

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.06.01

石墨烯谐振式微质量传感器研究进展

肖行¹, 樊尚春^{1,2*}

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 量子传感技术工信部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 微质量传感器可以用于毒害气体、纳米颗粒的检测, 被广泛用于环境检测、医疗诊断等领域。近年来, 基于石墨烯材料的微质量传感器因其较大的表面积体积比、低电子噪声、优异的吸附性被广泛研究。本文针对一类基于谐振原理的超高灵敏度石墨烯微质量传感器展开综述, 重点论述了石墨烯谐振器的结构、激振拾振方案、质量敏感特性等问题, 总结了关于石墨烯谐振式微质量检测的进展及挑战。

关键词: 微质量; 石墨烯; 谐振器; 传感

中图分类号: TB9; O321

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)06-0001-06

Graphene-based Resonators for Micro-mass Sensing

XIAO Xing¹, FAN Shangchun^{1,2*}

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Key Laboratory of Quantum Sensing Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Micro-mass sensors can be applied to the detection of poisonous gases and nanoparticles, and are widely used in environmental detection, medical diagnosis and other fields. In the past few years, micro-mass sensors based on graphene materials have been extensively studied because of their large surface area to volume ratio, low electronic noise, and excellent adsorption. This article focuses on a type of ultra-high-sensitivity graphene micro-mass sensor based on the principle of resonance, discusses the structure of graphene resonators, vibration pick-up schemes, quality sensitivity characteristics and other issues, and summarizes the progress and the challenges of graphene resonance micro-mass detection.

Key words: micro-mass; graphene; resonator; sensing

0 引言

微质量传感器是指用于纳克级别质量检测的传感器, 是力学、微机电、信号处理等学科相互渗透形成的高新技术。在生物上, 可以用于蛋白质、病毒、DNA 的检测^[1]; 在化学上, 可以用于毒害气体、重金属粒子的检测^[2]; 在物理上, 可以用于湿度、细颗粒物(如 PM2.5)的检测^[3]。随着微加工技术的飞速发展, 基于石墨烯材料的微质量传感器因其灵敏度高、固有噪声低成为目前的研究热点。石墨烯微质量传感器按

工作原理可分为两类: 第一种是通过吸附物对石墨烯电导特性的改变实现吸附物的检测^[2,4], 这种方法研究较早, 且相对成熟, 但是易受温度、背景气体的影响, 并且无法用于检测一些中性粒子。随着微机电技术的发展, 石墨烯可以被激励振动并测量^[5], 一种新的基于石墨烯的微质量检测方法因此应运而生。第二种是通过吸附物对石墨烯谐振频率的改变实现质量检测, 这种方法适用范围广, 且具有直接数字量输出的特性, 是一种十分有潜力的微质量检测方法, 本文将针对这一类石墨烯谐振式微质量传感器研究现状展开综述。

收稿日期: 2021-10-03; 修回日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61773045, 61573033, 61721091)

引用格式: 肖行, 樊尚春. 石墨烯谐振式微质量传感器研究进展[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 1-6.

XIAO X, FAN S C. Graphene-based resonators for micro-mass sensing[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 1-6.

1 石墨烯谐振器的发展现状

2004 年,英国曼彻斯特大学物理学家 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 首次用机械剥离法成功从石墨中分离出单层石墨烯^[6]。之后相关研究表明石墨烯具有优异的力学特性,面内杨氏模量高达 1 TPa^[7],断裂强度超过 130 GPa^[8],为之后石墨烯谐振器的制成奠定了基础。2007 年,美国康奈尔大学 J Scott Bunch 等人^[5]首次向世界展示了由单个原子厚的悬浮石墨烯纳米带构成的谐振器。单层石墨烯片通过机械剥离的方法制备并被置于二氧化硅沟槽上,如图 1 所示,石墨烯两端因为范德华力被牢牢吸附在二氧化硅衬底上。实验研究了 1 ~ 5 μm 长,厚度从单层到 75 nm 的石墨烯片,测得室温真空条件下其谐振频率在 1 ~ 170 MHz 范围内,品质因数在 20 ~ 850 范围内。

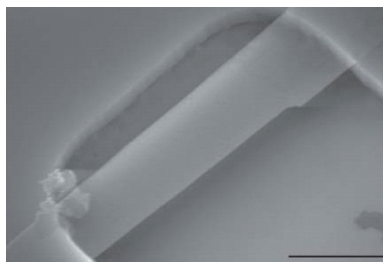


图 1 扫描电镜下的单层石墨烯片

Fig. 1 SEM image of the single-layer graphene sheet

2007 年之后,关于石墨烯谐振器的报道不断涌现,讨论的问题包括激励检测方案、振动模式、品质因数、批量制备技术、非线性振动等。西班牙阿拉巴马大学 D Garcia-Sanchez 等人^[9]发表论文探究了石墨烯谐振器的振动模式。他们使用一种新型扫描探针显微镜,测量了静电驱动的双端固支多层石墨烯纳米片的振动模式,实验中,除了观察到石墨烯的主振动以外,还观察到一种发生在石墨烯边缘的局部振动模式,即石墨烯片自由边缘处振幅明显大于中间部分的振幅,如图 2 所示。该振动模式被认为是不均匀应力导致的,这一点后来被证实^[10-12]。

2009 年,美国哥伦比亚大学 Changyao Chen 等人^[13]选择了一种纯电学的高频混合方法来驱动和检测石墨烯振动,使得石墨烯谐振器纳机电系统的发展向前迈出了重要一步。2010 年,美国康奈尔大学 Arend M Van Der Zande 等人^[14]通过使用化学气相沉积技术生长得到石墨烯,并通过图形化和转移技术在任意衬底上制备出阵列式悬浮石墨烯谐振器。实验研究了谐振频率、品质因数与激励电压、温度的关系,结果与之

前报道的剥离石墨烯谐振器一致,证明了这种大型阵列石墨烯谐振器制备方法的可行性。

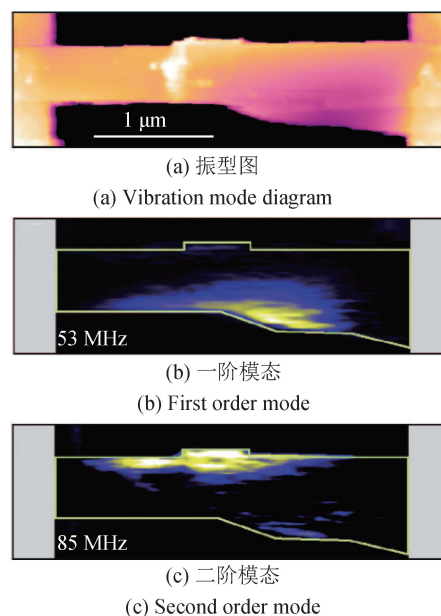
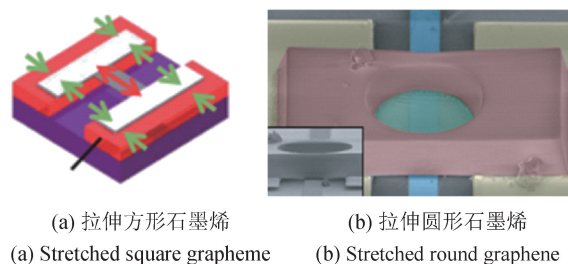


图 2 扫描电镜下的石墨烯振动模式

Fig. 2 SEM images of graphene vibration modes

2012 年和 2013 年,日本东京大学的 Oshidari 等人^[15]和美国哥伦比亚大学 Sunwoo Lee 等人^[16]均采用 SU-8 聚合物提升石墨烯谐振器的性能。前者利用 SU-8 胶的收缩性将拉伸应变施加到石墨烯上,如图 3(a) 所示,施加应变的石墨烯谐振器显示出更高的品质因数,其中最佳样品的品质因数超过 7000。后者利用 SU-8 固定化学气相沉积生成的圆形石墨烯谐振片边缘,如图 3(b) 所示,有效消除了边缘模式,提供干扰更少的共振谱,展示出更高的品质因数。



(a) 拉伸方形石墨烯 (b) 拉伸圆形石墨烯
(a) Stretched square grapheme (b) Stretched round graphene

图 3 SU-8 拉伸的石墨烯谐振器

Fig. 3 Graphene resonators stretched by SU-8

2014 年,香港理工大学靳伟团队^[17]报道了一种采用多层石墨烯膜片作为振动元件的谐振器。石墨烯膜的激振和拾振均由全光纤系统实现,如图 4 所示。石墨烯薄膜吸附在直径约 125 μm 的陶瓷套圈上,半径为 25 μm 的单模光纤插入陶瓷套圈中,波长为 λ_1 的激光作为激

励检测光源, 波长为 λ_2 的激光作为检测光源, 这种简化的石墨烯谐振器的激励与检测方案被广泛使用。

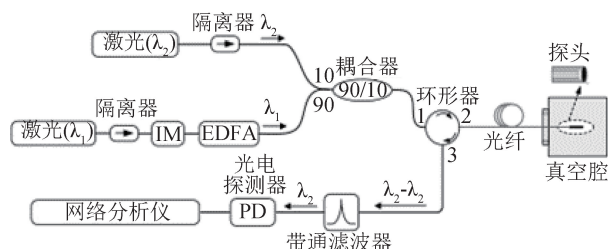


图4 全光纤石墨烯谐振器方案图

Fig. 4 Diagram of graphene resonator schemes based on fiber

2016~2018年, 荷兰代尔夫特理工大学 Robin J Dolleman, Dejan Davidovikj, Robin J Dolleman 等人^[18-20], 采用类似的激励检测方案, 研究了应力对石墨烯谐振器的影响, 并将其应用于压力测量。通过对金属悬浮环加热^[18]或激光照射的方式^[20]来改变圆形石墨烯内应力, 从而调制其谐振频率, 以提高其品质因数。同时, 验证了将其应用于压力测量的可行性^[19], 并实现了 9000 Hz/mbar 的灵敏度。2017年, 北京航空航天大学李成等人^[21-22]同样利用这种光纤激励检测方案, 研究了室温下压膜阻尼和薄膜预应力对石墨烯谐振器共振特性的影响, 在低预应力 (10^{-2} Pa) 下, 测出 125 μm 直径的圆形多层石墨烯膜片共振频率约为 59 KHz, 品质因数约为 75, 远低于真空 (10^{-6} Torr) 下的品质因数 2×10^5 。

2 石墨烯谐振式质量检测研究现状

石墨烯谐振器研究之初, 就有很多学者认为其在微质量检测上大有可为^[5,13-14]。在此之前, 已有不少学者使用碳纳米管实现了原子级别 (10^{-24} g) 的质量检测^[23-26]。相比之下, 石墨烯拥有更大的表面体积比, 更容易实现对待测粒子的吸附。相关的理论研究一时之间成为热点, 关于石墨烯的质量检测的设计、仿真验证的论文层出不穷^[27-35]。关于石墨烯谐振式质量传感的实验方面的科研突破也陆续被报道^[36-39], 接下来将依次就实验研究和理论研究展开综述。

2.1 实验研究

2009年, 美国哥伦比亚大学 Changyao Chen 等人^[13]测试了石墨烯谐振器对吸附质量的响应。通过在真空腔内将并五苯蒸发到器件上, 观察谐振器的频移。结果表明, 在没有施加栅极直流电压时, 由于石墨烯应力很小, 吸附物增加了其应力, 使频率增加。当施加栅极直流电压后, 吸附物对石墨烯应力的改变不再起主导作用, 因为等效质量增加使得谐振频率降低,

遵循 $(\frac{\Delta f}{f}) \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m}$ 的关系。

2015年, 英国牛津大学 Madhav Kumar 等人^[37]制作了 H 形的石墨烯谐振器, 如图 5 所示, 使用压阻效应测量了该谐振器的谐振频率和品质因数, 并表示在室温环境下使用该石墨烯谐振器有望实现 (1.41 ± 0.02) zg (即 10^{-21} g) 级别的质量检测, 在 10^{-6} Torr 压强下可以实现 10^3 数量级的品质因数。

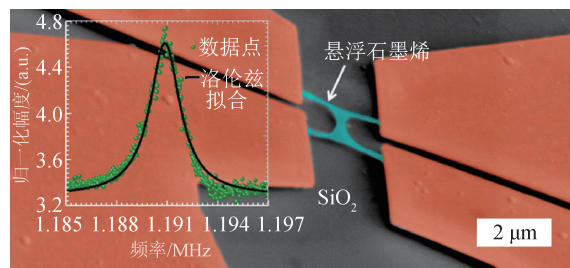


图5 H形石墨烯谐振器

Fig. 5 H-shaped graphene resonator

2018年, 日本北陆先端科学技术大学院大学 Manoharan Muruganathan 等人^[38-39]使用石墨烯谐振器实现了对氩氢混合气体 zg (即 10^{-21} g) 级别的检测。在表面有 285 nm 厚 SiO_2 的硅基底上转移化学气相沉积生成的单层石墨烯片。他们将制成的石墨烯谐振器置于真空控制器内, 初始压力为 1.1×10^{-4} Pa, 通过质量流量控制器引入氩氢混合气体, 真空室的气压可以反映氩氢气体的浓度, 然后测得不同气压下的谐振器的频率, 实验结果如图 6 所示。初始状态的谐振频率为 95.5 MHz, 品质因数约为 45。随着氩氢气体的不断注入, 石墨烯谐振器的谐振频率下降, 并遵循规律 $\Delta f = \Delta m \frac{f_0}{2m_{\text{GNR}}}$, 可以推算出从 5.6×10^{-3} Pa 到 6.2×10^{-3} Pa, 检测到的吸附质量约为 886 zg。另一方面, 质量品质因数也开始降低, 这是质量吸附后的材料阻尼增加, 和谐振器与气体相互作用引起的空气阻尼增加共同导致的。

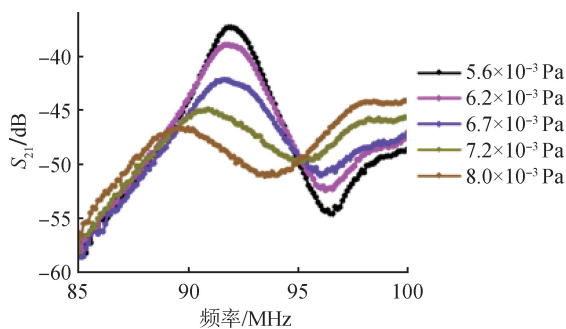


图6 石墨烯谐振器频率对吸附质量的响应图

Fig. 6 Frequencies of graphene resonators versus absorption mass

2.2 理论研究

关于石墨烯谐振器微质量传感的理论研究方法主要有经典连续介质理论^[40-41]、非局部理论^[42-44]、分子结构力学理论^[45-47]和分子动力学理论^[27-35]。其中,分子动力学因其理论基础扎实、预测精度高,已成为研究石墨烯谐振器特性的一种重要方法。

2011 年,加拿大曼尼托巴大学的 Behrouz Arash 等人^[30]采用分子动力学模拟的方法计算了当惰性气体原子附着在石墨烯上时(如图 7 所示),石墨烯的谐振频率变化。模拟结果表明,10 nm × 10 nm 的石墨烯谐振器对吸附质量的灵敏度可达 10^{-21} g 量级。这为基于石墨烯谐振器的高精度质量传感器研究提供了一定的理论基础。2012 年,德国包豪斯大学的 JIANG Jinwu 等人^[33]采用分子动力学模拟研究石墨烯谐振器非线性振动下对吸附质量的灵敏度。结果表明,如果激励能量约为谐振器初始动能的 2.5 倍,则频偏的质量灵敏度增加 2 倍,其机制是非线性振动在石墨烯中诱发了有效应变,应变的增加会提升谐振频率,进而提高质量灵敏度。对于应变和谐振频率的关系,已有学者做了相关研究。

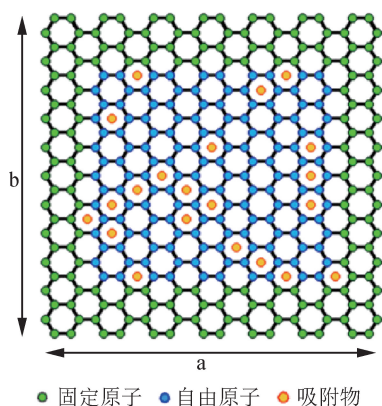


图 7 吸附惰性气体的石墨烯分子动力学模型

Fig. 7 Molecular dynamics model of graphene sheets with absorption

2017 年,Ke Duan 等人^[31]用分子动力学模拟的方法研究了碳纳米管支撑的石墨烯片形成的特殊结构的谐振特性,如图 8 所示,重点研究了吸附质量对此结构的谐振频率的影响,并验证了其作为质量传感器的可行性。计算结果表明这种柱撑石墨烯的质量灵敏度可达 10^{-24} g,且支撑石墨烯的碳纳米管的柱间距离对传感性能影响显著。这种创新的结构为构建高精度的石墨烯谐振式质量传感器提供了新的思路。

2019 年,HAN Guangrong 等人^[29]采用分子动力学模拟计算了石墨烯边缘模态的谐振频率以及其对吸附

质量的敏感度,如图 9 所示。结果表明,边缘模式的质量敏感度是普通一阶模式的 3 倍。

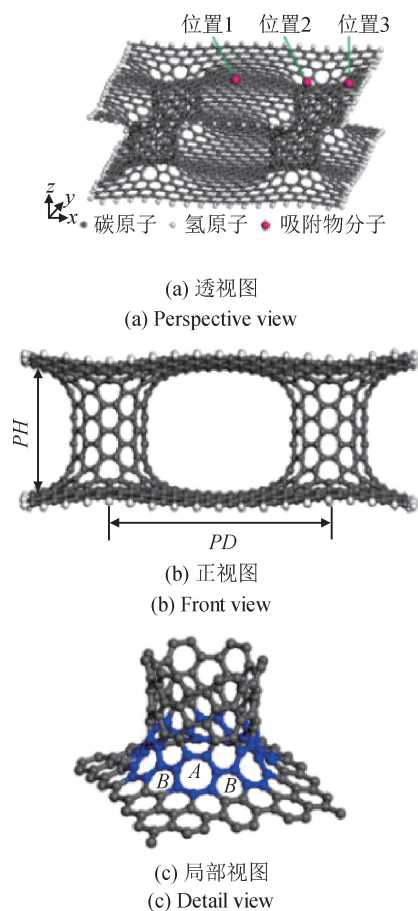


图 8 碳纳米管支撑的石墨烯片分子动力学模型

Fig. 8 Molecular dynamics model of graphene sheets supported by carbon nanotubes

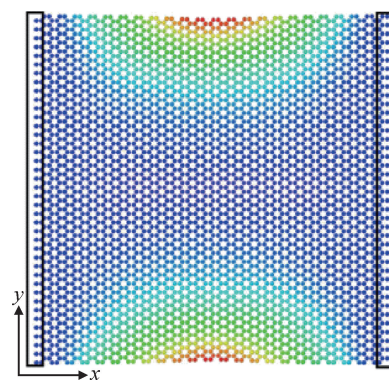


图 9 石墨烯边缘模式分子动力学模型

Fig. 9 Molecular dynamics model of the edge mode of graphene sheets

3 总结与展望

石墨烯谐振式微质量传感器是一种非常有前景的超高灵敏度质量检测器件,可以轻松实现 10^{-21} g 级别

的质量检测,实验室环境中甚至可达 10^{-24} g 的极限分辨力,不仅可以用于进行气体检测、生物检测(如细胞、DNA、病毒、抗体等检测),也可以用于进行金属粒子的质量测量。在环境监测、医学诊断、太空实验各个方面都大有可为。

目前,石墨烯谐振式质量检测还只能在实验室里完成,实现商用还有很长一段距离。具体的难点有以下几个方面:①石墨烯谐振器的制造虽然经历了10多年的发展,但是流程依旧较为复杂,需要昂贵的设备,且难以保证成品率;②目前石墨烯谐振器的品质因数只有在低温或低压实验环境下才可以突破1000,如何保证生产环境下的品质因数是一个难题;③现在还没有石墨烯在液相中激励起振的报道,因为液相中阻尼更大,石墨烯谐振器品质因数将会更低,这将很大程度上限制其在生物、环境检测上的应用;④石墨烯谐振式质量传感器要求石墨烯裸露在外部,与待测物质直接接触,如何防止传感器受损仍有待解决;⑤在生产环境下解决吸附与解吸的问题,使传感器可以重复使用;⑥传感器的集成化问题,特别是采用光学激励或检测时,传感器的集成化和小型化还亟待解决。这些难点是现在及将来石墨烯谐振式微质量传感器的研究热点,相信随着一批又一批科研工作者不断投入这些研究领域以及微机械加工技术的飞速发展,这些问题将会不断被攻克。

参考文献

- [1] LIU Y, DONG X, CHEN P. Biological and chemical sensors based on graphene materials[J]. Chemical society reviews, 2012, 41(6): 307.
- [2] YUAN W, SHI G. Graphene-based gas sensors[J]. Journal of materials chemistry A, 2013, 1(35): 78-91.
- [3] SCHEDIN F, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene[J]. Nature materials, 2007, 6(9): 52-55.
- [4] MENG F L, GUO Z, HUANG X J. Graphene-based hybrids for chemiresistive gas sensors[J]. Trac trends in analytical chemistry, 2015, 68: 37-47.
- [5] BUNCH J S, VAN DER ZANDE A M, VERBRIDGE S S, et al. Electromechanical resonators from graphene sheets[J]. Science, 2007: 490-493.
- [6] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004.
- [7] LEE C, WEI X, KYSSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008: 385-388.
- [8] WEI Y, WANG B, WU J, et al. Bending rigidity and Gaussian bending stiffness of single-layered graphene[J]. Nano letters, 2013, 13(1): 26-30.
- [9] GARCIASANCHEZ D, VAN A D Z, PAULO A S, et al. Imaging mechanical vibrations in suspended graphene sheets[J]. Nano Letters, 2008.
- [10] CHANGWAN K, MD DAI, KILHO E. Finite-size effect on the dynamic and sensing performances of graphene resonators: the role of edge stress[J]. Beilstein journal of nanotechnology, 2016, 7(1): 685-696.
- [11] JIANG J W, WANG J S. Why edge effects are important on the intrinsic loss mechanisms of graphene nanoresonators[J]. Journal of applied physics, 2012, 111(5): 490.
- [12] KIM S Y, PARK H S. The importance of edge effects on the intrinsic loss mechanisms of graphene nanoresonators[J]. Nano letters, 2009, 9(3): 69-74.
- [13] CHEN C, ROSENBLATT S, BOLOTIN K I, et al. Performance of monolayer graphene nanomechanical resonators with electrical readout[J]. Nature nanotechnol, 2009, 4(12): 61-67.
- [14] ZANDE A, BARTON R A, ALDEN J S, et al. Large-scale arrays of single-layer graphene resonators[J]. Nano letters, 2010.
- [15] OSHIDARI Y, HATAKEYAMA T, KOMETANI R, et al. High quality factor graphene resonator fabrication using resist shrinkage-induced strain[J]. Applied physics express, 2012.
- [16] LEE S, CHEN C, DESHPANDE V V, et al. Electrically integrated SU-8 clamped graphene drum resonators for strain engineering[J]. Applied physics letters, 2013.
- [17] MA J, JIN W, XUAN H, et al. Fiber-optic ferrule-top nanomechanical resonator with multilayer graphene film[J]. Optics letters, 2014.
- [18] DAVIDOVIKJ D, POOT M, CARTAMIL BUENO S J, et al. On-chip heaters for tension tuning of graphene nanodrums[J]. Nano letters, 2018.
- [19] DOLLEMAN R J, DAVIDOVIKJ D, CARTAMIL BUENO S J, et al. Graphene squeeze-film pressure sensors[J]. Nano letters, 2016, 16(1): 68-71.
- [20] DOLLEMAN R J, HOURI S, CHANDRASHEKAR A, et al. Opto-thermally excited multimode parametric resonance in graphene membranes[J]. Scientific reports, 2018.
- [21] LI C, XIAO J, GUO T, et al. Interference characteristics in a fabry-perot cavity with graphene membrane for optical fiber pressure sensors[J]. Microsystem technologies, 2015.
- [22] LI C, LAN T, YU X, et al. Room-temperature pressure-induced optically-actuated fabry-perot nanomechanical resonator with multilayer graphene diaphragm in air[J]. Nanomaterials, 2017, 7(11): 366.
- [23] CHASTE J, EICHLER A, MOSER J, et al. A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution[J]. Nature nanotechnology, 2012, 7(5): 301-304.

- [24] JENSEN K, KIM K, ZETTL A. An atomic-resolution nanomechanical mass sensor[J]. *Nature nanotechnology*, 2008, 3(9): 33–37.
- [25] LASSAGNE B, GARCIA SANCHEZ D, AGUASCA A, et al. Ultrasensitive mass sensing with a nanotube electromechanical resonator[J]. *Nano letters*, 2008.
- [26] YANG Y T, CALLEGARI C, FENG X L, et al. Zeptogram-scale nanomechanical mass sensing[J]. *Nano letters*, 2006, 6(4): 83–86.
- [27] XIAO X, FAN S C, LI C, et al. Stress-insensitive resonant graphene mass sensing via frequency ratio[J]. *Sensors*, 2019.
- [28] XIAO X, FAN S C, LI C. The effect of edge mode on mass sensing for strained graphene resonators[J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 189.
- [29] HAN G R, JIANG J W. Edge-mode-based graphene nanomechanical resonators for high-sensitivity mass sensor[J]. *Europhysics Letters*, 2018.
- [30] ARASH B, WANG Q, DUAN W H. Detection of gas atoms via vibration of graphenes[J]. *Physics letters A*, 2011, 375(24): 11–15.
- [31] DUAN K, LI L, HU Y, et al. Pillared graphene as an ultra-high sensitivity mass sensor[J]. *Scientific reports*, 2017.
- [32] KIM S Y, PARK H S. On the utility of vacancies and tensile strain-induced quality factor enhancement for mass sensing using graphene monolayers[J]. *Nanotechnology*, 2010.
- [33] JIANG J W, PARK H S, RABCZUK T. Enhancing the mass sensitivity of graphene nanoresonators via nonlinear oscillations: the effective strain mechanism[J]. *Nanotechnology*, 2012.
- [34] JALALI S K, NAEI M H, PUGNO N M. Graphene-based resonant sensors for detection of ultra-fine nanoparticles: molecular dynamics and nonlocal elasticity investigations[J]. *Nano*, 2015, 10(2): 1–103.
- [35] KWON O K, KIM K S, PARK J, et al. Molecular dynamics modeling and simulations of graphene-nanoribbon-resonator-based nanobalance as yoctogram resolution detector[J]. *Computational materials science*, 2013, 67: 29–33.
- [36] CHEN C, LEE S, DESHPANDE V V, et al. Graphene mechanical oscillators with tunable frequency[J]. *Nature nanotechnology*, 2013, 8(12): 923–927.
- [37] KUMAR M, BHASKARAN H. Ultrasensitive room-temperature piezoresistive transduction in graphene-based nanoelectromechanical systems[J]. *Nano letters*, 2015.
- [38] MURUGANATHAN M, MIYASHITA H, KULOTHUNGAN J, et al. Zeptogram level mass sensing of light weight gas molecules using Graphene Nanomechanical (GNEM) resonator[C]. 2018 IEEE Sensors, 2018.
- [39] MURUGANATHAN M, SETO F, MIZUTA H. Graphene nanomechanical resonator mass sensing of mixed H_2/AR_{gas} [J]. *International journal of automation technology*, 2018, 12(1): 24–28.
- [40] BEHFAR K, NAGHDABADI R. Nanoscale vibrational analysis of a multi-layered graphene sheet embedded in an elastic medium[J]. *Composites science and technology*, 2005.
- [41] KITIPORNCHAI S, HE X Q, LIEW K M. Continuum model for the vibration of multilayered graphene sheets[J]. *Physical review B*, 2005.
- [42] JIANG R W, SHEN Z B, TANG G J. Vibration analysis of a single-layered graphene sheet-based mass sensor using the galerkin strip distributed transfer function method[J]. *Acta mechanica*, 2016.
- [43] SHEN Z B, TANG H L, LI D K, et al. Vibration of single-layered graphene sheet-based nanomechanical sensor via nonlocal kirchhoff plate theory[J]. *Computational materials science*, 2012, 61: 200–205.
- [44] ZHOU S M, SHENG L P, SHEN Z B. Transverse vibration of circular graphene sheet-based mass sensor via nonlocal kirchhoff plate theory[J]. *Computational materials science*, 2014, 86: 73–78.
- [45] CHENG Y Z, SHI G Y. Equivalent mechanical properties of graphene predicted by an improved molecular structural mechanics model[J]. *Key engineering materials*, 2014: 351–356.
- [46] FIROUZ-ABADI R D, MOSHREFZADEH-SANI H, MOHAMMADKHANI H, et al. A modified molecular structural mechanics model for the buckling analysis of single layer graphene sheet[J]. *Solid state communications*, 2016, 225: 12–16.
- [47] SHI G, ZHAO P. A new molecular structural mechanics model for the flexural analysis of mono layer graphene[J]. *Cmes-computer modeling in engineering & sciences*, 2011, 71(1): 67–92.

作者简介

肖行(1996–), 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院博士生。



樊尚春(1962–), 北京航空航天大学教授, 国家重点学科“精密仪器及机械”责任教授, 先进传感技术方向带头人。2012 年教育部“航空航天先进传感技术”创新团队负责人。