig. 7 Diagram of graphene thermoacoustic sound device test platform

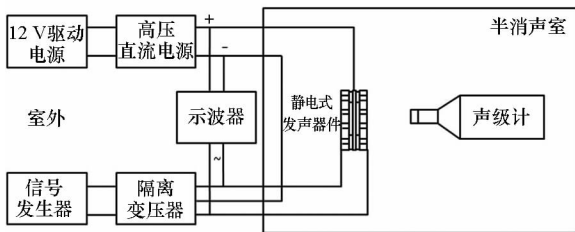


图 8 静电式发声器件测试平台结构简图

Fig. 8 Diagram of graphene electrostatic sound device test platform

为避免仪器设备在工作时产生噪声干扰,将其置于半消声室外与发声器件隔离,在室内用声级计对器件发声信号进行测试和记录,得到器件工作的频响曲线。

3.2 热致发声器件测试与分析

对不同尺寸及厚度的热致发声器件展开性能测试及对比分析,设置输入功率为 0.5 W,测试距离均为 1 cm,得到三种不同尺寸下的热致发声器件的频率特性曲线如图 9 所示,两种不同厚度的热致发声器件的频率特性曲线如图 10 所示。

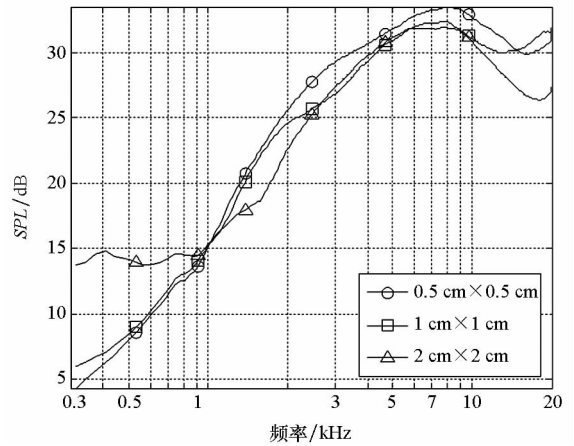


图 9 不同尺寸热致发声器件频率特性对比

Fig. 9 Comparison of frequency characteristics of thermoacoustic sound devices with different size

从图 9 可以看出,薄膜尺寸对器件发声声压基本没有影响,这是由于器件在热致发声过程中周围空气大多以球面波的形式向外扩散,使得器件发声声压与薄膜尺寸无关^[12]。在低频段薄膜尺寸 2 cm x 2 cm 对应的器件频响曲线出现异常,这是由于对测试曲线平滑滤波造成的。

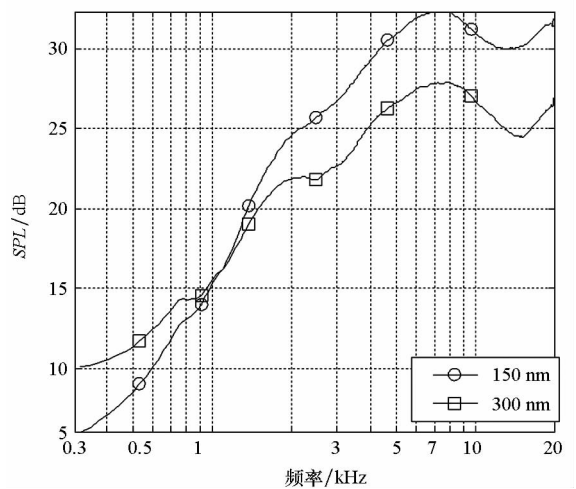


图 10 不同厚度热致发声器件频率特性对比

Fig. 10 Comparison of frequency characteristics of thermoacoustic sound devices with different thickness

从图 10 可以看出,在高频段厚度较薄的薄膜对应发声器件输出声压大于厚度较厚的器件,在低频段则相反。根据热致发声器件的工作原理^[13],频率较低时器件产生的热量波能够穿透薄

膜达到背板,薄膜厚度越薄,使得背板的蓄热效应更加显著,降低了器件热致发声的效率,导致发声声压偏小;在高频时热量波难以透过薄膜,器件发声主要受到薄膜单位面积热容的影响,薄膜厚度越薄,单位面积热容量越小,使得器件产生的热量更多地传递给空气使其振动发声,所以在高频段厚度越薄发声声压越大。

热致发声器件在高频段频响曲线非常平整,具有很宽的频带范围,结合文献中的测试数据,其宽频带上限超过 100 kHz(本文测试过程采用的声级计测试带宽上限为 20 kHz),在超声换能器领域具有潜在的应用价值。

此外,对不同基底厚度对应的热致发声器件展开了性能测试和对比分析,测试结果如图 11 所示。

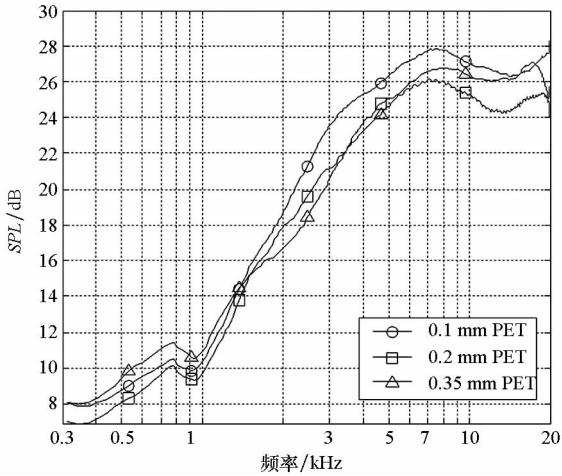


图 11 不同基底厚度热致发声器件频率特性对比
Fig. 11 Comparison of frequency characteristics of thermoacoustic sound devices with different base thickness

由对比结果可知,热致发声器件发声性能与基底厚度无关。

再综合图 9 ~ 11 可知,热致发声器件的转折频率均在 7 kHz 左右(频率曲线在 7 kHz 后出现明显的下降,在高频段出现波动是由于薄膜上不同区域声波传播到测试点时存在相位差而发生干涉导致的),与薄膜厚度以及基底厚度无关,结合热致发声器件理论模型分析可知:器件发声频率特性主要由薄膜材料的特性参数决定,发声声压主要受到薄膜厚度的影响。

3.3 静电式发声器件测试与分析

对于静电式发声器件,在测试过程中设置输入交流电信号幅值为 5 V,高压直流电压为 2 kV,测试距离为 1 cm,对不同薄膜半径及厚度对应的器件展开性能测试与对比分析,得到测试结果如

图 12 和图 13 所示。

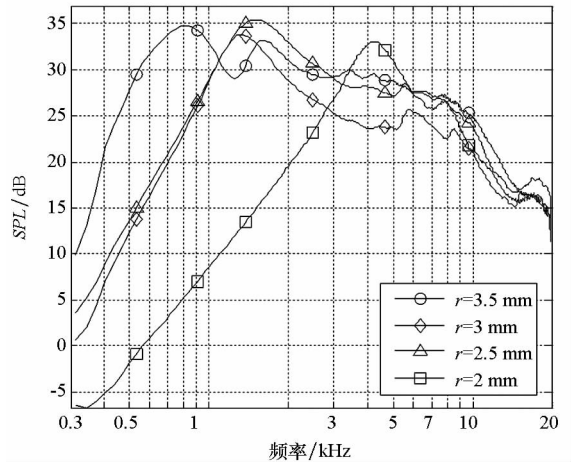


图 12 不同半径静电式发声器件频率特性对比
Fig. 12 Comparison of frequency characteristics of electrostatic sound devices with different size

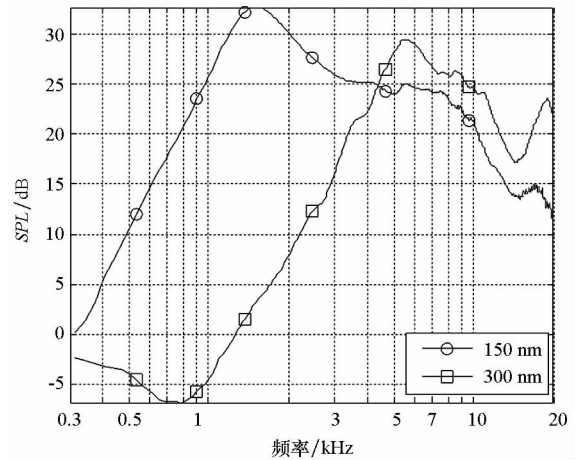


图 13 不同厚度对比静电式发声器件频率特性对比
Fig. 13 Comparison of frequency characteristics of electrostatic sound devices with different thickness

由图 12 可以看出,随着薄膜半径的增大,静电式发声器件频率的声压级峰值往低频漂移,表明对应器件低频特性越好,而高频特性基本不受薄膜半径的影响。结合静电式发声器件理论模型,该测试结果与理论分析的结果具有较好的一致性,验证了理论模型的准确性。

由图 13 可以看出,薄膜厚度越薄,对应器件低频特性越好,这与理论模型的分析结果相一致;而在高频段,薄膜厚度对器件性能的影响较小(高频段两条曲线的声压差异在测试误差范围内),经分析研究,该现象可能是由于在器件制作过程中振膜结构与隔板没有完全贴合,使得薄膜在振动过程中受到基底的制约作用而导致的。

在薄膜转移过程中,现有工艺难以对薄膜应力进行有效调控,无法制备得到不同应力的薄膜,对薄膜表面的应力测试也十分困难,因此在本文

实验过程中并未对不同薄膜应力开展对比研究。根据理论模型的分析结果,薄膜应力越小,对应的静电式发声器件低频特性越好,而高频特性基本不受薄膜应力的影响。

根据静电式发声器件的测试结果,薄膜半径 3.5 mm 对应的器件具有最优的频响曲线,考虑在 ± 5 dB 不平坦度误差范围内,其宽频带响应范围为 500 Hz ~ 10 kHz,表明了其在扬声器领域的潜在应用价值。

结合理论模型分析与器件性能测试的结果,对石墨烯静电式发声器件进行性能优化时,需采用半径大、厚度薄、应力小的薄膜;然而在器件的实际工作过程中,还应保证薄膜振动幅度小于隔板间距,以避免振膜与极板接触引发短路,导致器件发生损坏。

3.4 与商用耳机对比分析

将两种类型的发声器件与商用耳机(UiiSii 耳机和苹果耳机)展开性能对比分析,如图 14 所示。

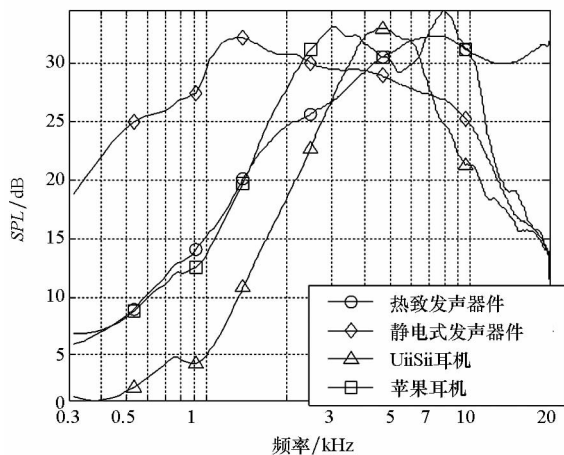


图 14 不同发声器件频率特性对比

Fig. 14 Comparison of frequency characteristics of different sound devices

由图 14 可以看出,本文研制的静电式发声器件在可听阈频率范围内频率特性优于商用耳机(宽频带范围更广),反映了其应用于扬声器领域的巨大优势;而热致发声器件在超声频段范围内(趋势)性能明显优于商用耳机,反映了其应用于超声换能器领域的巨大优势。

4 结论

基于石墨烯薄膜的电声换能应用有望带来电声换能器领域的革命,石墨烯热致发声器件和静电式发声器件分别在超声换能器和扬声器领域具有广阔的发展前景。本文基于两种类型的发声器件,通过理论分析和实验对比的方法,探究了薄膜结构参数对器件发声性能的影响规律,获得结论如下:

1) 热致发声器件频率特性主要受到薄膜的材料特性参数的影响,与薄膜尺寸、薄膜厚度、基底厚度等参数无关,发声声压主要受到薄膜厚度的影响,厚度越薄,其在宽频带范围内声压越大;

2) 静电式发声器件频率特性主要受到薄膜半径、厚度以及应力的影响,半径越大、厚度越薄、应力越小,其频带范围越宽,器件发声性能越好;

3) 热致发声器件在超声频段范围内具有宽频谱特性,适合应用于超声换能器领域;静电式发声器件在可听阈频率范围内具有宽频谱特性,适用于扬声器领域的电声换能应用。

参考文献 (References)

- [1] 叶顺忠, 叶希杰. 实用电声与微型扬声器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
YE Shunzhong, YE Xijie. Practical electroacoustics and micro speaker [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 丁玉兰, 石来德. 机械设备故障诊断技术[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1994.
DING Yulan, SHI Laide. Mechanical equipment fault diagnosis technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1994. (in Chinese)
- [3] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene [J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183-191.
- [4] Tian H, Ren T L, Xie D, et al. Graphene-on-paper sound source devices [J]. ACS Nano, 2011, 5(6): 4878-4885.
- [5] Tian H, Li C, Mohammad M A, et al. Graphene earphones: entertainment for both humans and animals [J]. ACS Nano, 2014, 8(6): 5883-5890.
- [6] Tian H, Xie D, Yang Y, et al. Single-layer graphene sound-emitting devices; experiments and modeling [J]. Nanoscale, 2012, 4(7): 2272-2277.
- [7] Zhou Q, Zettl A. Electrostatic graphene loudspeaker [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(22): 223109.
- [8] Zhou Q, Zettl A. Electrostatic graphene loudspeaker; WO/2014/100012[P]. WIPO/PCT, 2014-06-26.
- [9] Tian Y C, Tian H, Wu Y L, et al. Coherent generation of photo-thermo-acoustic wave from graphene sheets [J]. Scientific Reports, 2015, 5(2): 10582.
- [10] 田禾. 基于石墨烯的新型微纳电子器件研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
TIAN He. Graphene-based novel micro/nano devices [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [11] Xiao L, Chen Z, Feng C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers [J]. Nano Letters, 2008, 8(12): 4539-4545.
- [12] 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 & Vibration, 2013, 332(21): 5451-5461.
- [13] Hu H P, Zhu T, Xu J. Model for thermoacoustic emission from solids [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(21): 214101.
- [14] 程先哲, 杨鹏, 张勇, 等. 基于石墨烯薄膜的静电扬声器理论建模与仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1896-1901.
CHENG Xianzhe, YANG Peng, ZHANG Yong, et al. Theoretical modeling and simulation analysis of electrostatic loudspeaker based on graphene membrane [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(12): 1896-1901. (in Chinese)