

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108930

基于激光划刻的石墨烯发声器的研究*

赵 程,周佳成,张顺毅,王德波

(南京邮电大学集成电路科学与工程学院 南京 210023)

摘 要: 本文研究了一种基于激光划刻的石墨烯发声器。为了研究不同结构石墨烯发声器对输出性能的影响,本文设计了实心、粗网、中网、细网四种结构的石墨烯发声器。首先,建立了实心结构和网状结构的热声转换模型;然后,给出了激光划刻石墨烯的制备流程和扫描电镜表征;最后,实验测试了四种结构的石墨烯发声器的输出性能。实验结果表明,实心结构的输出性能最佳,在输入功率为 0.78 W、麦克风距离为 5 cm、激励频率为 20 kHz 的条件下,声压级达到 40.68 dB。研究发现在 0~0.78 W 的范围内,输入功率每增加 0.1 W,理论声压级平均提高 2.58 dB,实验声压级平均提高 2.48 dB,与理论模型基本符合。基于激光划刻的石墨烯发声器具有成本低、制备简单、声学性能好等优势,在生物、医疗、可穿戴电子设备等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 石墨烯发声器;激光划刻技术;热声转换模型;声压级;扫描电镜

中图分类号: TH89 TN62 TP212.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3030

Research on graphene sound generators based on laser scribing

Zhao Cheng, Zhou Jiacheng, Zhang Shunyi, Wang Debo

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A graphene sound generator based on laser scribing is studied in this article. To study the influence of graphene sound generators with different structures on the output performance, four structures of graphene sound generators with solid, coarse mesh, medium mesh and fine mesh are designed. First, the thermoacoustic conversion models of solid structure and mesh structure are formulated, respectively. Then, the fabrication process and SEM characterization of laser scribed graphene are given. Finally, the output performance of graphene sound generators with four structures is measured. Experimental results show that the solid structure has the best output performance. The maximum SPL reaches 40.68 dB in the conditions of 20 kHz with 5 cm distance when the input power is 0.78 W. It is found that in the range of 0~0.78 W, for every 0.1 W increase in input power. The theoretical SPL is increased by an average of 2.58 dB, and the experimental SPL is increased by 2.48 dB on average. These results are basically consistent with the theoretical model. The graphene sound generator based on laser scribing has advantages of low cost, simple preparation, good acoustic performance, which can be widely applied in the fields of biology, medicine, and wearable electronic devices.

Keywords: graphene sound generator; laser scribing technology; thermoacoustic conversion model; sound pressure level; SEM

0 引 言

相较于传统的扬声器,热声发声器具有稳定性好、无需机械振动元件、频率响应范围更宽等显著优势^[1-2]。为了产生较高的声压级,热声发声器需要满足 3 个条件^[3]: 1) 发声薄膜尽可能薄; 2) 发声薄膜的单位面积热容量 (heat capacity per unit area, HCPUA) 尽可能小; 3) 发声

薄膜的热导率尽可能大。随着石墨烯这一低单位面积热容量、高热导率^[4]的超薄二维材料的出现,以石墨烯为发声材料的热声发声器成为了研究热点^[5]。

基于热声效应的石墨烯发声器具有广泛的应用前景,其工作原理是交流电产生的焦耳热会导致周围空气周期性膨胀和收缩,从而辐射出声波,完成电-热-声过程的转换^[6]。近年来,国内外学者对石墨烯发声器的声学特性进行了一系列的研究与试验。2012 年, Suk 等^[7]采

收稿日期: 2021-11-25 Received Date: 2021-11-25

* 基金项目: 国家青年自然科学基金(61704086)项目资助

用化学气相沉积法(chemical vapor deposition, CVD)在铜箔上生长出单层石墨烯,并转移到玻璃、PET (polyethylene terephthalate) 和 PDMS (polydimethylsiloxane) 3种衬底上,发现 PDMS 衬底的石墨烯发声器效果最佳,在 0.5 W 输入功率和 3 cm 测量距离下,声压级最终在 40 dB 附近波动。2014 年, Tian 等^[8]首次使用激光诱导氧化石墨烯法制备石墨烯发声器,测试发现在交流激励为 5 V、直流偏置为 5 V、激励频率大于 20 kHz 的条件下,该发声器的声压级可以稳定在 40 dB。2017 年, Lee 等^[9]采用 CVD 法制备了双层石墨烯和石墨烯泡沫,实验发现双层石墨烯在 8 kHz 频率和 100 V 交流电压输入下,达到最大声压级 48.9 dB,石墨烯泡沫在 2.5 kHz 和 15 V 交流电压的条件下,声压级达到 59.1 dB。2020 年, Zhang 等^[10]制备了一种基于激光诱导石墨烯的柔性发声器,在 5 V 交流电和 5 V 直流电的共同作用下,该发声器在低频范围内出现较大毛刺,声压级最大可达 49 dB。2021 年, Rabbani 等^[11]通过激光刻划插入多壁碳纳米管(multiwalled carbon nanotubes, MWCNTs)的氧化石墨烯薄膜,制备了一种复合材料的石墨烯发声器,测试发现该发声器的最大声压级比纯石墨烯发声器提高了 11 dB。

从目前已经对石墨烯发声器的研究来看,大多研究石墨烯发声器的制备方法来改善其输出性能,且主要是采用 CVD 法和激光诱导氧化石墨烯法,这些制备方法普遍存在成本高、制备周期长的缺点。针对上述对石墨烯发声器研究工作的不足,本文将重点研究采用激光刻划聚酰亚胺(polyimide, PI)薄膜的方法制备石墨烯发声器,该方法以 PI 薄膜为原材料,无需旋涂氧化石墨烯,成本低,工艺流程简单,整个制备过程在 5 min 以内。以及研究不同石墨烯发声器的结构对输出性能的影响,对比了实心、粗网、中网、细网四种结构的石墨烯发声器的声学特性。建立了实心结构和网状结构的热声转换模型,得到了输入功率、激励频率、测试距离与输出性能的关系。最后,实验研究了四种不同结构的输出性能随频率的变化趋势。

1 工作原理

石墨烯发声器主要由石墨烯薄膜、PET 衬底、导电银浆电极和正弦信号发生器组成,其结构如图 1 所示。在发声过程中,电极两端的交流电会产生周期性的焦耳热,使发声器表面附近的空气产生周期性膨胀和收缩,从而辐射出声波,完成电-热-声过程的转换。瑞利距离 R_0 被定义为^[12]:

$$R_0 = A/\lambda \quad (1)$$

其中, A 是发声薄膜的面积, λ 是声波的波长。需要

注意的是,辐射出的声波在瑞利距离内以平面波的形式传播,在瑞利距离外以球面波的形式传播。

声压级(sound pressure level, SPL)和声压(sound pressure, SP)满足^[12]:

$$SPL = 20 \lg \left(\frac{SP}{SP_0} \right) \quad (2)$$

其中, $SP_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa, 表示正常人耳对 1 kHz 声音的最小听力极限。

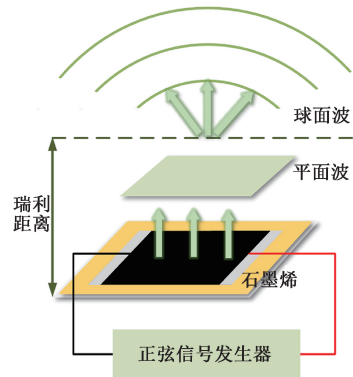


图1 石墨烯发声器的工作原理

Fig. 1 Working principle of the graphene sound generator

2 热声转换模型

在正弦交流激励下,点声源在空气中任意位置的声压满足^[13]:

$$SP_{dot}(r, f) = \frac{3 \times P \times f}{4 \times \pi \times c^2 \times r} \times E_{air} \times A_{air} \quad (3)$$

其中, P 是正弦激励输入功率的有效值, f 是正弦激励的频率, c 是空气中的声速, r 是点声源到测量位置的距离, E_{air} 是空气的能量分配系数, A_{air} 是空气中的声衰减系数。

对于空气中的低频声波,传播过程中的衰减可以忽略不计,即空气中的声衰减系数 $A_{air} \approx 1$ 。因此,式(3)可以简化为:

$$SP_{dot}(r, f) = \frac{3 \times P \times f}{4 \times \pi \times c^2 \times r} \times E_{air} \quad (4)$$

式中:空气的能量分配系数 E_{air} 被定义为^[13]:

$$E_{air} = \frac{e_{air}}{d_G \times \rho_G \times c_{p,G} \times \sqrt{2 \times \pi \times f} + e_{sub} + e_{air}} \quad (5)$$

其中, d_G 是石墨烯薄膜的厚度, ρ_G 是石墨烯薄膜的密度, $c_{p,G}$ 是石墨烯薄膜的比热容, e_{sub} 是衬底的蓄热系数, e_{air} 是空气的蓄热系数。

蓄热系数 e_{sub} 和 e_{air} 分别满足:

$$e_{sub} = \sqrt{k_{sub} \times \rho_{sub} \times c_{p,sub}} \quad (6)$$

$$e_{air} = \sqrt{k_{air} \times \rho_{air} \times c_{p,air}} \quad (7)$$
其中, k_{sub} 是衬底的热导, ρ_{sub} 是衬底的密度, $c_{p,sub}$ 是衬底的比热容; k_{air} 是空气的热导, ρ_{air} 是空气的密度, $c_{p,air}$ 是空气的比热容。

2.1 实心结构

本文制备的石墨烯发声器为矩形结构,不能视为点声源。因此,采用 Kirchhoff-Helmholtz 积分,将测量点 r 处的声压等效为所有点声源复振幅的叠加。实心结构的石墨烯发声器如图 2 所示,麦克风的垂直距离为 h ,发声薄膜长为 a 、宽为 b 。故实心结构石墨烯发声器在 r 处的声压满足:

$$SP_{solid}(r,f) = \left| \iint_S SP_{dot}(r,f) \times \exp\left(2\pi i \times \frac{r \times f}{c}\right) dx dy \right| \quad (8)$$

其中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$ 。
为了方便求解,将式(8)离散化:

$$SP_{solid}(r,f) = \left| \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n SP_{dot}(r_{ij},f) \times \exp\left(2\pi i \times \frac{r_{ij} \times f}{c}\right) \right| \quad (9)$$

将式(9)代入式(2),得到实心结构石墨烯发声器在 r 处的声压级:

$$SPL_{solid}(r,f) = 20\lg\left(\frac{SP_{solid}(r,f)}{SP_0}\right) \quad (10)$$

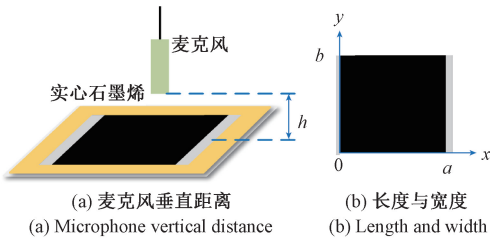


图2 实心结构石墨烯发声器的相关参数
Fig. 2 Related parameters of solid graphene sound generator

2.2 网状结构

网状结构的石墨烯发声器如图 3 所示,麦克风的垂直距离为 h ,发声薄膜长为 a 、宽为 b ,网格宽度为 c ,网格间距为 d 。因此,网状结构石墨烯发声器在 r 处的声压满足:

$$SP_{mesh}(r,f) = \left| \iint_D SP_{dot}(r,f) \times \exp\left(2\pi i \times \frac{r \times f}{c}\right) d\sigma \right| \quad (11)$$
其中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$ 。

将式(11)离散化:

$$SP_{mesh}(r,f) = \left| \frac{1}{u \times v \times w} \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v \sum_{k=1}^w SP_{dot}(r_{jk},f) \times \exp\left(2\pi i \times \frac{r_{jk} \times f}{c}\right) \right| \quad (12)$$

将式(12)代入式(2),得到网状结构石墨烯发声器在 r 处的声压级:

$$SPL_{mesh}(r,f) = 20\lg\left(\frac{SP_{mesh}(r,f)}{SP_0}\right) \quad (13)$$

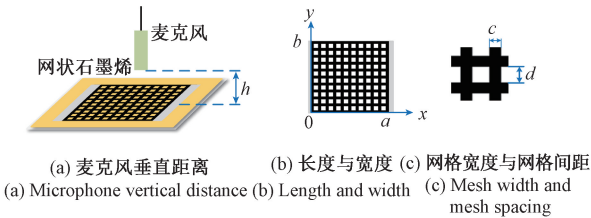


图3 网状结构石墨烯发声器的相关参数
Fig. 3 Related parameters of mesh graphene sound generator

2.3 参数分析

在 1 atm 和 20℃ 的环境下,石墨烯发声器的材料参数如表 1 所示^[6,14]。

表1 石墨烯发声器的材料参数(1 atm,20℃)
Table 1 Material parameters (1 atm,20℃) of the graphene sound generator

参数名称及单位	参数符号	参数数值
声速/(m·s ⁻¹)	c	343.238
石墨烯薄膜厚度/m	d_G	4×10^{-5}
石墨烯密度/(kg·m ⁻³)	ρ_G	2 200
石墨烯比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$c_{p,G}$	610
衬底热导/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	k_{sub}	0.14~0.2
衬底密度/(kg·m ⁻³)	ρ_{sub}	1 370~1 400
衬底比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$c_{p,sub}$	1 100~1 400
空气热导/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	k_{air}	0.025 6
空气密度/(kg·m ⁻³)	ρ_{air}	1.205
空气比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$c_{p,air}$	1 013

在恒温恒压条件下,石墨烯发声器的声压级主要取决于输入功率、激励频率和麦克风距离。由式(2)、(4)和(5)可知,石墨烯发声器的声压级与输入功率满足: $SPL \propto \ln P$,与激励频率近似满足: $SPL \propto \ln f^{1/2}$,与麦克风距离满足: $SPL \propto -\ln r$ 。具体来说,随着输入功率和激励频率的不断增大,声压级逐渐趋于饱和;随麦克风距离的不断增大,声压级呈现递减趋势。

3 制备与表征

3.1 制备流程

传统的 CVD 法存在工艺复杂、制备成本高等缺点,这极大限制了石墨烯的产业化发展。为了短周期、低成本的制备石墨烯,本文采用激光划刻技术制备石墨烯发声器。PI 薄膜具有成本低、耐高温、应用广泛等优势,在高温下会迅速碳化成多孔结构,是激光划刻技术制备石墨烯的最佳材料。本文选用沃尔润公司的 WER-9060 CO₂ 激光雕刻机制备石墨烯,激光打印速度设置为 200 mm/s,激光功率设置为 12.5 W。激光划刻石墨烯(laser scribed graphene, LSG)发声器的制备流程如图 4 所示,该过程可以在常温常压的空气环境中进行^[15]。不同结构石墨烯发声器的实物如图 5 所示。

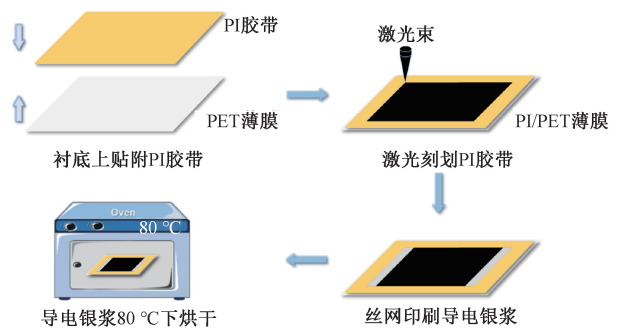


图 4 石墨烯发声器的制备流程

Fig. 4 Fabrication process of the graphene sound generator

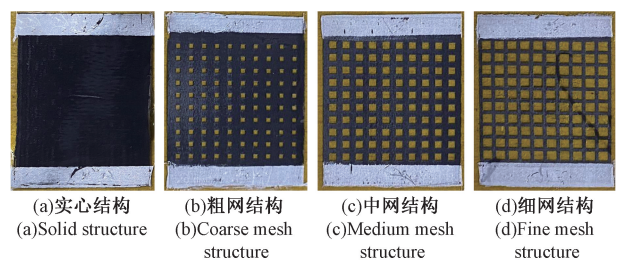


图 5 石墨烯发声器的实物图

Fig. 5 Physical photos of graphene sound generators

3.2 扫描电镜表征

石墨烯发声器表面微结构的扫描电镜表征如图 6 (a) 所示。激光划刻过程中产生的局部高温会导致 PI 膜热解,使其 C-O、C=O 和 N-C 键断裂,释放出含碳气体和硝酸气体。释放出的气体会产生局部压力,促使被高温碳化的 PI 膜形成多孔结构的石墨烯。多孔结构可以有效提升石墨烯的热声效率,从而提高石墨烯发声器

的声压级^[16]。如图 6 (b) 所示,激光划刻技术制备的石墨烯厚度约为 40 μm ,满足发声材料尽可能薄的要求。此外,没有完全热解的 PI 膜会将石墨烯层与 PET 衬底分离,形成 LSG/PI/PET 结构。

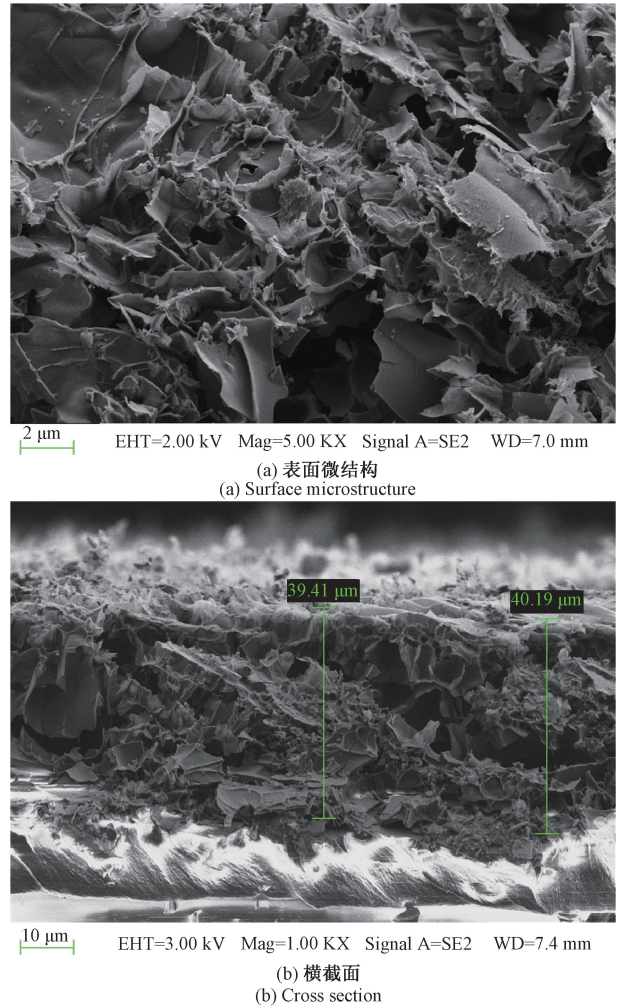


图 6 石墨烯发声器的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of the graphene sound generator

4 实验与结果

4.1 实验平台

石墨烯发声器的实验平台如图 7 所示,该实验平台由消音室、测量台、麦克风、PC 端、音频测试系统和电声测试软件组成。消音室的六面墙壁全部均匀覆盖吸波劈尖,测量台固定在地网上,石墨烯发声器放置在测量台上。在声音信号测量时,PC 端控制音频测试系统 Keyconnect 进行发声薄膜的正弦信号扫频,与麦克风相连的电声测试软件 TrustSystem 进行声音信号的分析 and 处理。

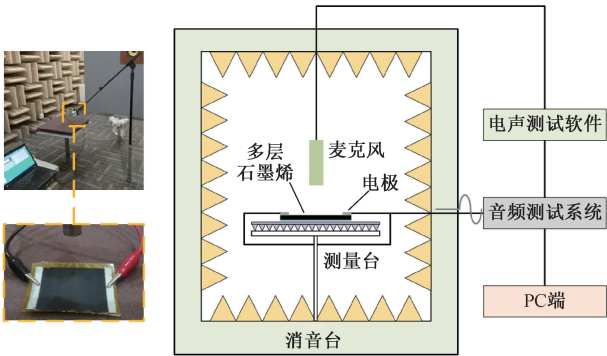


图7 石墨烯发声器实验平台

Fig. 7 Experimental platform of the graphene sound generator

为探究石墨烯发声器结构对输出性能的影响,本文测试并对比了实心、粗网、中网、细网四种结构的声压级与频率的关系。四种不同结构的石墨烯发声器均由激光划刻技术制备而成,面积均为 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ 。对于粗网、中网、细网三种结构,控制网格间距为 3 mm ,设置粗网结构的网格宽度为 5 pt (1.76 mm),中网结构的网格宽度为 3.5 pt (1.23 mm),细网结构的网格宽度为 2 pt (0.706 mm)。在相同的正弦激励下,石墨烯阻值不同会导致输入功率产生差异($P=U^2/R$, U 是正弦激励的有效值)。其中,实心结构石墨烯的电阻约为 $26\text{ }\Omega$,粗网结构石墨烯的电阻约为 $32\text{ }\Omega$,中网结构石墨烯的电阻约为 $57\text{ }\Omega$,细网结构石墨烯的电阻约为 $162\text{ }\Omega$ 。

4.2 不同结构的测试结果

在正弦激励有效值为 4.5 V 和麦克风距离为 5 cm 的条件下,4种不同结构石墨烯发声器的理论与实验结果如图8所示。随着激励频率的不断增加,4种结构石墨烯发声器的声压级都呈现递增趋势,这与理论分析相一致。其中,实心结构的声学特性最优,在 20 kHz 时声压级达到最大的 40.68 dB ,粗网结构在 19.9 kHz 时为 38.05 dB ,中网结构在 19.8 kHz 时为 35.06 dB ,而细网结构在 19.8 kHz 时仅为 31.91 dB 。从图5可以直观的看出,细网结构石墨烯发声器的有效面积最小,因而有效点声源远少于实心结构,这导致细网结构的声压级最低,同时在低频段存在大量毛刺现象。通过对比四种不同结构的声压级曲线,发现增加发声薄膜的有效面积、提高激励频率可以有效抑制声音信号的毛刺。

4.3 实心结构的测试结果

在麦克风距离为 5 cm 的条件下,实心结构的石墨烯声压级与输入功率、频率的关系如图9所示。在低频、低输入功率的情况下,实心结构的声压级存在明显毛刺,此时声压级不到 20 dB ,受环境噪声影响较大。当声压级大于 30 dB 时,环境影响可以忽略,曲面相对光滑。在输入功率为 0.78 W 、激励频率为 20 kHz 时,实心结构的声压

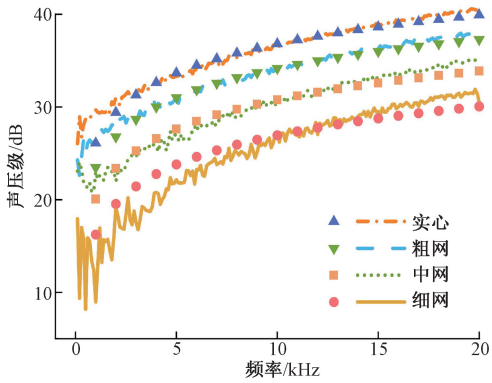


图8 4种不同结构石墨烯发声器的声压级(点表示理论值,实线表示实验值)

Fig. 8 SPL of graphene sound generators with four different structures (Dots represent theoretical values, and solid lines represent experimental values)

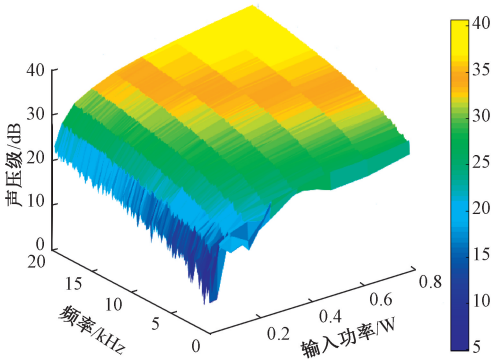


图9 声压级与输入功率、频率的关系

Fig. 9 Relationship of SPL with input power and frequency

级达到最大的 40.68 dB 。由式(4)和(5)可知,声压级对输入功率的变化最为敏感,在 $0\sim 0.78\text{ W}$ 的范围内,输入功率每增加 0.1 W ,理论声压级平均提高 2.58 dB ,实验声压级平均提高 2.48 dB ,误差小于 5% ,与理论模型基本符合。

在输入功率为 0.78 W (正弦激励有效值为 4.5 V)的条件下,实心结构的石墨烯声压级与麦克风距离、频率的关系如图10所示。在低频段范围内,声压级曲面存在一定毛刺。随着麦克风距离的不断增大,声压级呈现递减趋势。 20 kHz 的声波在 $5\sim 15\text{ cm}$ 的麦克风距离内衰减了 2.53 dB ,满足声压随着传播距离增加而减小的理论。

将本发声器与其他制备方法的热声发声器进行比较,如表2所示。可以发现,在声压级近似的情况下,激光划刻制备方法可以得到周期短、成本低的石墨烯发声器,使其更加容易产业化。

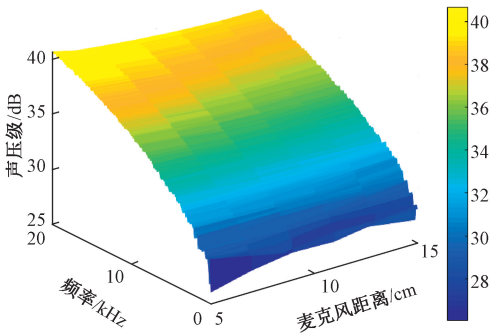


图 10 声压级与麦克风距离、频率的关系
Fig. 10 Relationship of SPL with microphone distance and frequency

表 2 本发声器与其他热声发声器的比较
Table 2 Comparison of this sound generator with other thermoacoustic sound generators

文献	SPL/dB	激励条件	制备方法	成本
7	40	0.5 W, 3 cm	CVD	高
9	48.9	100 V _{AC} , $f=8$ kHz	CVD	高
10	49	5 V _{AC} +5 V _{DC}	激光诱导	高
8	40	5 V _{AC} +5 V _{DC} , $f>20$ kHz	激光诱导	高
本文	40.68	0.78 W, 5 cm, $f=20$ kHz	激光划刻	低

5 结 论

本文研究了不同结构石墨烯发声器对输出性能的影响,分别建立了实心结构和网状结构的热声转换模型。实验结果表明,实心结构的声压级特性最佳,在 20 kHz 时声压级达到最大的 40.68 dB。研究发现在 0~0.78 W 的范围内,输入功率每增加 0.1 W,理论声压级平均提高 2.58 dB,实验声压级平均提高 2.48 dB,与理论模型基本符合。基于激光划刻的石墨烯发声器由于成本低、制备简单、声学性能突出,可用于制备利用热声效应发声的新型耳机。这种新型耳机价格合理、稳定性好、无需振动发声,具有广泛的商业应用价值和发展前景。

参考文献

[1] 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 X Z, YANG P, ZHANG Y, et al. Theoretical modeling and simulation analysis of electrostatic

loudspeaker based on graphene membrane [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1896-1901.
[2] XIAO L, CHEN Z, FENG C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers [J]. Nano Letters, 2008, 8 (12): 4539-4545.
[3] ARNOLD H D, CRANDALL I B. The thermophone as a precision source of sound [J]. Physical Review, 1917, 10(1): 22-38.
[4] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. Nano letters, 2008, 8(3): 902-907.
[5] TAO L Q, TIAN H, LIU Y, et al. An intelligent artificial throat with sound-sensing ability based on laser induced graphene [J]. Nature communications, 2017, 8(1): 1-8.
[6] WANG D B, HE X Y, ZHAO J, et al. Research on the electrical-thermal-acoustic conversion behavior of thermoacoustic speakers based on multilayer graphene film [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (24): 14646-14654.
[7] 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.
[8] TIAN H, CUI Y L, YANG Y, et al. Wafer-scale flexible graphene loudspeakers [C]. 2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2014: 556-559.
[9] LEE K R, JANG S H, JUNG I. Analysis of acoustical performance of Bi-layer graphene and graphene-foam-based thermoacoustic sound generating devices [J]. Carbon, 2018, 127: 13-20.
[10] ZHANG P, TANG X, PANG Y, et al. Flexible laser-induced-graphene omnidirectional sound device [J]. Chemical Physics Letters, 2020, 745: 137275.
[11] RABBANI M, SYED A W, KHALID S, et al.

Fabrication and characterization of a thermophone based on laser-scribed graphene intercalated with multiwalled carbon nanotubes [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 2874.

[12] QIAO Y, GOU G, WU F, et al. Graphene-based thermoacoustic sound source [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(4): 3779-3804.

[13] DASCHEWSKI M, BOEHM R, PRAGER J, et al. Physics of thermo-acoustic sound generation [J]. *Journal of applied Physics*, 2013, 114(11): 114903.

[14] XING Q H, LI S, FAN X L, et al. Influential factors on thermoacoustic efficiency of multilayered graphene film loudspeakers for optimal design [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(12): 125107.

[15] ANIS B, ABOUELSAYED A, SAWY A M, et al. Tuning the plasmon resonance and work function of laser-scribed chemically doped graphene [J]. *Carbon*, 2017, 120: 44-53.

[16] FEI W, ZHOU J, GUO W. Low-voltage driven graphene foam thermoacoustic speaker [J]. *Small*, 2015, 11(19): 2252-2256.

作者简介



赵程,现为南京邮电大学本科生,主要研究方向为石墨烯热声发声器。
E-mail: 1278428620@qq.com
Zhao Cheng is an undergraduate at Nanjing University of Posts and Telecommunications.

His main research direction is the graphene thermoacoustic speakers.



王德波(通信作者),2007 年于河北科技大学获得学士学位,分别在 2010 年和 2012 年于东南大学 MEMS 教育部重点实验室获硕士和博士学位,现为南京邮电大学副教授,同时在北京大学攻读博士后。主要研究方向为石墨烯热声发声器。

E-mail: wdb@njupt.edu.cn

Wang Debo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hebei University of Science and Technology in 2007, and received his M. Sc. degree and the Ph. D. degree in Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education from Southeast University in 2010 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunication and a post-doctor at Nanjing University. His research interest is the graphene thermoacoustic speaker.