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

收稿日期:2023-02-15 Received Date: 2023-02-15

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-electro-

^{*}基金项目:国家自然科学基金(12102461)项目资助

mechanical 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^[611]。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^[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_r* 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



Fig. 3 Schematic illustration of new fabrication process

复合异质薄膜从 FeCl。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。





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。



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。



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=7.42×10⁻⁵/kPa,降压过程灵敏度略有下降,约为 S=5.66×10⁻⁵/kPa。对比可知,所制备传感器灵敏度达 作者

Melvas^[24]

Hierold^[25]

Gonzalez^[26]

Godovitsyn^[27]

Smith^[28-29]

Stefan Wagner^[30]

Mengwei Li^[31]

本文

灵敏度/kPa

3.75 $\times 10^{-5}$

 1.06×10^{-5}

4.60 $\times 10^{-5}$

2. 37×10^{-4}

2.96×10⁻⁵

 $1.1 \times 10^{-4} \sim 1.64 \times 10^{-2}$

19. 1×10^{-5}

7.42×10⁻⁵(升压过程)

5.66×10⁻⁵(泄压过程)

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

2012 年

2013年

2013 年

2016年

2018年

2018年

2022年

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。

 $0 \sim 100$

 $0 \sim 100$

40~100

 $20 \sim 100$

19.1

 $0 \sim 70$

双王 中国大歌的型为夜感曲天敬及对此										
Table 1 Sensitivity comparison of different literatures										
年份		材料	尺寸/µm	压力范围/kPa						
2002 年		硅	100×100	10~140						
2007 年	碳	纳米管	100×100	0~140						

200×200

2 000×2 000

6×64

6×64

R16

多晶硅锗

硅

石墨烯

PtSe₂

BN/石墨烯/BN

PMMA/石墨烯

	表	1	不同文	献的压	力传感	な 器	录敏度x	寸比	
Fable	1	Sei	nsitivity	compa	rison o	of d	different	literatu	res

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 Ω_o 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压力测量性能评估系统。 目前,石墨烯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

- 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.

- [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 nanowireembedded 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] LI X P, LI Y, LI X, 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. Graphenepaper 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.
 LIZANG, MIAOYM, LICH. Research progress of graphene resonant pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022 (4):1-8.
- [21] 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
- [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.

Materials, 2014, 1(3): 035005.

- [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.