

# 基于非晶碳膜压阻效应的 MEMS 压力传感器研究

马鑫<sup>1</sup>, 张琪<sup>1</sup>, 郭鹏<sup>2</sup>, 同笑珊<sup>1</sup>, 赵玉龙<sup>1</sup>, 汪爱英<sup>2,3</sup>

(1.西安交通大学 a.机械工程学院 b.机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;  
2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a.中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室  
b.浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201;  
3.中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

**摘要:**目的 研究非晶碳膜的压阻性能和机理,并将其作为压敏电阻应用于 MEMS 压力传感器敏感电路中。  
方法 使用直流溅射工艺制备非晶碳膜压敏薄膜材料,对典型样品进行内部组分和电学、力学、温度等性能测试和研究,使用有限元方法进行器件设计仿真,借助 MEMS 加工工艺完成非晶碳膜压力传感器芯片的加工,最后进行器件级别的测试和分析。  
结果 在 0~1 MPa 范围内,压力传感器芯片的灵敏度为 9.4  $\mu\text{V}/\text{kPa}$ ,输出信号的非线性度为 5.57% FS;对压敏电阻进行 -70~150  $^{\circ}\text{C}$  范围内的温度性能研究,其阻值与温度之间表现出较强的线性关系,且在 -20~150  $^{\circ}\text{C}$  段,线性度更强,表明非晶碳膜压敏材料在高温段应用时更容易补偿。机理研究方面,非晶碳膜在厚度方向上表现出组分差异化,因此该方向也应被纳入机理模型建立中。  
结论 非晶碳膜在加工工艺、力学性能以及电学性能上与传统的 MEMS 传感器芯片能够很好地结合,加工得到的非晶碳膜压阻式压力传感器灵敏度和线性度较为理想。此外,其压阻机理研究应纳入薄膜厚度方向。  
**关键词:** 非晶碳膜; 压阻效应; 压阻机理; MEMS; 压力传感器; 厚膜理论  
中图分类号: TP212.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)06-0060-08  
DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.06.007

## MEMS Pressure Sensor Based on Piezoresistive Effect of Amorphous Carbon Film

MA Xin<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>2</sup>, TONG Xiao-shan<sup>1</sup>, ZHAO Yu-long<sup>1</sup>, WANG Ai-ying<sup>2,3</sup>

(1.a.School of Mechanical Engineering, b.State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2.a.Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, b.Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Science, Ningbo 315201, China; 3.Research Center of Materials and

收稿日期: 2020-04-22; 修订日期: 2020-05-22

Received: 2020-04-22; Revised: 2020-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51805425); 王宽诚基金团队人才基金(GJTD-2019-13); 陕西省自然科学基金(2018JQ5018)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51805425); K. C. Wong Education Foundation (GJTD-2019-13); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JQ5018)

作者简介: 马鑫(1994—), 男, 博士, 主要研究方向为非晶碳膜压阻效应和 MEMS 传感器。

Biography: MA Xin (1994—), Male, Doctor, Research focus: piezoresistive performance of amorphous carbon film and MEMS sensors.

通讯作者: 张琪(1986—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新型压阻材料和 MEMS 传感器技术。邮箱: zhq0919@xjtu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Qi (1986—), Female, Doctor, Assistant researcher, Research focus: new piezoresistive materials and MEMS sensors. E-mail: zhq0919@xjtu.edu.cn

引文格式: 马鑫, 张琪, 郭鹏, 等. 基于非晶碳膜压阻效应的 MEMS 压力传感器研究[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 60-67.

MA Xin, ZHANG Qi, GUO Peng, et al. MEMS pressure sensor based on piezoresistive effect of amorphous carbon film[J]. Surface technology, 2020, 49(6): 60-67.

Photoelectricity, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the piezoresistive performance and mechanism of amorphous carbon (a-C) film and apply it in the sensitive circuit of micro-electromechanical system (MEMS) pressure sensor. In this paper, the a-C film piezoresistive material was deposited by direct-current (DC) sputtering process. The phase content and the electrical, mechanical and thermal performance of the representative sample were characterized. Then the device was designed by finite element simulation. And the a-C carbon film pressure sensor was successfully fabricated by MEMS processes to carry out test and analysis of device level. The sensitivity of the pressure sensor chip was  $9.4 \mu\text{V}/\text{kPa}$  and the non-linearity of output signal was 5.57% FS (full scale) in the range of 0 to 1 MPa. The change of the a-C film resistor's resistance showed linear relation at  $-70$  to  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Especially at  $-20$  to  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , that relation was stronger, which showed that the temperature compensation for the a-C piezoresistive material was easier in high temperature environment. The phase content varied along the thickness-direction of the film, which implied this direction was also needed to be considered in the mechanism research. In conclusion, the a-C carbon film can be well-combined with the traditional MEMS sensor chip in terms of fabrication process, and mechanical and electrical properties. Finally, the a-C piezoresistive pressure sensor also shows satisfactory sensitivity and linearity. Furthermore, the thickness-direction of a-C film should be added into the mechanism research.

**KEY WORDS:** amorphous carbon film; piezoresistive effect; piezoresistive mechanism; MEMS; pressure sensor; thick film theory

非晶碳膜具有化学惰性良好、高硬度、低摩擦系数等特点, 60 余年来, 其一直被作为防护涂层进行研究并得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。近年来, 非晶碳膜的电学、磁学和光学特性也逐渐得到了科研工作者的关注, 其逐渐体现出作为一种新型半导体材料或敏感材料的潜力<sup>[3-6]</sup>。其中, 非晶碳膜优秀的压阻特性可以应用于 MEMS 压阻式传感器领域, 得到了较广泛关注。一般不进行掺杂的压阻系数在 1~50 范围内<sup>[7-9]</sup>, 而掺杂氢元素后则可达 1000 左右<sup>[10-11]</sup>。相比于传统的掺杂单晶硅等压敏材料, 其在压阻系数上有明显的优势。此外, 非晶碳膜的温度电阻系数可通过金属元素掺杂来进行调整, 这对于解决压阻式传感器中始终存在的温漂效应可以提供巨大的帮助<sup>[12-13]</sup>。非晶碳膜自身具备的优良机械和生物兼容等特性, 有助于拓展传感器的应用范围<sup>[14-17]</sup>。

此外, 相较于生产单晶硅压敏电阻一般采用的离子注入工艺, 制备非晶碳膜所采用的物理或化学气相沉积工艺设备成本较低, 且运行中不使用  $\text{BF}_3$ 、 $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  等剧毒气体, 安全性也得到了较大提升。相比于硅纳米线、石墨烯、碳纳米管等新兴的压阻材料<sup>[18-20]</sup>, 非晶碳膜在与 MEMS 工艺的兼容性上具备明显的优势。这主要体现在其在硅、氧化铝、聚酰亚胺等刚性或柔性基底上均可大面积原位沉积<sup>[21-22]</sup>, 因此在敏感电路加工过程中避免了转移等工艺, 利于工艺流程的标准化和自动化。

由于非晶碳膜具备上述优异特性, 近 10 年来, 科研工作者对其制备工艺、压阻机理和器件应用进行了研究。A. Tibrewala 等将其集成于 MEMS 力传感器的惠斯通电桥中, Saskia Biehl 等借助其耐磨特性, 将非晶碳膜沉积于轴承中, 原位监测力信号, 其在柔

性传感器中也得到了较好的应用<sup>[8,14,23-24]</sup>。目前非晶碳膜的压阻机理仍然不明确, 而且缺乏系统的器件设计方法, 因此非晶碳膜 MEMS 压阻式传感器的研究和应用受到了严重制约。

本文通过对非晶碳膜的内部组分及电学、机械、温度特性等进行表征测试, 为传感器中敏感电阻的设计和整体有限元仿真提供基本参数。其后将非晶碳膜敏感电阻作为 MEMS 压力传感器的核心组件, 对器件进行整体设计、加工和测试。作为首次将非晶碳膜应用于 MEMS 压阻式压力传感器的工作, 本研究将为非晶碳膜在 MEMS 传感器中的应用提供重要参考。

## 1 试验

### 1.1 非晶碳膜沉积

本研究采用直流磁控溅射工艺进行非晶碳膜的沉积, 采用的设备为磁过滤阴极弧复合溅射镀膜仪, 型号为 P600-1。为了保证传感器所要求的绝缘性, 采用了加工有 170 nm 氧化层的干法氧化硅片 ( $\phi 100 \text{ mm} \times 500 \mu\text{m}$ , n 型  $<100>$ ) 作为衬底。为了增强非晶碳膜与衬底的结合力, 首先使用 Ar 等离子体进行了 30 min 的辉光刻蚀, 使用的基底偏压为  $-350 \text{ V}$ , 工作气压为  $1.06 \text{ Pa}$ 。直流溅射过程中, 使用了纯度为 99.999% 的碳靶材, 沉积过程中的其他具体参数见表 1。

使用原子力显微镜 (INNOVA, Bruke) 测试非晶碳膜样品表面形貌高度云图, 见图 1, 扫描范围为  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。其粗糙度  $R_a$  值为  $0.373 \text{ nm}$ , 光洁度好,

表 1 非晶碳膜沉积参数  
Tab.1 Deposition parameters of a-C film

Deposition parameters	Value
Bias voltage	-200 V
Working current	3.0 A
Ar gas flow	65 mL/min
Working pressure	0.33 Pa
Deposition temperature	< 40 °C
Distance between target and substrate	10 cm
Rotation speed	6 r/min

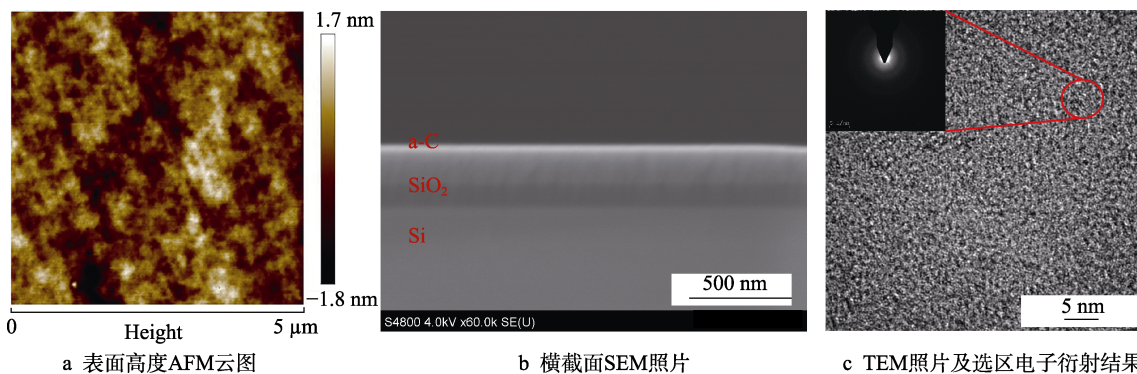


图 1 非晶碳膜形貌表征

Fig.1 Morphology of a-C film: a) AFM result cloud image of surface height; b) SEM image of the cross-section; c) TEM image and SAED pattern

## 1.2 非晶碳膜基础参数测试

非晶碳膜的电学性能直接决定了 MEMS 压阻传感器的输出信号质量。由于非晶碳膜在与金属电极接触时有“金-半接触”特点，经过优选后，沉积 20 nm Cr/200 nm Au 作为非晶碳膜接触电极。使用半导体器件分析仪 (B1500A, Keysight) 测试其伏安特性，其表现为理想的电阻特性，如图 2 所示。因此在下文工作中，都将非晶碳膜作为理想电阻对待。

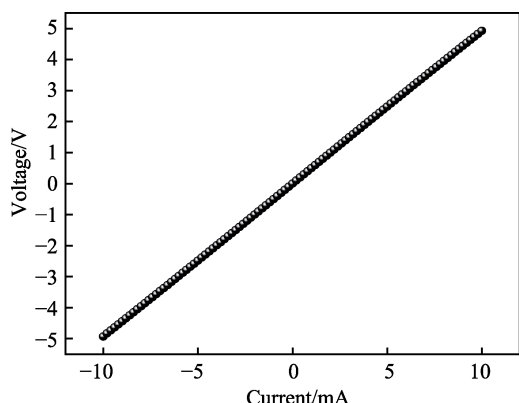


图 2 样品 I-V 曲线测试结果  
Fig.2 Test result of I-V curve for sample

本研究使用自制的三点法测试设备对非晶碳膜的压阻系数进行测试，其主要包括非晶碳膜样品、对样品进行简支的 3D 打印夹具、千分尺、桌面式压力台 (艾德堡, HP-50N) 和台式万用表 (FLUKE, 8846A)

利于后续电极加工。使用扫描电子显微镜观察样品横截面照片，如图 1b 所示，可以看到，非晶碳膜与衬底上氧化硅膜层之间结合良好，在后续加工过程中也未出现薄膜崩落等现象，保证了传感器加工的顺利进行。此外，薄膜厚度由台阶仪 (Alpha-Step IQ) 测得，约为 200 nm。结合 FIB 技术制备样品，本文使用高分辨透射电镜 (Libra 200 FE, Zeiss) 结合选区电子衍射的方法确定了非晶碳膜内部的非晶态结构特征，如图 1c 所示。

等，其中附着于硅片衬底的非晶碳膜样品 (a-C/SiO<sub>2</sub>/Si) 尺寸为 30 mm×5 mm×0.5 mm，两端使用导电银浆引出铜导线。测试过程中，压力台逐渐施加压力，并使得样品中心处弯曲，其中心挠度由千分尺测得，记为 ΔY；同时非晶碳膜的电阻值产生变化，变化值记为 ΔR；样品总厚度记为 t；两侧支点间的长度为有效长度，记为 l，其由夹具决定，本测试中实际为 28 mm。非晶碳膜的压阻系数 K 可以由式 (1) 计算<sup>[25]</sup>。本文将三点法测试结果转换为应变与电阻相对变化结果，如图 3 所示。经过线性拟合，可以得到 -200 V 偏压下制备得到的非晶碳膜的压阻系数约为 8.6。

$$K = \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} = \frac{l^2}{3t \cdot \Delta Y} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} \quad (1)$$

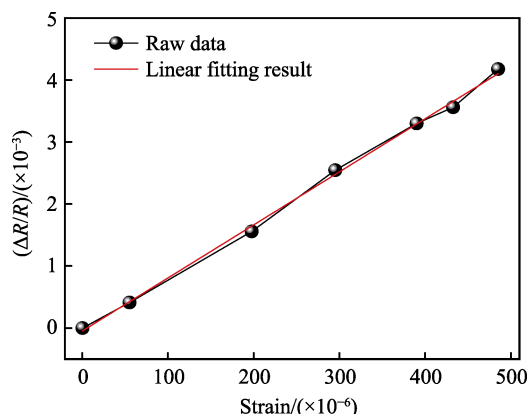


图 3 非晶碳膜样品三点法测试结果  
Fig.3 Result of three-point test for a-C carbon film sample

此外，非晶碳膜的力学参数对于传感器设计是必不可少的，尤其是在通过有限元方法对非晶碳膜进行受力分析时，需要导入压敏材料相关参数。本研究中主要是对其杨氏模量和密度进行了测试。测试使用方法为纳米压痕 (MTS, G200)，采用连续刚度模式，并控制压入深度，得到非晶碳膜杨氏模量约为 184.22 GPa。通过反射率测量方法 (Bruker, D8 DISCOVER) 对薄膜的密度进行了测试，得到其密度约为 2800 kg/m<sup>3</sup>。

## 2 非晶碳膜 MEMS 压力传感器设计加工

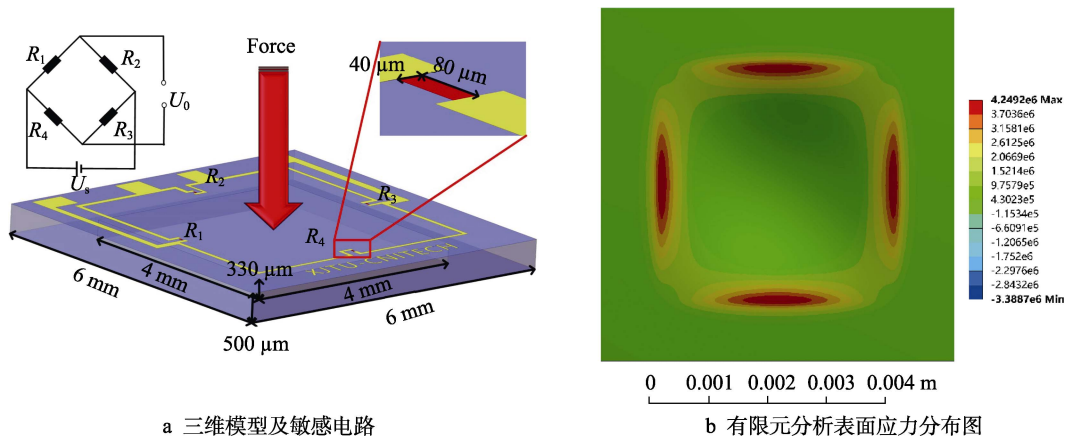
### 2.1 传感器设计

如图 4a 所示，本研究采用了 MEMS 压力传感器

中经典的平膜敏感结构。平膜敏感结构应力分布如图 4b 所示，其在同一表面仅存在一种应力符号。由于非晶态材料的各项同性，如果要组成惠斯通全桥来提升敏感电路整体的灵敏度，应适当调整电阻条受力方向，以使得相邻电阻条的应力状态不同，进而使得相邻压敏电阻能够产生不同的电阻值变化符号。此外，为了保证非晶碳膜压敏电阻整体受到的应力基本一致，电阻条二维尺寸最终被确定为 20 μm×40 μm，以保证其阻值能够随着压力变化而线性变化。

### 2.2 传感器加工

图 5a 为器件加工所使用的双面氧化 4 英寸硅衬底，清洗后进行器件的加工。如图 5b 所示，由于非晶碳膜沉积过程中没有产生高温，可以直接使用 EPG 535 光刻胶作为压敏电阻图形化的掩蔽。掩蔽



a 三维模型及敏感电路

b 有限元分析表面应力分布图

图 4 非晶碳膜 MEMS 压力传感器设计

Fig.4 Illustration of the design method of the a-C MEMS pressure sensor: a) 3D model and sensitive circuit; b) FEM simulation result of surface stress distribution

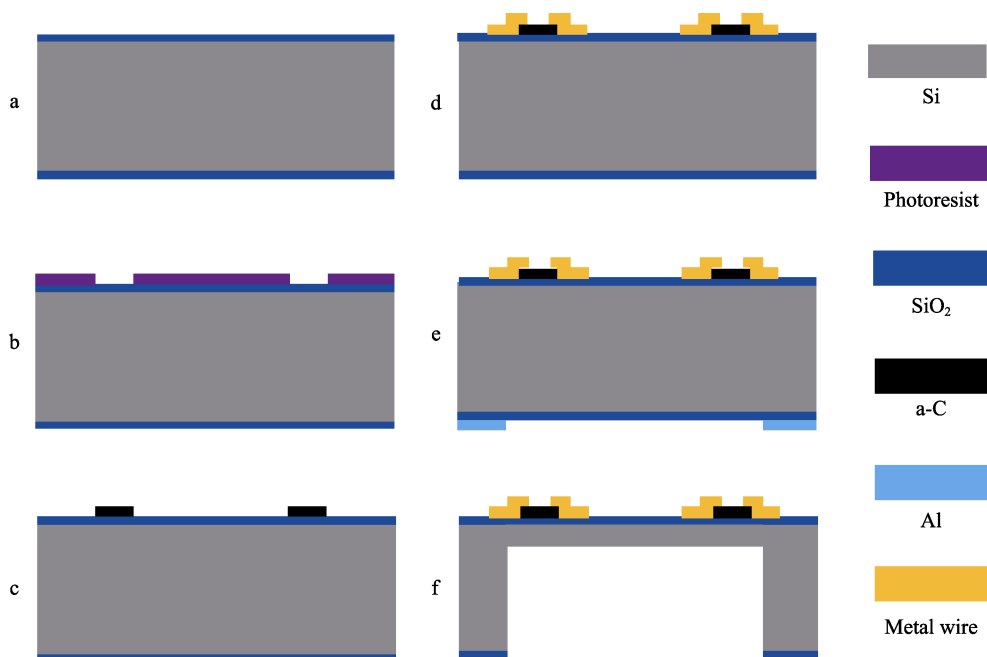


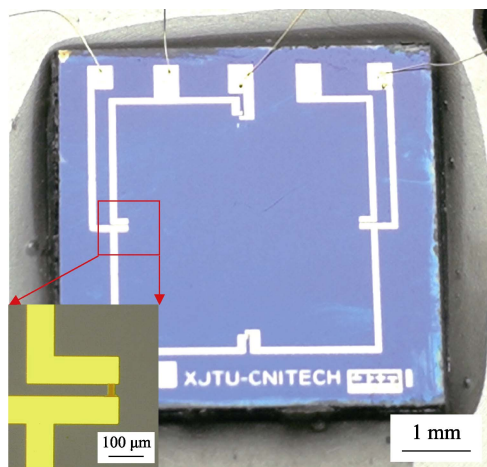
图 5 传感器加工工艺流程

Fig.5 Illustration of sensor fabrication process

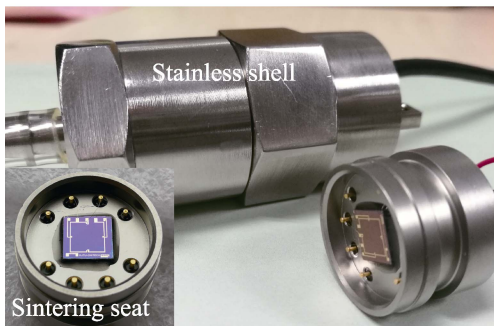
加工完成后，将4英寸硅衬底整体放入直流磁控溅射机腔室中进行非晶碳膜沉积。样品取出后，使用丙酮作为剥离液溶解光刻胶掩蔽，并使用酒精进行清洗，从而完成非晶碳膜压敏电阻的图形化，如图5c所示。在进行敏感电路电连接过程中，采用20 nm Cr/200 nm Au作为电极和引线，该工序中同样采用剥离工艺进行图形化，如图5d所示。随后在背面沉积300 nm Al作为后续干法刻蚀的金属掩蔽，并使用铝腐蚀液进行腐蚀，以完成图形化，如图5e所示。最后使用ICP干法刻蚀机(北方微电子, DSE200S)进行氧化硅和硅的干法刻蚀，加工完成后的芯片如图5f所示。

### 2.3 传感器封装

加工完成后的传感器芯片照片如图6a所示，将其封装于订制的烧结座和不锈钢壳体中。具体过程为：在大气环境中，将芯片背部框架涂抹环氧树脂胶，并粘贴于烧结座中心位置，其后使用烘箱在120℃下进行2h的固化，并随炉冷却，完成芯片固定和背腔密封。其后使用金丝键合机完成芯片上电极和烧结座上镀金接线柱之间的电连接，并随后在接线柱另一端焊接引线。最后将烧结座安装入不锈钢管壳，完成芯片封装，如图6b所示。



a 传感器芯片照片和电阻条显微镜照片



b 封装后照片

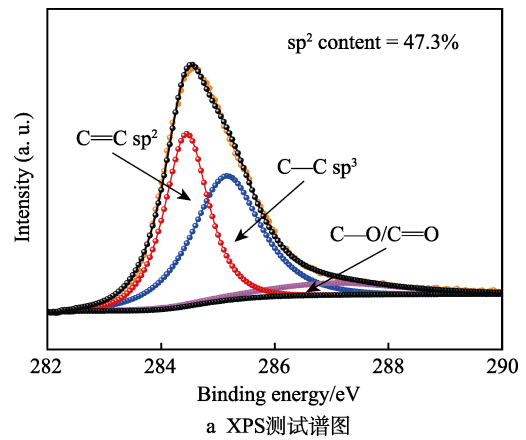
图6 成品照片

Fig.6 Finished sensor and package: a) images of the sensor and a-C resistor; b) image of the package

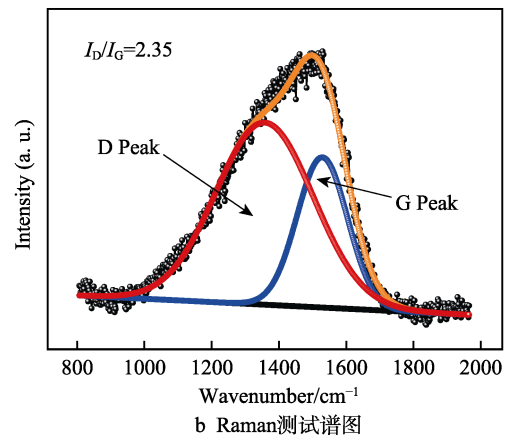
## 3 结果与讨论

### 3.1 非晶碳膜结构表征

为了解释非晶碳膜压阻机理的起源，研究人员将厚膜理论引入非晶碳膜压阻机理研究中，即将内部组成看作导电的  $sp^2$  团簇镶嵌于绝缘的  $sp^3$  基质中。在受到外力作用时， $sp^2$  团簇间距发生改变，载流子在团簇之间发生隧穿的难度改变，进而宏观反映为电阻率的变化<sup>[26-28]</sup>。因此，表征非晶碳膜中的组分是尤为必要的。本研究使用XPS技术(Axis Ultra DLD)对薄膜中C原子间的杂化方式进行表征，采用的阳极靶为Al，测试结果如图7a所示。284.6 eV峰和285.6 eV峰分别代表了  $sp^2$  杂化碳(C=C)和  $sp^3$  杂化碳(C-C)，在不考虑O元素时，其质量分数分别为47.3%和52.7%。Raman光谱(LabRAM HR Evolution)的表征结果如图7b所示，测试使用532 nm激光光源，其后使用Gaussian拟合对原始信号进行分峰，得到D和G峰。二者均由  $sp^2$  杂化结构振动引起，D峰对应于微晶石墨的  $sp^2$  结构，源于芳香烃环的呼吸振动模式(横向振动)，G峰对应于碳链或碳环中  $sp^2$  的伸缩运动(纵向振动)。拟合得到其D峰和G峰面积比( $I_D/I_G$ )约为2.3。假定非晶碳膜中  $sp^2$  团簇为六圆环



a XPS测试谱图



b Raman测试谱图

图7 非晶碳膜样品组分表征结果

Fig.7 Phase characterization of the a-C film sample: a) XPS test spectrum; b) Raman test spectrum

形式，其尺寸可以使用式 (2) 进行近似计算<sup>[29-30]</sup>，其中  $C(\lambda) \approx 4.4 \text{ nm}$ ， $L_a$  为团簇尺寸，计算得到团簇的大小约为  $1.9 \text{ nm}$ 。这样的表征和计算是在平面范围内得到的平均结果，但非晶碳膜电阻厚度尺寸约为  $sp^2$  团簇尺寸的 100 倍，因此厚度方向的团簇分布情况是必须要考虑的。

$$\frac{I(D)}{I(G)} = \frac{C(\lambda)}{L_a} \quad (2)$$

借助 XPS 技术对样品进行薄膜厚度方向上的组分研究，C 元素能谱如图 8a 所示。其中出现的峰位移动主要是因为刻蚀过程中，氩离子持续对碳膜表面进行轰击造成的电荷累积所致，可通过峰位校正来处理。由于薄膜表面存在污染，会影响测试结果，如图 8a 中的“Original surface”谱线所示，因此在数据分析时仅采用刻蚀后结果。分峰处理后，计算得到的  $sp^2$  杂化碳含量如图 8b 所示。结果显示，非晶碳膜内部组分随着厚度变化出现变化。总体而言，在底面和表面  $sp^2$  含量较多，而在中部  $sp^2$  含量较少，表面处  $sp^2$  含量仅对应了表面薄层电阻内部组分。实际情况中，非晶碳膜压敏电阻可以看作由若干与之类似的薄层电阻复杂连接后组成的电路。因此这一现象表明，在

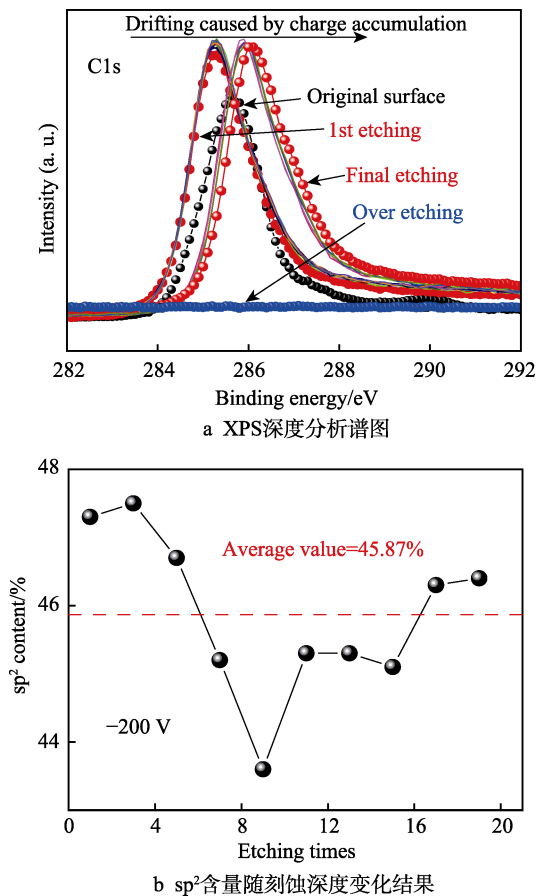


图 8 非晶碳膜厚度方向组分分析

Fig.8 Phase characterization along the thickness-direction of a-C film: a) XPS deep analysis spectrum; b) the distribution of  $sp^2$  content with corrosion depth

非晶碳膜压阻机理研究中，不能仅使用表面处的测试结果来进行代表性研究，还要考虑到薄膜厚度方向上组分的区别。

### 3.2 非晶碳膜温度性能测试

压敏电阻自身的阻值随着温度的变化以及电桥桥臂之间阻值的不平衡，会影响传感器芯片的综合性能，因此必须对非晶碳膜的温度性能进行研究。利用高低温烘箱 (Espec, PSL-2 J) 对非晶碳膜压敏电阻自身的温度电阻特性进行了测试，温度区间为  $-70 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ，如图 9a 所示。非晶碳膜电阻值随温度增长而线性降低，在  $-70 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内，其线性拟合结果  $R^2$  值为 0.9882，但是在  $-20 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内 (如图 9b 所示)，该值达到了 0.9989。这一结果表明，该电阻在较高温度时，其电阻相对温度变化有更好的线性度，也更利于温度补偿，并且对于在传感器芯片上无应力区域直接集成非晶碳膜温度敏感电阻也是有利的。

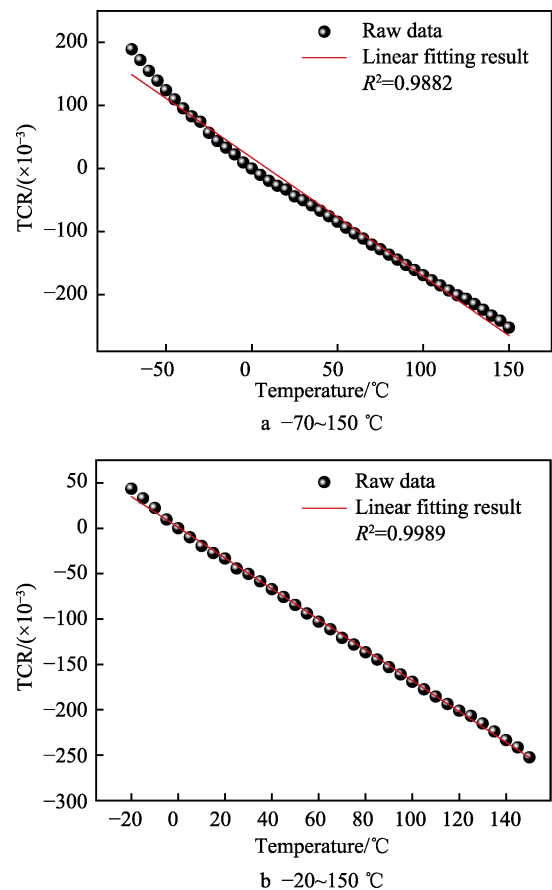


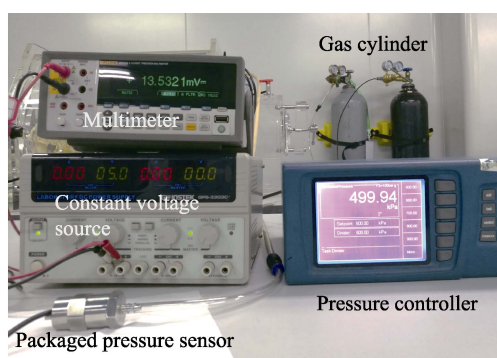
图 9 非晶碳膜样品温度电阻性能测试

Fig.9 Result of resistance-temperature test for a-C film sample

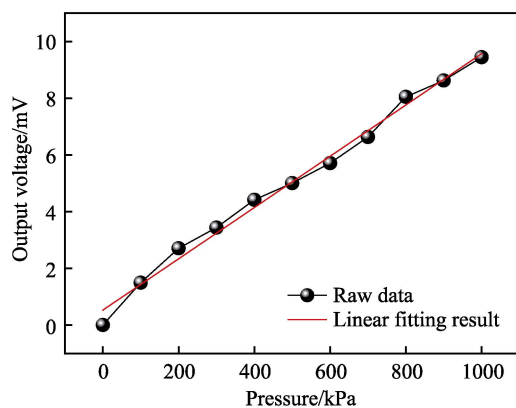
### 3.3 传感器测试

如图 10a 所示，非晶碳膜 MEMS 压力传感器的测试气体使用高压氮气瓶结合桌面式压力变送器 (Druck, DPI515) 供给，压力测试范围为  $0 \sim 1 \text{ MPa}$ ，

间隔为 100 kPa。由于使用 4 个非晶碳膜压敏电阻成功组建了惠斯通全桥敏感电路, 传感器芯片可直接输出电压信号, 测试中使用稳压直流电源对电桥提供 5 V 电压供给。在压力变化时, 惠斯通电桥中压敏电阻阻值出现对应的增减, 并使得电桥输出对应电压信号, 该信号使用台式万用表采集。0~1 MPa 范围内, 非晶碳膜 MEMS 压力传感器的输出信号如图 10b 所示。在该范围内, 传感器灵敏度为  $S=\Delta V/\Delta P$ , 其中  $V$  为输出电压,  $P$  为气体压力, 计算得到  $S=9.4 \mu\text{V}/\text{kPa}$ , 对其进行线性拟合后计算得到的非线性度为 5.57% FS。测试结果表明, 非晶碳膜 MEMS 压力传感器成功地对气体压力信号变化进行了监测, 也证明了非晶碳膜与 MEMS 工艺结合的可行性。



a 传感器测试系统



b 传感器输出电压信号及线性拟合结果

图 10 传感器测试

Fig.10 Test of the sensor: a) Test system for sensor; b) output voltage signal and linear fitting result of sensor

## 4 结论

本研究采用直流溅射工艺, 在硅衬底上原位制备非晶碳膜压敏薄膜, 并将其与 MEMS 平膜敏感结构结合。使用经典的 MEMS 工艺, 并对流程进行了优化, 最终高效地加工出非晶碳膜压阻式 MEMS 压力传感器。研究得出以下结论:

1) 在基础工艺和研究方面, 通过使用 20 nm Cr/

200 nm Au 作为电极材料, 得到了较为理想的欧姆接触。对压敏电阻进行-70~150 °C 范围内的温度性能研究, 其阻值与温度间表现出较强的线性关系, 且在较高温段, 线性度更好, 利于温度补偿, 说明该器件更适合于较高温环境下应用。

2) 在压阻机理研究方面, -200 V 偏压样品的  $\text{sp}^2$  团簇尺寸约为 1.9 nm, 其质量分数约为 47.3%, 可为机理研究提供数据参考。本研究将二维平面内的机理模型通过 XPS 深度分析测试结果进一步拓展, 结果表明, 薄膜内部组分在厚度方向上具备差异, 因此该方向也应加入机理研究之中。

3) 测试得到非晶碳膜压阻式压力传感器性能为: 在 0~1 MPa 范围内, 灵敏度为  $9.4 \mu\text{V}/\text{kPa}$ , 输出信号的非线性度为 5.57% FS。本研究为非晶碳膜在 MEMS 压阻式传感器领域中的应用奠定了一定的理论与技术基础。

## 参考文献:

- [1] VETTER J. 60 years of dlc coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various dlc types, and their evolution for industrial applications[J]. Surface and coatings technology, 2014, 257: 213-240.
- [2] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon[J]. Materials science & engineering R-reports, 2002, 37(4-6): 129-281.
- [3] SALEEMI A S, SINGH R, SUN W, et al. Large magnetoresistance of amorphous carbon films[J]. Carbon, 2017, 122: 122-127.
- [4] SANTINI C A, SEBASTIAN A, MARCHIORI C, et al. Oxygenated amorphous carbon for resistive memory applications[J]. Nature communication, 2015, 6: 8600.
- [5] PANDEY M, BHATACHARYYA D, PATIL D S, et al. Structural and optical properties of diamond like carbon films[J]. Journal of alloys and compounds, 2005, 386(1-2): 296-302.
- [6] GUO Peng, CHEN Ren-de, SUN Li-li, et al. Bulk-limited electrical behaviors in metal/hydrogenated diamond-like carbon/metal devices[J]. Applied physics letters, 2018, 112(3): 033502.
- [7] PEINER Erwin, TIBREWALA Arti, BANDORF Ralf, et al. Diamond-like carbon for mems[J]. Journal of micromechanics and microengineering, 2007, 17(7): S83-S90.
- [8] PEINER E, TIBREWALA A, BANDORF R, et al. Micro force sensor with piezoresistive amorphous carbon strain gauge[J]. Sensors and actuators A: Physical, 2006, 130-131: 75-82.
- [9] MA Xin, TONG Xiao-shan, GUO Peng, et al. MemS piezo-

- resistive force sensor based on dc sputtering deposited amorphous carbon films[J]. *Sensors and actuators A: Physical*, 2020, 303: 111700.
- [10] TIBREWALA A, PEINER E, BANDORF R, et al. Transport and optical properties of amorphous carbon and hydrogenated amorphous carbon films[J]. *Applied surface science*, 2006, 252(15): 5387-5390.
- [11] PETERSEN M, BANDORF R, BRÄUER G, et al. Diamond-like carbon films as piezoresistors in highly sensitive force sensors[J]. *Diamond and related materials*, 2012, 26: 50-54.
- [12] TAMULEVIČIUS Sigitas, MEŠKINIS Šarūnas, ŠLAPIKAS Kęstutis, et al. Piezoresistive properties of amorphous carbon based nanocomposite thin films deposited by plasma assisted methods[J]. *Thin solid films*, 2013, 538: 78-84.
- [13] GREIN M, BANDORF R, SCHIFFMANN K, et al. Material structure and piezoresistive properties of niobium containing diamond-like-carbon films[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 357: 273-279.
- [14] BIEHL Saskia, LÜTHJE Holger, BANDORF Ralf, et al. Multifunctional thin film sensors based on amorphous diamond-like carbon for use in tribological applications[J]. *Thin solid films*, 2006, 515(3): 1171-1175.
- [15] FRAGA M A, FURLAN H, PESSOA R S, et al. Studies on SiC, DLC and TiO<sub>2</sub> thin films as piezoresistive sensor materials for high temperature application[J]. *Microsystem technologies*, 2012, 18(7-8): 1027-1033.
- [16] WEI Jing, LI Han-chao, LIU Lin-lin, et al. Enhanced tribological and corrosion properties of multilayer ta-C films via alternating sp<sup>3</sup> content[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 374: 317-326.
- [17] PENKOV O V, KHADEM M, LEE J S, et al. Highly durable and biocompatible periodical Si/DLC nanocomposite coatings[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(10): 4852-4860.
- [18] HE Rong-rui, YANG Pei-dong. Giant piezoresistance effect in silicon nanowires[J]. *Nature nano technology*, 2006, 1(1): 42-46.
- [19] CULLINAN M A, CULPEPPER M L. Carbon nanotubes as piezoresistive microelectromechanical sensors: Theory and experiment[J]. *Physical review B*, 2010, 82(11): 115428.
- [20] KUMAR M, BHASKARAN H. Ultrasensitive room-temperature piezoresistive transduction in graphene-based nanoelectromechanical systems[J]. *Nano letters*, 2015, 15(4): 2562-2567.
- [21] GREIN M, GERSTENBERG J, VON DER HEIDE C, et al. Niobium-containing DLC coatings on various substrates for strain gauges[J]. *Coatings*, 2019, 9(7): 417-427.
- [22] GAYATHRI S, KRISHNAN R, RAVINDRAN T R, et al. Spectroscopic studies on DLC/TM (Cr, Ag, Ti, Ni) multilayers[J]. *Materials research bulletin*, 2012, 47(3): 843-849.
- [23] WANG B, JIANG Y C, ZHAO R, et al. Piezoresistive effect observed in flexible amorphous carbon films[J]. *Journal of physics D: Applied physics*, 2018, 51(17): 175304.
- [24] XUE Pei-dong, CHEN Cheng, DIAO Dong-feng. Ultrasensitive flexible strain sensor based on graphene nanocrystallite carbon film with wrinkle structure[J]. *Carbon*, 2019, 147: 227-235.
- [25] HE Yu-liang, WU Xu-hui, LIN Hong-yi, et al. Structure characteristics and piezoresistive effect of Nc-Si: H films[J]. *Chinese science bulletin*, 1995, 40(20): 1684-1687.
- [26] GRIMALDI C, RYSER P, STRÄSSLER S. Gauge factor enhancement driven by heterogeneity in thick-film resistors[J]. *Journal of applied physics*, 2001, 90(1): 322-327.
- [27] MA Xin, GUO Peng, TONG Xiaoshan, et al. Piezoresistive behavior of amorphous carbon films for high performance mems force sensors[J]. *Applied physics letters*, 2019, 114(25): 253502.
- [28] TIBREWALA A, PEINER E, BANDORF R, et al. Piezoresistive gauge factor of hydrogenated amorphous carbon films[J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2006, 16(6): S75-S81.
- [29] FERRARI A C, ROBERTSON J. Interpretation of raman spectra of disordered and amorphous carbon[J]. *Physical review B*, 2000, 61(20): 14095-14107.
- [30] TUINSTRAF, KOENIG J L. Raman spectrum of graphite[J]. *Journal of chemical physics*, 1970, 53(3): 1126-1130.