Design and Simulation of Two-Mode Ceramic-Graphene Pressure Sensor*

GAO Yajie[1,2], LI Chen[1,2], MIAO Jing[3]*
(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
2.State Key Laboratory of Electronic Measurement technology, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
3.School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu 215009, China)

Abstract: Targeting at the limitation of single-mode pressure sensor in measurement, a dual-mode ceramic-graphene pressure sensor is proposed. It is a kind of suspended LC resonant pressure sensor composed of graphene film attached to alumina substrate, which can simultaneously realize two measurement modes of capacitance and resistance. Through the simulation of COMSOL software, the influence of the main size of the sensor on its mechanical characteristics is explored, and the reasonable structure of the sensor is designed. The linear analysis of the simulation results shows that the linear error of the capacitance mode is 3.52%, the sensitivity is 0.933 GHz/MPa, the linear error of the resistance mode is 3.61%, and the sensitivity is 1.87 MΩ/MPa in the pressure range of 0~1 MPa, and the linear degree of the resistance mode is better in the pressure range of 0~0.2 MPa.

Key words: sensor technology; multimodal pressure measurement; COMSOL; graphene film; alumina ceramics
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.003

双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的设计与仿真*

高雅洁[1,2], 李 晨[1,2], 苗 静[3]*
(1.中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2.中北大学电子测试技术国家级重点实验室, 山西 太原 030051; 3.苏州科技大学机械工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 针对单一模式压力传感器在测量中存在的局限性, 提出一种双模态陶瓷-石墨烯压力传感器。该传感器是以石墨烯薄膜为敏感元件, 氧化铝陶瓷为基底构成的一种悬浮型 LC 谐振式压力传感器, 可同时实现电容、电阻两种测量模式。通过 COMSOL 软件的模拟仿真, 探究了传感器主要尺寸对其性能的影响, 并以此为依据设计出合理的传感器结构。对传感器的仿真结果进行线性化分析, 得出该传感器在 0~1 MPa 压力范围内, 电容模式的线性误差为 3.52%, 灵敏度为 0.933 GHz/MPa, 电阻模式的线性误差为 3.61%, 灵敏度为 1.87 MΩ/MPa, 并且在 0~0.2 MPa 压力范围内电阻模式具有更优的线性度。

关键词: 传感器技术; 多模态压力测量; COMSOL; 石墨烯薄膜; 氧化铝陶瓷
中图分类号: TP212 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-1940-07

压力传感器应用领域广泛, 涉及铁路交通、智能建筑、航空航天、军工、石化等行业。而高温高压环境下石油勘探开采, 锅炉、燃气轮机燃烧过程控制等工作, 对压力传感器的耐高温性提出了更高的要求。在各类耐高温材料中, 陶瓷和石墨烯因其稳定的物理性质和良好的机械性能受到学术界广泛关注。

2007 年, Bunch 等[1]将石墨烯薄膜覆盖于空腔上, 成为第一个石墨烯压力传感器的原型。2013 年, Smith 等[2]结论性地验证了悬浮石墨烯的压阻效应, 为石墨烯薄膜在压力传感器中的应用铺垫了基石。随后, 各类石墨烯压力传感器层出不穷[3-6]。郑士瑜等[3]提出一种结构为上层“膜+凸柱”与下层“十字梁”的高频响 MEMS 石墨烯压力传感器, 用于恶劣环境下爆炸冲击波压力的测量, 在满量程 60 MPa 情况下, 十字梁根部位置处石墨烯的应变最高可达 0.259%。康裕等[4]制备了一种基于纳米孔的宽量程的石墨烯压力传感器, 在 0~20 MPa 压力范围内具有 9.35×10^{-5} MPa^{-1}的高灵敏度, 重复性与线性度良好且迟滞较小。

陶瓷材料多应用在厚膜压力测试技术中, 结合 LC 谐振原理, 可制成陶瓷厚膜谐振式压力传感器, 成为高温传感器中发展较快的一支。Radosavljevic 等[7]提出一种采用标准低温共烧陶瓷(LTCC)技术制作的无线嵌入式谐振压力传感器, 工作在 MHz 范

项目来源: 国家自然科学基金项目(52275552)
收稿日期: 2024-09-02 **修改日期**: 2024-11-04

围内，埋藏式传感器的设计和 LTCC 材料使该传感器能够在高温和化学腐蚀性环境中得以应用。熊继军等[8]采用独特的丝网印刷牺牲层工艺，避免了电容嵌入腔在层压或烧结过程中的变形，从而提高了传感器的性能。李晨等[9]提出一种通过检测传感器谐振频率的变化来完成压力测试的氧化铝陶瓷高温压力传感器，避免了温度对无线信号传输的影响，可实现 600 ℃ 高温环境下 1 bar 到 5 bar 范围内压力的原位测试。

然而，单一模式的压力传感器往往会在滞后性、抗电磁干扰性、线性或温度稳定性等方面有局限性，从而限制压力传感器的应用。Zhou 等[10]在弹性体中嵌入三个微通道，制成了一种多模态的液体金属压力传感器，可以通过检测电阻和电容分别感知压力。高福临[11]通过模板牺牲法、表面改性、真空辅助浸渍、双向冷冻等成型工艺构筑了一系列具有优异热电和压阻特性的三维多孔复合材料，制备了一高性能、多功能的温度/压力双模态传感器。这种多模态的压力传感器，能更好地适应复杂多变的测量环境，具有巨大的应用潜力。

为扩大 LC 谐振式压力传感器的应用范围，提高其性能，增强其结构稳定性，本文提出一种基于 LC 谐振原理和石墨烯压阻效应的双模态陶瓷-石墨烯压力传感器，用一个传感器和检测电路实现电容、电阻两种检测模式下压力的测量。

1　传感器的构造

氧化铝陶瓷具有良好的机械和电气性能[12]。石墨烯耐高温[13]、强度高，杨氏模量大[14]、导电率高[15]、与氧化物基底之间有很强的粘附性[16]、对于气体具有不可穿透性[17]、具有线性的压阻特性[18]和 20%的可逆弹性变形特性[19]，用做高温压力传感器的敏感薄膜有良好的耐高温性和力学敏感特性。本文所述的双模态陶瓷-石墨烯压力传感器是由陶瓷基底和石墨烯薄膜构成的，其构造如图 1 所示。

陶瓷基底由三片氧化铝陶瓷片层压烧制而成。底部第一层上表面和顶部第三层上表面分别贴附一

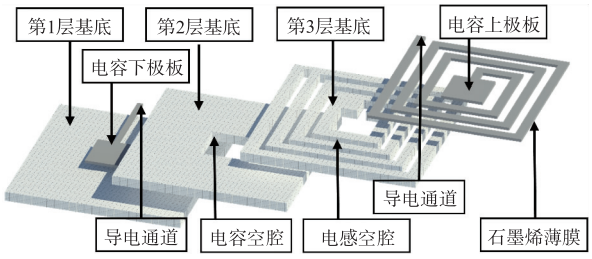

图 1　双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的构造示意图

方形石墨烯薄膜作为电容器的两电极，其中贴附于第一层瓷片的下电极为固定电极，贴附在第三层瓷片的上电极为压力敏感元件；第二、三层陶瓷基底中部切割出柱形通道做电容器空腔；在第三层瓷片上的电极周围环绕石墨烯薄膜做成的电感线圈，既作为谐振电路的电感部件，又作为电阻模式中的压力敏感元件。线圈下设置螺旋形空腔，形成一种悬浮结构，为石墨烯薄膜线圈受压变形提供空间。在线圈始端和电容器下电极处分别引出导电通道，并与位于第二、三层瓷片之间的电引线连接，至此在传感器上形成了一个电容与电感串联的 LC 谐振电路。

2　传感器的测量原理

双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的测量原理如图 2。传感器等效电路为 LC 串联谐振电路，回路的等效阻抗 Z 和阻抗辐角 φ 可表达为：

$$Z=R+\mathrm{j}(X_L-X_C) \tag{1}$$

$$\varphi=\arctan\frac{X_L-X_C}{R} \tag{2}$$

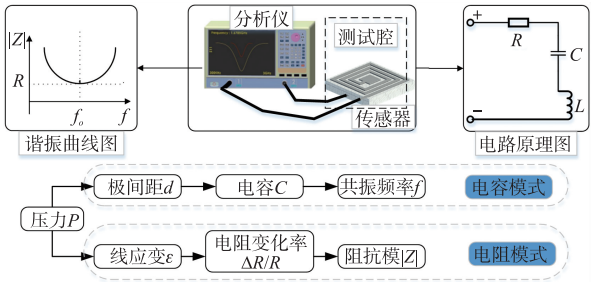

图 2　双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的测量原理图

当 LC 串联电路中的电感感抗 X_L 和电容容抗 X_C 相等时发生谐振，此时电路的阻抗模达最小值 R，相位差为 0，频率为谐振频率 f_0：

$$|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=R \tag{3}$$

$$\varphi=\arctan\frac{X_L-X_C}{R}=0 \tag{4}$$

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{5}$$

电路的品质因数为：

$$Q=\frac{U_C}{U}=\frac{U_L}{U}=\frac{1}{\omega_0 CR}=\frac{\omega_0 L}{R} \tag{6}$$

通过阻抗分析仪，可以测量出电路的谐振频率和阻抗幅值，进而由压力-电容以及压力-电阻的关系得到被测压力值，形成了双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的两种压力测量方式。

①电容模式

将传感器置于有压环境中，作为电容上极板的

石墨烯薄膜充当压力敏感元件受压变形,电容器两极板间距变小,电容值 C 改变。

$$C_0=\frac{\varepsilon_0 a^2}{t_g+t_m/\varepsilon_r} \tag{7}$$

$$C=C_0\times\frac{\tan h^{-1}\sqrt{d_0/(t_g+t_m/\varepsilon_r)}}{\sqrt{d_0/(t_g+t_m/\varepsilon_r)}} \tag{8}$$

式中:C_0 为传感器未受到压力时的电容值,d_0 为薄膜变形挠度,a 为方形电容敏感膜的边长,t_m 为敏感薄膜厚度,t_g 为电容空腔厚度,ε_0 和 ε_r 分别为真空介电常数和石墨烯的相对介电常数。

传感器中电感值 L 不受压力影响,计算如下式所示:

$$L=0.000\ 002\ 96\frac{N^2[(d_{\text{out}}+d_{\text{in}})/2]}{1+2.75[(d_{\text{out}}-d_{\text{in}})/(d_{\text{out}}+d_{\text{in}})]} \tag{9}$$

式中:N 为电感线圈的圈数,d_{in} 和 d_{out} 分别为电感线圈的内外径。

由式(5)可知,当外界压力改变时,谐振频率 f_0 只随电容 C 的变化而变化,因此谐振频率可以反应被测压力的大小。这种通过改变电路中电容大小的测压方式为电容模式。

②电阻模式

不同于常规的 LC 谐振式压力传感器,双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的电感线圈相当于一个螺旋形的悬浮石墨烯薄膜。传感器受压时,由于石墨烯的压阻效应,传感器的电阻值发生变化,且传感器的电阻变化率与薄膜受压产生的线应变成正比[2]。设石墨烯的应变系数 GF 为 2.4[20],则有:

$$\frac{\Delta R}{R}=\text{GF}\times\varepsilon \tag{10}$$

式中:$\Delta R/R$ 为电阻变化率,ε 为薄膜线应变。

由式(3)和式(6)可知,压力输入下的电阻值会直接反映在阻抗模曲线的极值上,和传感器的初始电阻对比后,即可得到电阻变化率。这种通过分析阻抗曲线峰值得到传感器电阻变化率,进而求得被测压力的测量模式即为双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的电阻模式。

两种模式基于不同的测量原理,使压力同时引起传感器电容和电阻的变化,实现了传感器的双模态工作。

3 传感器的尺寸设计

本文利用 COMSOL 软件对传感器进行仿真,探讨电容宽度、电感宽度等参数对传感器性能的影响,得出合理的传感器结构参数。在软件中设置石墨烯的杨氏模量为 1.0 TPa,泊松比为 0.16,密度为 2 200 kg/m^3[21]。石墨烯薄膜边缘设置为固定约束,并考虑值为 0.1 N/m 的初始预应力[21]。考虑到石墨烯的厚度远小于形变位移,故需考虑薄膜变形时的几何非线性,否则仿真结果会出现较大的偏差[18]。

3.1 电容尺寸对传感器性能的影响

用 COMSOL 软件模拟了 5 种尺寸的方形电容在 0~1 MPa 压力下的形变,得出其中心最大位移,即薄膜受压后挠度随压力变化规律,见图 3。由模拟结果可知:膜片在 0~0.2 MPa 压力范围内形变明显,当压力大于 0.2 MPa 后,变化趋势相对变缓,且膜片半径越小,变化越不明显。根据传感器测量原理,单位压力引起的膜片挠度越大,传感器灵敏度越高。考虑到需要提高传感器灵敏度,宜增大膜片半径,但电容薄膜尺寸一方面受到石墨烯转移工艺限制,另一方面存在悬空石墨烯薄膜塌陷、破裂或吸附在空腔底端的风险。同时,电容尺寸也会影响电容和电感值的大小,进一步影响谐振频率范围。综上所述并结合多尺寸模拟,设计方形电容空腔边长为 120 μm,上方贴附的石墨烯薄膜边长为 220 μm,即空腔四周各留 50 μm 供薄膜与基底吸附。

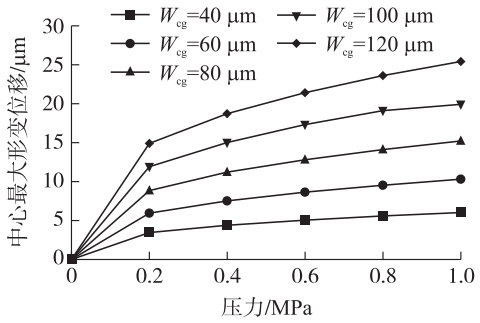

图 3 方形膜片中心最大形变位移随压力变化规律

设计膜片(W_{cg} = 120 μm)在 0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa 压力下的形变云图见图 4,由图可知,受压后方形膜片的形变位移由四周向中心逐渐增大,并在膜片中心处出现最大位移。模拟得 1 MPa 压力下方形膜片的最大形变位移为 25.4 μm,进一步可以确定电容空腔高度为 30 μm,为膜片变形提供充足的空间。

3.2 电感尺寸对传感器性能的影响

双模态陶瓷-石墨烯压力传感器的电感膜片及其空腔呈方形螺旋型。螺旋电感线圈的结构参数,包括圈数、线圈间距、线圈宽度等,一方面决定电容模式中电感值 L 的大小,进而影响谐振频率范围,另一方面影响了传感器在电阻模式下的工作性能。本文仅探讨电感线圈参数对传感器压阻性能的影响。

取一段 L 形石墨烯膜片作为研究对象，模拟不同压力下的形变，结果如图 5 所示。在长度方向上，电感形变是均匀的，同样呈现中间高两边低的形态，在线圈折角处形变会略有增大。

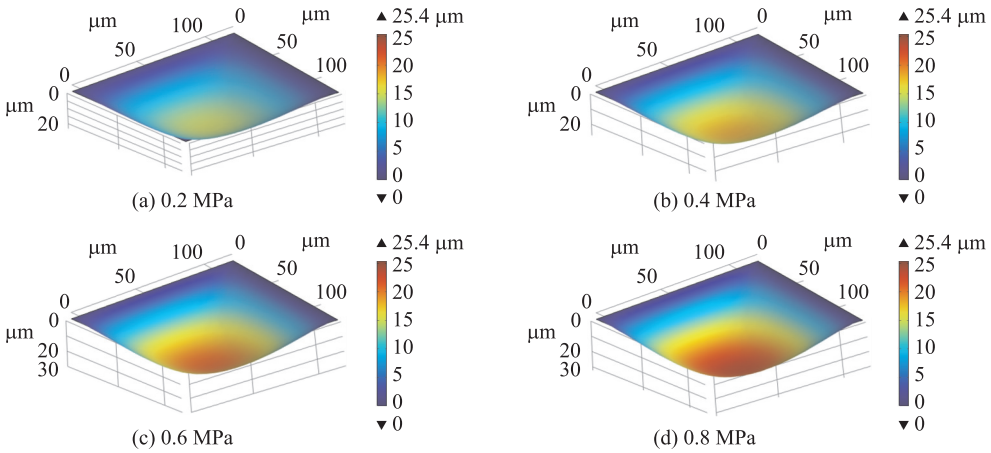

图 4　方形膜片在不同压力下的形变位移云图

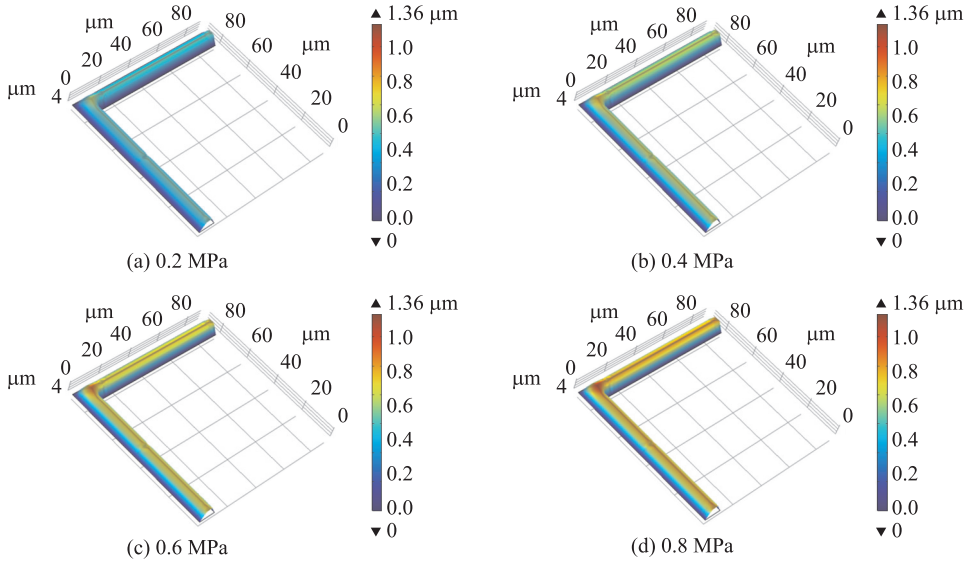

图 5　螺旋形膜片在不同压力下的形变位移云图

如图 6 所示，分别计算 12 μm 宽 L 形石墨烯膜片直线段处和折角处的线应变。得出 1 MPa 压力下折角处线应变为 2.51%，直线段最大线应变为 3.40%，故膜片最大线应变选取直线段的最大线应变。

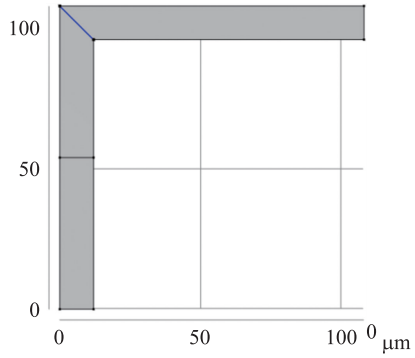

图 6　线应变取值示意图

计算不同边长下 12 μm 宽 L 形石墨烯膜片的中心最大形变位移，结果见表 1。可见线圈边长对线应变的影响微小，且边长越大这种影响越小，即随着边长的增加最大形变位移将趋于定值。在本设计中，石墨烯薄膜线圈的边长均远大于线圈宽度（即使是最内圈的膜片，边长也已达到 240 μm），且线圈宽度是均匀不变的。因此线圈各圈的形变分布规律与大小基本相同，最大线应变近似相等，可选择任意一段作为研究对象并代表整个线圈。

在 COMSOL 软件中模拟了电感空腔宽度分别为 4 μm、6 μm、8 μm、10 μm、12 μm 的石墨烯膜片受压变形后产生的线应变，结果如图 7 所示，可知线圈宽度越大，膜片受压后产生的线应变就越大。由石墨烯的压阻测量原理可知，膜片线应变越大，传感器灵敏度就越高。相比于 4 μm～10 μm，将宽度由

10 μm 增加到 12 μm 后线应变增量较小,因此,可选用宽度为 10 μm 的电感空腔,并沿空腔长边各伸出 5 μm,使石墨烯膜片与基底吸附紧密并密封空腔。空腔高度根据折角处的最大形变设置为 2 μm。

表 1 不同边长和压力下 12 μm 宽 L 形石墨烯膜片中心最大形变位移 单位:μm

压力/MPa	边长/μm						
	24	36	48	60	72	84	96
0	12	12	12	12	12	12	12
0.2	12.167	12.145	12.142	12.141	12.138	12.135	12.135
0.4	12.265	12.23	12.227	12.225	12.222	12.218	12.218
0.6	12.346	12.302	12.297	12.295	12.291	12.286	12.286
0.8	12.417	12.365	12.36	12.358	12.353	12.347	12.347
1.0	12.482	12.423	12.417	12.414	12.409	12.402	12.402

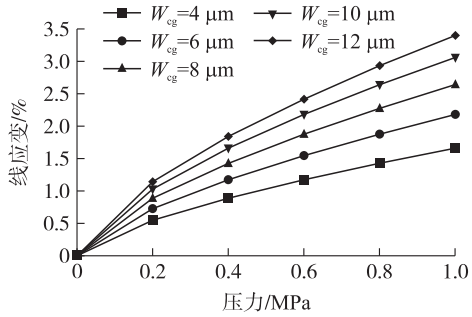

图 7 螺旋形膜片线应变随压力变化规律

综上,确定传感器的结构尺寸,如图 8 及表 1 所示。本次设计的传感器整体尺寸为 1 060 μm×1 060 μm×45 μm,相比于传统的陶瓷厚膜压力传感器,体积明显缩小,实现了 LC 谐振传感器微型化。

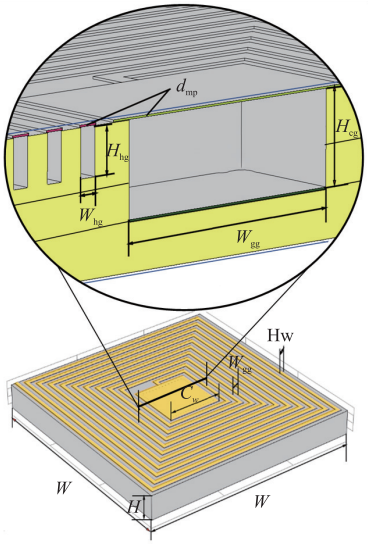

图 8 双模态陶瓷-石墨烯压力传感器结构尺寸示意图

4 传感器的性能模拟及分析

在确定好传感器的结构尺寸后,得出 0~1 MPa 压力范围内电容量与电阻变化率随压力变化关系曲线(图 9)。电容量和电阻变化率均随压力的增大而增大并接近正比关系,电容在 0~0.1 MPa 内有较明显的升高。

表 2 双模态陶瓷-石墨烯高温压力传感器结构参数

参数	数值
传感器宽度 W	1 060 μm
传感器厚度 H	45 μm
电容膜片宽度 C_w	220 μm
电感膜片宽度 H_w	20 μm
电感间距 W_{gg}	20 μm
石墨烯膜片厚度 d_{mp}	0.335 nm
单层陶瓷基底厚度 H_{tc}	15 μm
电感膜片下空腔高度 H_{hg}	2 μm
电感膜片下空腔宽度 W_{hg}	10 μm
电容膜片下空腔高度 H_{cg}	30 μm
电容膜片下空腔宽度 W_{cg}	120 μm
电感圈数 N	10

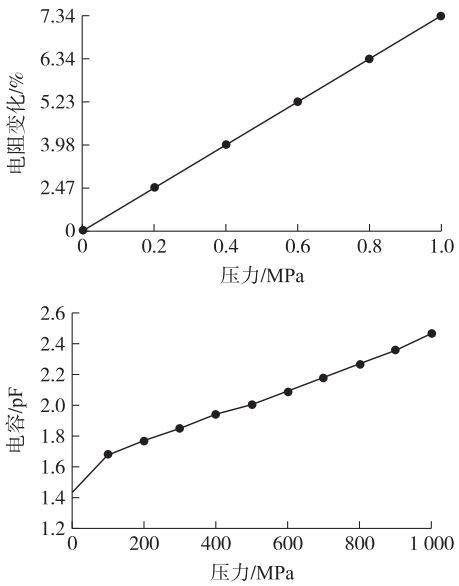

图 9 0~1 MPa 电容、电阻变化率随压力变化关系曲线

进一步得出 0~1 MPa 压力范围内谐振频率与阻抗模随压力变化关系曲线,并进行线性拟合(图 10)。

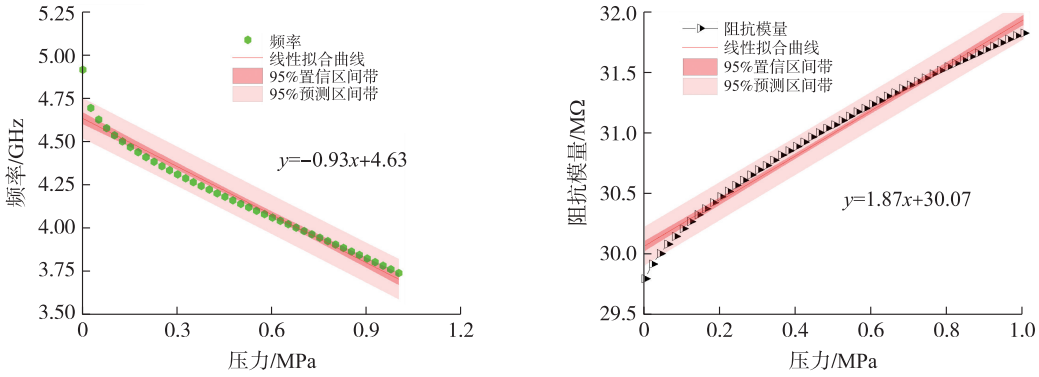

图 10　0~1 MPa 谐振频率、阻抗模值与压力的变化关系及拟合曲线

由图可知，在 0~1 MPa 测量范围内，谐振频率在 3.5 GHz~5 GHz 范围内变化，随压力增大而逐渐减小，线性误差为 3.52%，灵敏度为 0.93 GHz/MPa；阻抗幅值在 29 MΩ~32 MΩ 范围内变化，随压力的增大而逐渐增大，线性误差为 3.61%，灵敏度为 1.87 MΩ/MPa。可见，在 0~1 MPa 内，两种测量模式的线性度差别不大。

两种测量模式下，变量均在 0~0.2 MPa 压力区间变化较快且呈非线性，在 0.2~1MPa 压力区间变化较平缓且线性度比较高。这与石墨烯薄膜受压变形的力学特性有关，石墨烯薄膜从无载荷到载荷逐渐增大的过程中，形变开始发生时变化明显，后逐渐变缓。分别对 0~0.2MPa 压力测量范围内两种测量模式的关系曲线线性化，得到图 11。可见在 0~0.2MPa 范围内，电阻模式的线性度更好，对此而言，电阻模式更适合小压力环境下的测量，其测量稳定性更好。

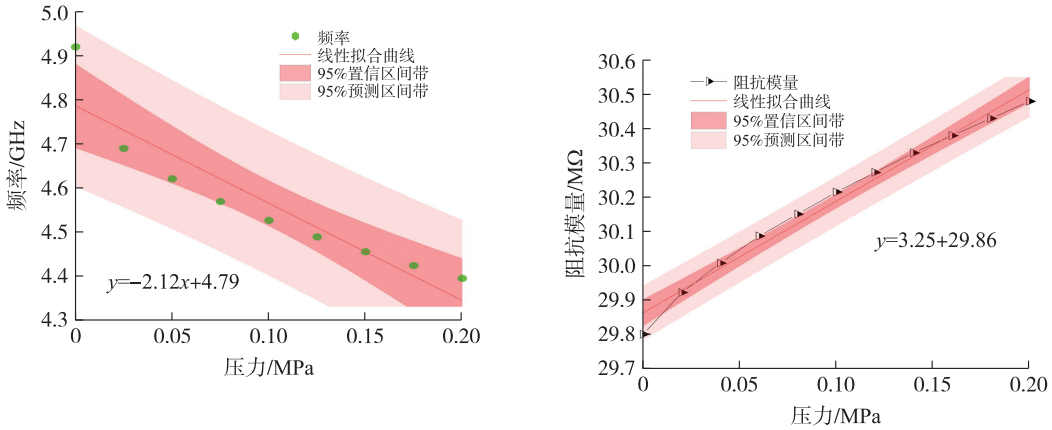

图 11　0~0.2 MPa 谐振频率、阻抗模值与压力的变化关系及拟合曲线

5　结论与展望

本文提出了一种新型压力传感器，基于 LC 谐振式陶瓷厚膜压力传感器模型，将陶瓷厚膜敏感元件和电感线圈改造为悬浮型石墨烯薄膜，在保留原传感器耐高温的特性基础上，实现了电容、电阻的双模态测量。经过仿真分析，这种双模态陶瓷-石墨烯压力传感器在 0~1 MPa 压力测量范围内具有良好的线性度和灵敏度，并且电阻模式在 0~0.2 MPa 压力测量范围内显现出了较电容模式更好的线性特性。

在之后的研究中，可以继续完善该传感器的其他性能研究，如温度对其性能的影响，在更高压力水平下结构稳定性的改善等，可从多方面探究两种测量模式的差异。

参考文献：

[1] Bunch J S，van der Zande A M，Verbridge S S，et al. Electromechanical Resonators from Graphene Sheets[J]. Science，2007，315(5811)：490-493.

[2] Smith A D，Niklaus F，Paussa A，et al. Electromechanical Piezoresistive Sensing in Suspended Graphene Membranes [J]. Nano Letters，2013，13(7)：3237-3242.

[3] 郑士瑜，侯文，王俊强，等. 高频响 MEMS 石墨烯压力传感器设计[J]. 仪表技术与传感器，2023(1)：12-16.

[4] 康裕，王俊强，曹咏弘，等. 基于纳米孔的宽量程石墨烯压力传感器[J]. 微纳电子技术，2024，61(5)：85-91.

[5] Liu Q，Zhang Z，Ding J，et al. Modeling and Simulation of the Capacitive NEMS Pressure Sensor Based on Suspended

Graphene Membranes[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2809(1): 012003.

[6] More S, Naik A. Graphene Resonant Pressure Sensor with Ultrahigh Responsivity-Range Product[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2024, 34(7): 075006.

[7] Radosavljevic G J, Zivanov L D, Smetana W, et al. A Wireless Embedded Resonant Pressure Sensor Fabricated in the Standard LTCC Technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(12): 1956-1962.

[8] Xiong J J, Li Y, Hong Y P, et al. Wireless LTCC-Based Capacitive Pressure Sensor for Harsh Environment[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 197: 30-37.

[9] 李晨, 谭秋林, 张文栋, 等. 基于氧化铝陶瓷的电容式高温压力传感器[J]. 传感技术学报, 2014, 27(8): 1038-1042.

[10] Zhou X P, Liu C, Zhao K. A Novel Liquid Metal Sensor with Three Microchannels Embedded in Elastomer[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(4): 045011.

[11] 高福临. 柔性温度/压力双模态传感器的制备及其多功能应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.

[12] Ackstaller T, Lorenz L, Nieweglowski K, et al. Combination of Thick-Film Hybrid Technology and Polymer Additive Manufacturing for High-Performance Mechatronic Integrated Devices[C]//2019 42nd International Seminar on Electronics Technology, Wroclaw, Poland, 2019: 1-6.

[13] Ushio S, Yoshii A, Tamai N, et al. Wide-Range Temperature Dependence of Epitaxial Graphene Growth on 4H-SiC(0 0 0 -1): A Study of Ridge Structures Formation Dynamics Associated with Temperature[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318(1): 590-594.

[14] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.

[15] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene[J]. Solid State Communications, 2008, 146(9-10): 351-355.

[16] Koenig S P, Boddeti N G, Dunn M L, et al. Ultrastrong Adhesion of Graphene Membranes[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(9): 543-546.

[17] Bunch J S, Verbridge S S, Alden J S, et al. Impermeable Atomic Membranes from Graphene Sheets[J]. Nano Letters, 2008, 8(8): 2458-2462.

[18] Pereira V M, Castro Neto A H, Peres N M R. Tight-Binding Approach to Uniaxial Strain in Graphene[J]. Physical Review B, 2009, 80(4): 045401.

[19] Liu F, Ming P, Li J. Ab Initio Calculation of Ideal Strength and Phonon Instability of Graphene under Tension[J]. Physical Review B, 2007, 76(6): 064120.

[20] 代岳. 悬浮石墨烯压力传感器原理研究与设计制造[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.

[21] Frank I W, Tanenbaum D M, Van Der Zande A M, et al. Mechanical Properties of Suspended Graphene Sheets[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2007, 25(6): 2558-2561.

高雅洁(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为微纳传感与测量,gaoyajie1978@yeah.net;

苗 静(1987—),女,博士,苏州科技大学讲师。目前从事的研究内容有:新型微米纳米器件、动态测试技术、微纳机电系统等,jmiao@mail.usts.edu.cn。