Vol. 44 No. 6 Jun. 2023

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311053

PMMA/石墨烯异质压力传感器及传感特性分析*

刘 瑛1,2,张 勇1,2,吕克洪1,2,邱 静1,2,刘冠军1,2

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073; 2. 国防科技大学装备综合保障技术重点实验室 长沙 410073)

摘 要:石墨烯具有优异机电性能和超大比表面积,其显著压阻效应可应用于高性能压力传感,为探索下一代超灵敏传感器开辟新方向。目前在研石墨烯压力传感器存在石墨烯悬空破损严重、成品率低等难题,其根源在于,石墨烯除胶释放过程应力过载。本文提出以 PMMA/石墨烯复合异质薄膜替代单层石墨烯的压力传感器新方案,设计 COMS 兼容新工艺,可实现传感器规模化制备,成品率接近 100%。测试表明,本文传感器灵敏度高达 7. 42×10⁻⁵/kPa,优于与已报道结果。提取传感器压力测量精度约为 2. 6% ~ 3. 5%,比国外禁运高性能压力传感器精度(0. 05% ~ 0. 01% FS)差近 2 个数量级,其主因在于测量系统电噪声及受工艺污染石墨烯本征电阻噪声。当前石墨烯压力传感器研究的重点应聚焦精度指标的提高,而不是片面追求灵敏度指标。

关键词: 石墨烯;压力传感器;压阻效应;复合异质薄膜;灵敏度;精度

中图分类号: TH823,73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

Pressure sensor based on PMMA/graphene hetero-film and its sensing characteristics

Liu Ying^{1,2}, Zhang Yong^{1,2}, Lyu Kehong^{1,2}, Qiu Jing^{1,2}, Liu Guanjun^{1,2}

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Graphene with atomic thickness has advantages of excellent electromechanical properties and super-large specific surface area. Combined with the significant piezoresistive effect, graphene opens up window for next generation of the ultra-sensitive pressure sensor. The main cause of the low-yield for graphene sensor made by the conventional fabrication process is analyzed to be the overloaded stress during its release process from the liquid. To solve this problem and improve the yield, a new pressure sensor scheme by using polymethylmethacrylate (PMMA)/graphene composite heterogeneous film (hetero-film) is proposed to replace the atomic graphene film. The corresponding fabrication process compatible with the traditional COMS process is designed and applied to sensor fabrication, which reaches a much higher yield and holds the hope for large-scale fabrication. The pressure sensing test shows that the sensitivity of the new graphene pressure sensor is up to 7.42×10^{-5} /kPa, which is comparable to the existing research. However, the extracted sensing precision is low to $2.6\% \sim 3.5\%$ in the full-scale range (FS), which is nearly 2 orders worse than the silicon-based high-performance pressure sensor ($0.05\% \sim 0.01\%$ FS). The electrical noise of the measurement system and the intrinsic resistance noise of the polluted graphene may be the key root. This work suggests that more research on graphene pressure sensor should focus on the improvement of sensing precision indicator rather than the pursuit of sensitivity.

Keywords: graphene; pressure sensor; piezoresistive effect; composite heterogeneous film; sensitivity; precision

0 引 言

压力传感器是使用最普遍的传感器之一,在消费电

子、自动控制、航空航天、航海深潜、军用武器等诸多领域 有广泛应用。特别在高机动、高超声速飞行器领域,美国 X系列无人飞行器、F-15、F-18、F-22、F-35、B-2等新一代 战机几乎全部采用基于高精度微机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)压力传感器的嵌入式大气数据传感技术(flush air data sensing system, FADS)开展气动数据测量^[1-2],替代传统空速管,提高飞行器气动特性和隐身性能。我国新型航空装备的发展同样对FADS技术需求急迫,但是FADS技术核心的高精度MEMS压力传感器一直是我国亟待突破的"卡脖子"关键技术^[3]。

传统硅微压阻式压力传感器常以硅作为压阻材料,难以减薄,且应变系数不稳定,受温度影响较大^[45]。受制于工艺成熟度和硅材料传感极限,我国在传统压力传感器领域一直处于"追"而不"破"的状态,以新材料替代传统硅基材料是突破压力传感器"卡脖子"技术难题的有效途径^[6-11]。近年来,石墨烯因其优异性能备受科研人员关注。极高的杨氏模量与载流子迁移率使其在高性能压力传感器领域有极好的应用前景^[12-13],有望同时实现高灵敏度与宽量程的压力测量。研究人员已经将石墨烯应用于压阻式^[6,14-15]、电容式^[16-17]以及谐振式压力传感器心用于压阻式^[6,14-15]、电容式^[16-17]以及谐振式压力传感器^[18-20],其中悬空石墨烯压阻式压力传感器的灵敏度已达到传统硅压阻传感器的 20 倍。同时,石墨烯的应变系数受温度影响较小,其应变系数在 700℃的高温下仍能保持稳定^[4]。因此,以石墨烯作为压力敏感材料有望在高性能压力测量领域实现应用突破。

目前,国内外在石墨烯压力传感器的理论建模、仿真、设计制备等方面已有一定的研究成果^[21-22],但仍然存在若干问题需要解决。本文针对常规悬空石墨烯压力传感器制备工艺存在石墨烯薄膜易破损、制样成品率低下等问题,提出以聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate,PMMA)/石墨烯复合异质薄膜替代单层石墨烯薄膜的压力传感器新方案计及规模化制备工艺,开展压力响应测试实验,分析传感器的灵敏度和精度指标,指明当下石墨烯压力传感器研究亟待解决的关键问题。

1 PMMA/石墨烯压力传感器工艺设计与制备

1.1 悬空石墨烯破损机理分析

单层/少层石墨烯制备悬空压阻式压力传感器的关键性难题是原子级薄膜破损严重导致成品率极低。图 1 所示为破损样品扫描电镜图,其中形状规则白亮边缘为空腔边缘,空腔底部灰暗区为破损石墨烯薄膜,破裂后塌陷在腔底,覆盖于空腔上方白亮且完整薄膜为悬空石墨烯。

导致石墨烯薄膜破损的主要原因是,除胶释放过程中,三相界面突发应力释放致使石墨烯薄膜应力过载而撕裂或者塌陷沉底。如图 2 所示,除胶后石墨烯器件从清洗溶液中取出过程虽短,但实际上石墨烯薄膜与溶液界面处已发生复杂相变过程:图 2(a)悬空石墨烯薄膜底

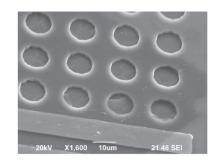


图 1 破损石墨烯薄膜扫描电镜图像

Fig. 1 $\,$ SEM images of cracked graphene membrane

部完全与溶液接触,且在溶液的毛细力与重力作用下发生变形;图 2(b)随着溶液蒸发,溶液减少,溶液下界面上移,形成双面凹镜形状液膜;图 2(c)液膜下界面与石墨烯薄膜最低点靠近临界点,液体张力使液膜从中心处破裂收缩,且形成图示环状液团,环状液团、空气与石墨烯在中心区域形成"三相界面";图 2(d)在三相界面形成的瞬间及其演变扩张过程中,石墨烯在极小的尺度内承受全部的溶液表面张力,导致应力过载而断裂。三相界面施加于石墨烯的膜内张力为:

$$F_T = \pi D_T T \sin \theta \tag{1}$$

其中, T 为液体表面张力, θ 为薄膜界面与液体之间的接触角, D_T 为三相界面区域直径。在三相界面扩张过程中, 膜内张力随之增大。结合石墨烯表面固有晶界缺陷、微孔洞、以及空腔边缘毛刺等处应力集中, 最终致石墨烯薄膜沿缺陷撕裂而破损。

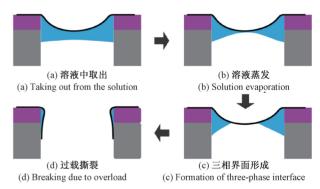


图 2 释放过程突变应力致石墨烯薄膜撕裂示意图

Fig. 2 Diagram of graphene tearing process by sudden stress release

1.2 PMMA/石墨烯压力传感器工艺设计与制备

解决三相界面张力过大致石墨烯破损问题的途径之一是提高石墨烯薄膜强度,最直接的方案是利用石墨烯转移支撑材料 PMMA。传统制样中,铜基底或者镍基底化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD) 石墨烯表面厚涂 PMMA 作为支撑材料,转移后再通过丙酮溶液溶

解去除 PMMA。石墨烯破损多发于 PMMA 去除和清洗步骤。因此,本文提出基于 PMMA/石墨烯复合异质薄膜的石墨烯压力传感器设计与制备,即薄涂低浓度 PMMA 溶液(干燥后 PMMA 层厚度约 50 nm)作为支撑材料,且转移后不去除,构成 PMMA/石墨烯复合异质薄膜作传感薄膜,其优点主要体现在两个方面:1)利用 PMMA 支撑石墨烯,增强悬空薄膜负载能力;2) PMMA 封装石墨烯,隔离石墨烯免受空气、水等环境因素污染,保证石墨烯性能稳定不退化.提高传感器一致性、长期稳定性等[23]。

图 3 所示为兼容传统互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺的压力传感器制备工艺流程,适应规模化制备需求。首先,刻蚀压力空腔。使用增粘剂 HDMS 处理基底,旋涂光刻胶 AZ1500,对压力空腔图形进行紫外曝光。显影后,在60℃恒温水浴碳冲氧化物刻蚀液(buffered oxide etch,BOE)中刻蚀 SiO₂,除胶清洗后,使用台阶仪检查空腔刻蚀质量。接着,采用类似的工艺,刻蚀压力传感器电极槽。然后,通过电子束蒸镀,在电极槽内沉积 Cr/Au 金属电极。PMMA/石墨烯复合异质薄膜转移如图 4 所示。首先,用剪刀裁剪适当大小的 CVD 生长铜基底石墨烯,用胶带将其固定在玻璃片上。在石墨烯表面旋涂一层约50 nm 厚的 PMMA。将玻璃片置于热板上,180℃烘烤120 s。将烘干的样品取下,裁剪其边缘,并置于 FeCl₃ 溶液中刻蚀铜基底。刻蚀干净后用基片将 PMMA/石墨烯

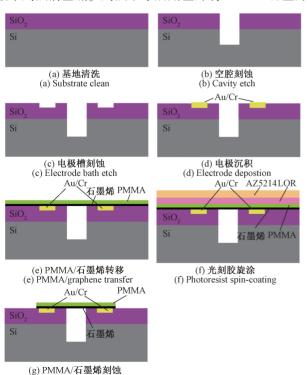


图 3 新制备工艺流程

(g) PMMA/graphene etch

Fig. 3 Schematic illustration of new fabrication process

复合异质薄膜从 FeCl₃ 溶液中捞取出并转移至去离子水中,洗去基片上残留的 FeCl₃,重复清洗多次。捞取 PMMA/石墨烯复合异质薄膜过程中应尽量保持基片平稳,降低溶液表面起伏,避免水溶液大表面张力将薄膜撕破。最后,用基底捞取 PMMA/石墨烯薄膜,倾斜放置,使薄膜与基底之间的水层自然流出。待薄膜与基底完全贴合,再将基片置于热板上,120℃烘烤,去除薄膜与基底层间残留水分。

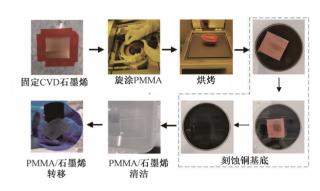
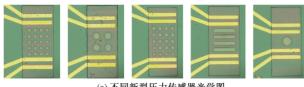


图 4 PMMA/石墨烯复合异质薄膜转移

Fig. 4 Transfer of PMMA/Graphene hetero-film

薄膜转移后的关键问题是实现对 PMMA/石墨烯复合 异质薄膜的图形刻蚀。由于 PMMA 是一种电子束光刻胶, 与传统的紫外光刻工艺不兼容。如果使用电子束曝光方 法,制备成本高且效率低下,无法满足低成本压力传感器 市场需求。针对 PMMA/石墨烯复合异质薄膜刻蚀难题, 通过实验研究 PMMA 与 AZ 系列光刻胶之间的工艺兼容 性,引入 LOR 光刻胶作为牺牲层,实现了一种可规模化制 备、兼容传统光刻工艺的工艺新方法。LOR 光刻胶被广泛 用作金属镀膜工艺中的剥离胶。实验发现,LOR 光刻胶具 有非常优异的特性:1) LOR 光刻胶的旋涂不会与已固化 PMMA 发生溶胶反应;2) AZ 光刻胶显影液可溶解 LOR 光 刻胶,但不与 PMMA 反应。因此,如图 3(f)所示,以 LOR 作为 PMMA 与 AZ 光刻胶的隔离层,旋涂 LOR 和 AZ5214 光刻胶,然后曝光显影并刻蚀 PMMA/石墨烯复合异质薄 膜。刻蚀完毕后,将样品浸入 AZ 光刻胶显影液(如 PD238)中,溶解 LOR,剥离表层 AZ 光刻胶,实现 PMMA/ 石墨烯复合异质薄膜的释放,如图 3(g)所示。图 5 所示为 基于 PMMA/石墨烯复合异质薄膜的不同新型压力传感器 光学图(图 5(a))、悬空 PMMA/石墨烯扫描电镜图像 (图 5(b))、传感器阵列(图 5(c))以及封装后的石墨烯压 力传感器样品(图 5(d))。

经统计,采用新设计和工艺,基于 PMMA/石墨烯复合异质薄膜破损少,压力传感器成品率大幅提高,成品率接近 100%,这表明 PMMA 薄膜有效增强了悬空石墨烯薄膜强度,克服了传统纯石墨烯压力传感器成品率低的难题。



(a) 不同新型压力传感器光学图 (a) Photo images of fabricated pressure sensor samples

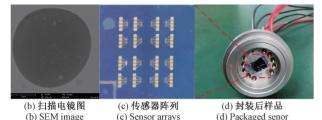


图 5 PMMA/石墨烯复合异质薄膜的新型压力传感器样品 Fig. 5 The fabricated pressure sensor based on PMMA/Graphene hetero-film

2 PMMA/石墨烯压力传感器测试与分析

2.1 测试系统

针对传感器测试问题,搭建了图 6 所示测试系统。将石墨烯压力传感器与一个商用压力传感器(PC10 series, Yuzhidu Co., Ltd.)安装在同一个压力可控的自制调压装置上,两个传感器所受压力相同,商用传感器用于实时记录环境压力,结合环境压力与传感器阻值即可得到石墨烯压力传感器的压力响应。石墨烯压力传感器电阻变化采用"Wheatstone 电桥法"测量。为避免电流焦耳热对测试结果的影响,以小幅值方波电压脉冲作为电桥激励。方波电压使用信号发生器(Agilent 33220A)提供的周期方波信号,幅值为 0.5 V,周期为 10 ms,波峰宽度为周期的 40%,电桥输出的电压信号由万用表(Keithley 2700)连续采集至计算机,换算成电阻值。

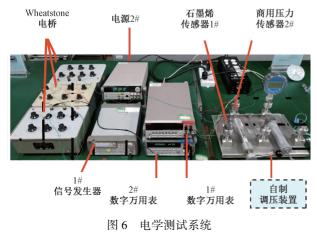
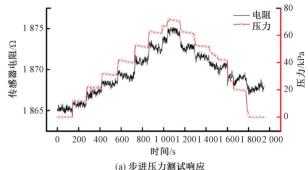


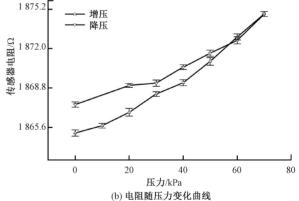
Fig. 6 Electrical measurement setup

2.2 灵敏度分析

常温下(300 K)测试传感器的压力响应,图 7(a)所示为石墨烯传感器在各压力台阶下测试结果,其中带矩形曲线为商用传感器所测真空腔内压力值,平滑曲线为石墨烯传感器电阻变化。对比商用传感器可发现,无论是增压过程还是降压,压力台阶突变,石墨烯压力传感器响应速度几乎与 PC10 传感器同步,这表明石墨烯压力传感器具备与商业传感器相当响应速度。为了更直观地反映了传感器电阻与压力之间的关系,提取每个压力台阶上石墨烯电阻平均值和均方差,如图 7(b)所示,其中误差棒代表了传感器阻值均方差。



(a) 步进压刀测试响应 (a) Response to pressure steps



(b) Sensor resistance vs. applied pressure

图 7 压力响应测试 Fig. 7 Test results for pressure response

根据实验结果,提取传感器灵敏度,并与不同文献制备的压力传感器进行对比。灵敏度计算公式如下:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta P} \tag{2}$$

其中, $\Delta R/R$ 为石墨烯薄膜阻值在压力 ΔP 作用下的电阻变化率。

表 1 对比了不同文献中压力传感器与本文传感器的灵敏度。增压过程,本文石墨烯压力传感器灵敏度 $S=7.42\times10^{-5}/\text{kPa}$,降压过程灵敏度略有下降,约为 $S=5.66\times10^{-5}/\text{kPa}$ 。对比可知,所制备传感器灵敏度达

到了 Smith 等研制传感器灵敏度的 2 倍,接近中北大学 Mengwei Li 研制的六方氮化硼(h-BN)/石墨烯/h-BN 异质薄膜压力传感器的 1/2。PMMA/石墨烯异质薄膜压力检测灵敏度略低于 h-BN/石墨烯/h-BN 异质薄膜的原因

之一在于六方氮化硼只有几个原子层,厚度远小于薄层 PMMA。但是相比于六方氮化硼制备难度及高成本,本 文所提 PMMA/石墨烯复合异质薄膜压力传感器兼具了 高性能和低成本。

表 1	不同又献的压力传感器灵敏度对比

Table 1 Sensitivity comparison of different literatures

作者	年份	材料	尺寸/µm	压力范围/kPa	灵敏度/kPa
Melvas ^[24]	2002年	硅	100×100	10~140	3. 75×10 ⁻⁵
$Hierold^{[25]}$	2007年	碳纳米管	100×100	0~140	1.06×10^{-5}
Gonzalez ^[26]	2012年	多晶硅锗	200×200	0~100	4. 60×10 ⁻⁵
$Godovitsyn^{[27]}$	2013年	硅	2 000×2 000	0~100	2. 37×10 ⁻⁴
Smith ^[28-29]	2013年 2016年	石墨烯	6×64	40~100	2. 96×10 ⁻⁵
Stefan Wagner ^[30]	2018年	PtSe_2	_	20~100	$1.1 \times 10^{-4} \sim 1.64 \times 10^{-2}$
Mengwei Li ^[31]	2018年	BN/石墨烯/BN	6×64	19. 1	19. 1×10 ⁻⁵
本文	2022 年	PMMA/石墨烯	R16	0~70	7.42×10 ⁻⁵ (升压过程)
	2022 4-	I'MMA/ 石室畑			5.66×10 ⁻⁵ (泄压过程)

2.3 精度分析

通过分析已报石墨烯压力传感器实验结果,可发现目前相关研究中较少提及压力传感精度指标。尽管石墨烯压力传感器相比于传统压力传感器具有灵敏度优势,但是在实际应用中,特别是航空压力测量中,传感器测量精度尤为重要。在满足灵敏度要求下,精度是衡量传感性能的关键技术指标。本文通过提取恒定压力台阶下电阻毛刺的均方差对传感精度指标进行初步估计。

在各恒定压力台阶下,统计传感器阻值毛刺均方差约为 $\sigma \approx 0.256 \Omega$,可计算电阻标准化均方误差约为:

$$\varepsilon_{r} = \frac{\sigma}{R_{0}} \approx 0.014\% \tag{3}$$

其中,传感器初始阻值 $R_0 \approx 1~865~\Omega$ 。该结果表明,本文测量方法具有较高灵敏度和分辨率,满足高精度测量。进一步,对增压和降压过程,分别提取传感器满量程精度指标:

精度 =
$$\frac{\sigma}{\Delta R}$$
 (4)

计算得到,增压过程精度约为 2.6%;降压过程约为 3.5%。该精度指标远低于航空压力测量所需的 0.05%~0.01% FS。相比于已经实现的超高灵敏度,当前开展石墨烯压力传感器研究的重点更应聚焦到如何

提高传感器精度指标,而不是继续追求高灵敏度指标。石墨烯传感器电阻输出多毛刺噪声,其主要来源有两类:1)测量系统的电噪声,特别是市电噪声;2)石墨烯本征电阻噪声。针对第1类电噪声抑制问题,可通过使用低噪声独立电源、滤波器、低噪声调理电路等方案加以改善。针对第2类石墨烯本征电阻噪声抑制问题,其根源在于石墨烯表面不稳定褶皱、表面污染等,对应的解决方案包括:1)使用超薄层六方氮化硼实现石墨烯原子级封装以保持石墨烯高洁净状态;2)通过退火去除石墨烯表面污染,使石墨烯恢复原生高洁净状态。

本文对石墨烯传感器大气压力测量性能进行了评估。大气压力和水下压力测量均是压力传感器重要应用场景。特别是,海洋鱼类通过侧线器官(如图 8 所示)实现水下环境压力场的精确感知,从而完成集群、避障、躲避天敌等行为,为潜航器及其集群智能控制提供了重要仿生学方法。针对鱼类头部与躯干部侧线分布特征,本文利用 3D 打印技术分别打印模拟头部分叉结构的十字阵列以及模拟躯干的一维线性阵列,并于孔内嵌入压力传感器,构建仿生鱼侧线(如图 8 所示),开展石墨烯压力传感器水下封装关键问题正在进一步攻关解决。

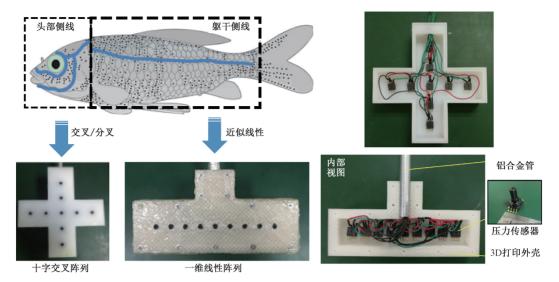


图 8 鱼侧线水下压力场感知器官及 3D 打印仿生鱼侧线阵列

Fig. 8 Underwater pressure field sensing organ of fish lateral line and 3D printing bionic lateral line array

3 结 论

针对单层 CVD 石墨烯制备悬空式压阻压力传感器存在的成品率极低和污染问题,本文提出了以 PMMA/石墨烯复合异质薄膜替代单层石墨烯薄膜的压力传感器新方案,并对传感器性能进行测试分析,主要结论如下:

- 1)所提新方案和新工艺显著提高新型石墨烯压力传 感器成品率。
- 2)基于 PMMA/石墨烯复合异质薄膜的压力传感器最优灵敏度高达 7.42×10⁻⁵/kPa,优于与已报道同类结果,相比硅基和碳纳米压力传感器具有灵敏度优势。
- 3)评估石墨烯压力传感器精度指标,提取传感器精度 2.6%~3.5%,目前远低于航空高精度压力测量所需的 0.05%~0.01% FS。
- 4)当前石墨烯压力传感器研究应重点聚焦传感器精度指标提升,电噪声与石墨烯本征电阻噪声抑制将是石墨烯压力传感器精度提升的关键,也是下一步研究工作的重点方向,同时,针对水下压力场感知问题,需进一步解决石墨烯压力传感器水下封装技术。

参考文献

- [1] 王臻, 张彦军, 雷武涛,等. 嵌入式大气数据传感系统研究进展[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 309-315. WANG ZH, ZHANG Y J, LEI W T, et al. Development of the flush air data sensing system [J]. Journal of Astronautics, 2018, 9(3): 309-315.
- [2] 丁智坚,周欢,吴东升,等. 嵌入式大气数据测量系统 技术研究进展[J]. 宇航学报,2019,40(3):247-257.

- DING ZH J, ZHOU H, WU D SH, et al. Review of flush air data sensing system [J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(3): 247-257.
- [3] 苑伟政,任森,邓进军,等. 硅微机械谐振压力传感器技术发展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 2-9. YUAN W ZH, REN S, DENG J J, et al. A review of silicon micromachined resonant pressure sensor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 2-9.
- [4] 贺红林,许佳豪,周战洪,等. 压阻式压力传感器温度 误差的插值补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学 报,2021,35(12):1-7.
 - HE H L, XU J H, ZHOU ZH H, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezo-resistive pressure sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 1-7.
- [5] 闫文吉,陈红亮,陈洪敏. 硅压阻式压力传感器测量 误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6):59-65.
 - YAN W J, CHEN H L, CHEN H M. Study on uncertainty evaluation method of pressure sensor amplitude-frequency characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 59-65.
- [6] LU Y, TIAN M, SUN X, et al. Highly sensitive wearable 3D piezoresistive pressure sensors based on graphene coated isotropic non-woven substrate [J]. Composites Part A-Applied Science And Manufacturing, 2019, 117; 202-210.

[21]

- [7] GAO Y, OTA H, SCHALER E W, et al. Wearable microfluidic diaphragm pressure sensor for health and tactile touch monitoring[J]. Advanced Materials, 2017, 29(39): 1701985.
- [8] JOO Y, BYUN J, SEONG N, et al. Silver nanowire-embedded PDMS with a multiscale structure for a highly sensitive and robust flexible pressure sensor [J].

 Nanoscale, 2015, 7(14): 6208-6215.
- [9] JIA J, HUANG G T, DENG J P, et al. Skin-inspired flexible and high-sensitivity pressure sensors based on rGO films with continuous-gradient wrinkles [J]. Nanoscale, 2019, 11(10): 4258-4266.
- [10] LIXP, LIY, LIX, et al. Highly sensitive, reliable and flexible piezoresistive pressure sensors featuring polyurethane sponge coated with MXene sheets [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 542: 54-62.
- [11] LI W, HE K, ZHANG D, et al. Flexible and high performance piezoresistive pressure sensors based on hierarchical flower-shaped SnSe2 nanoplates [J]. ACS Applied Energy Materials, 2019, 2(4): 2803-2809.
- [12] GEIM A K. Graphene: Status and prospects [J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [13] NOVOSELOV K S, FAL'KO V I, COLOMBO L, et al.
 A roadmap for graphene [J]. Nature, 2012, 490(7419): 192-200.
- [14] TAO L Q, ZHANG K N, TIAN H, et al. Graphene-paper pressure sensor for detecting human motions [J].

 Acs Nano, 2017, 11(9): 8790-8795.
- [15] WEI Y, CHEN S, DONG X, et al. Flexible piezoresistive sensors based on "dynamic bridging effect" of silver nanowires toward graphene [J]. Carbon, 2017, 113: 395-403.
- [16] DAVIDOVIKJ D, SCHEEPERS P H, Van Der Zant H S J, et al. Static Capacitive pressure sensing using a single graphene drum[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(49): 43205-43210.
- [17] CHEN Y M, HE S M, HUANG C H, et al. Ultra-large suspended graphene as a highly elastic membrane for capacitive pressure sensors [J]. Nanoscale, 2016, 8(6): 3555-3564.
- [18] DOLLEMAN R J, DAVIDOVIKJ D, CARTAMIL-B S J, et al. Graphene squeeze-film pressure sensors [J]. Nano Letters, 2016, 16(1): 568-571.
- [19] JIANG S, SHI S, WANG X, et al. Nanomechanics and

- vibration analysis of graphene sheets via a 2D plate model[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2014, 47(4):45104-45111.
- [20] 李子昂,毛亚民,李成. 石墨烯谐振式压力传感器的研究进展[J]. 仪表技术与传感器,2022 (4): 1-8. LI Z ANG, MIAO Y M, LI CH. Research progress of graphene resonant pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022 (4): 1-8.

薛伟, 侯文, 王俊强,等. 基于十字梁结构的石墨烯

- 高压压力传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021, 459(4): 20-23.

 XUE W, HOU W, WANG J Q, et al. Design of graphene high pressure sensor based on cross beam structure[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021, 459(4): 20-23.
- [22] 赵程,周佳成,袁淑雅,等. 悬浮型石墨烯压力传感阵列的设计与研究[J]. 微电子学, 2022, 52(3): 449-453.

 ZHAO CH, ZHOU J CH, YUAN SH Y, et al. Design and research on a suspended graphene pressure sensor arrays[J]. Microelectronics, 2022, 52(3): 449-453.
- [23] GAMMELGAARD L, CARIDAD J M, CAGLIANI A, et al. Graphene transport properties upon exposure to PMMA processing and heat treatments [J]. 2D Materials, 2014, 1(3): 035005.
- [24] MELVÅS P, KÄLVESTEN E, ENOKSSON P. A, et al. Free-hanging strain-gauge for ultraminiaturized pressure sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 97-98: 75-82.
- [25] STAMPFER C, HELBLING T, OBERGFELL D, et al. Fabrication of single-walled carbon-nanotube-based pressure sensors [J]. Nano Letters, 2006, 6 (2): 233-237.
- [26] GONZÁLEZ P C, RAKOWSKI M, SEGUNDO D S, et al. CMOS-integrated poly-sige piezoresistive pressure sensor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33: 1204-1206.
- [27] GODOVITSYN I V, AMELICHEV V V, PANKOV V V, et al. A high sensitivity surface-micromachined pressure sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201; 274-280.
- [28] SMITH A D, NIKLAUS F, PAUSSA A, et al. Electromechanical piezoresistive sensing in suspended graphene membranes [J]. Nano Letters, 2013, 13: 3237-3242.

- [29] SMITH A D, NIKLAUS F, PAUSSA A, et al.
 Piezoresistive properties of suspended graphene
 membranes under uniaxial and biaxial strain in
 nanoelectromechanical pressure sensors [J]. ACS
 NANO, 2016, 10(11): 9879-9886.
- [30] WAGNER S, YIM C, MCEVOY N, et al. Highly sensitive electromechanical piezoresistive pressure sensors based on large-area layered PtSe(2) Films[J]. Nano Lett, 2018, 18(6): 3738-3745.
- [31] LI M, WU C, ZHAO S, et al. Pressure sensing element based on the BN-graphene-BN heterostructure [J].

 Applied Physics Letters, 2018, 112(14): 143502.

作者简介



刘瑛,2012年于东南大学获得学士学位,2014年于国防科学技术大学获得硕士学位,2019年于国防科学技术大学获得博士学位,现为国防科技大学智能科学学院助理研究员,主要研究方向为二维材料纳米器件、先进传感与测试技术。

E-mail: liuying@ nudt. edu. cn

Liu Ying received his B. Sc. degree from Southeast University

in 2012, and received his M.Sc. degree and PhD degree both from National University of Defense Technology in 2014 and 2019, respectively. He is currently a research associate at National University of Defense Technology. His main research interests include nano devices based on two-dimensional materials, advanced sensing and measurement technology.



吕克洪(通信作者),2001年于西安交 通大学获得学士学位,2003年于国防科学技术大学获得硕士学位,2008年于国防科学技术大学获得博士学位,现为国防科技大学智能科学学院副研究员,主要研究方向为先进

传感与测试技术。

E-mail: fhrlkh@ 163. com

Lyu Kehong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2001, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2003 and 2008, respectively. He is currently an associate professor at National University of Defense Technology. His main research interests include advance sensing and measurement technology.