

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.04.01

石墨烯谐振式振动测量研究进展

赵鹏程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. 工信部量子传感技术重点实验室, 北京 100191)

摘要: 石墨烯是一种新型的超薄材料, 单层石墨烯理论厚度仅为 0.335 nm, 基于石墨烯优异的材料特性和机械性能, 可望设计制作出结构优、性能佳的石墨烯谐振敏感结构, 实现超高灵敏度振动测量。本文就石墨烯谐振式振动测量研究进展进行综述, 包括石墨烯谐振式振动测量研究现状、石墨烯谐振器的实验研究和理论分析等。振动测量在航空航天、汽车、微电子、建筑等方面具有普遍而重要的需求, 探索研究微纳结构、超高灵敏度的石墨烯振动测量具有十分重要的理论研究和应用价值。

关键词: 石墨烯; 微纳结构; 振动; 超高灵敏度; 综述

中图分类号: TB89

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)04-0001-03

Research Progress of Graphene Resonant Vibration Measurement

ZHAO Pengcheng¹, FAN Shangchun^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Quantum Sensing Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: Graphene is a new type of ultrathin material, and the theoretical thickness of single-layer graphene is only 0.335 nm. Due to its excellent material and mechanical properties, graphene resonator is promising to be designed with good structure and performance, achieving ultrahigh sensitive vibration measurement. In this paper, research progress of graphene resonant vibration measurement is reviewed, including research status of graphene resonant vibration measurement, experimental research and theoretical analysis of graphene resonator, and other parts. Vibration measurement has wide and vital demand in aeronautics and astronautics, automobile, micro-electronics, architecture and other industries. Therefore, it is of great theoretical significance and practical value to explore and study the micro-nano structure and graphene vibration measurement with ultrahigh sensitivity.

Key words: graphene; micro-nano structure; vibration; ultrahigh sensitivity; review

0 引言

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^[1]。石墨烯是一种新型的超薄材料, 单层石墨烯的理论厚度只有 0.335 nm, 其面内杨氏模量为 1 TPa, 断裂强度达 130 GPa, 具有出色的材料特性和机械性能, 自然引起了传感技术领域专家的

关注, 研究基于石墨烯材料的多种原理的新型微纳传感器。振动是自然界存在的最为广泛的现象之一, 振动测量能反映物体的动态特性, 特别是航空航天、微电子等领域对高灵敏度振动检测具有迫切需求, 因此基于石墨烯的超高灵敏度振动测量成为研究热点之一。本文对石墨烯谐振式振动测量研究现状、石墨烯谐振器的实验研究和理论分析等进行综述。

1 石墨烯谐振式振动测量研究现状

2012 年, 韩国国立交通大学 Kang J W 等首次研究了基于石墨烯纳米带谐振器的超高灵敏度加速度计, 该加速度计通过检测谐振频率偏移或电容变化量来获取加速度值, 并采用经典分子动力学方法仿真研究了其静态和动态性能^[2]。2015 年, Kang J W 研究了一种高灵敏度的十字形石墨烯谐振式加速度计, 分子动力学仿真结果表明当加速度高于 10^{13} g 时, 谐振频率与加

收稿日期: 2017-06-12; 修回日期: 2017-06-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ35046103); 国家自然科学基金创新群体延续资助(61421063); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT_16R02)

作者简介: 赵鹏程(1993-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 研究方向为新型微纳传感器; 樊尚春(1962-), 男, 内蒙古包头人, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进传感技术及其应用、MEMS 传感器及其系统。

速度成正相关^[3]。由于该加速度计在敏感极高加速度值时才表现出测量的可行性,因此不具有实际参考意义。

2015 年,美国哥伦比亚大学 Hone J 课题组提出并制作了采用 SU-8 胶敏感质量块的石墨烯加速度计,如图 1 所示^[4]。在文章[5]中 Hone J 提出了鼓形石墨烯谐振器的制备方法,利用 deep-UV 光刻在硅基底上产生栅极,再通过 PECVD 法生长一层 SiO_2 来覆盖栅极,然后采用 CMP 法抛光 SiO_2 层后将石墨烯薄膜转移在其上,最后将石墨烯薄膜周边固支在 SU-8 胶基底。在此基础上,该石墨烯加速度计在石墨烯薄膜中心处制作出圆柱状 SU-8 胶质量块,实现了加速度测量,虽然检测方式为非谐振式,但为石墨烯谐振式振动传感器的制备提供了科学的工艺路线。

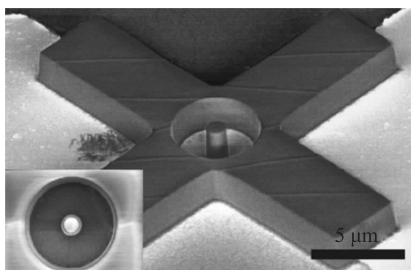


图 1 石墨烯加速度计 SEM 图

2017 年,国防科技大学 Jiea W 等利用有限元分析软件 COMSOL 仿真了加速度与具有不同结构尺寸石墨烯薄膜和敏感质量块的石墨烯谐振敏感结构谐振频率之间的关系,加速度谐振敏感结构如图 2 所示^[6]。

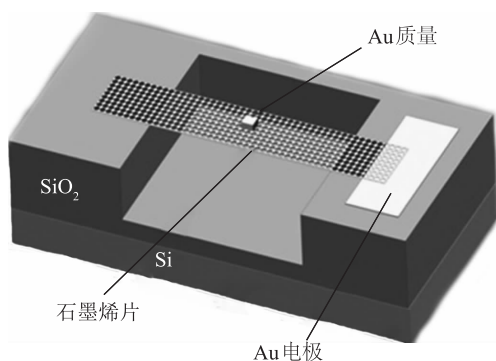


图 2 石墨烯谐振式加速度谐振敏感结构

在石墨烯谐振式振动测量方面的实验和理论研究工作屈指可数,暂时还没有基于石墨烯的超高灵敏度谐振式振动测量的完整工作发表。目前在公开文献中,与石墨烯谐振式振动测量有关的研究工作主要集中在石墨烯谐振器的实验研究和理论分析等方面。

2 石墨烯谐振器实验研究

2007 年,美国康奈尔大学 McEuen P L 课题组首次将石墨烯膜应用于谐振器上,谐振器原型如图 3 所示^[7]。实验通过机械剥离法制备出单层石墨烯薄膜,利用范德华力将其两端固支在设有凹槽的 SiO_2 绝缘层上。实验利用光干涉法通过测量反射光强检测薄膜振动,得出单层石墨烯纳米带(长×宽为 $1.1 \mu\text{m} \times 1.93 \mu\text{m}$)的最低阶谐振频率(基频)为 70.5 MHz,机械品质因数(Q 值)为 78,结果得到的谐振频率远高于石墨烯仅是弯曲的谐振频率,说明谐振器在其长度方向存在着较大的张力,这种较大的张力可能是剥离过程中石墨和氧化物表面之间摩擦力的拉伸作用导致的。

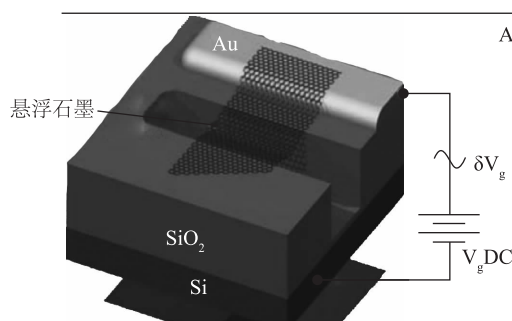


图 3 石墨烯谐振器原型图

2009 年,美国哥伦比亚大学 Hone J 课题组研制出了单层石墨烯谐振器,如图 4 所示,并实现了机械振动的电学检测^[8]。实验表明:温度越低,谐振频率越高,Q 值也越大,在 5 K 时 Q 值可达 14000;谐振频率与附加质量、外界温度和硅电极电压有关。

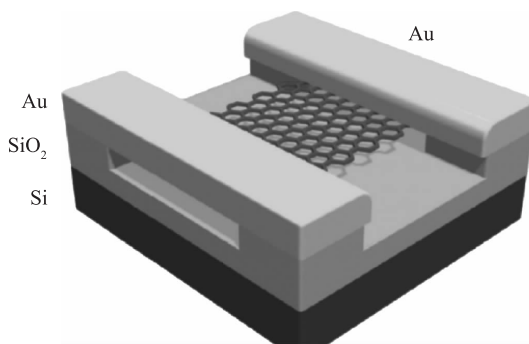


图 4 单层石墨烯谐振器

2012 年,日本东京大学的 Oshidari Y 等人利用 SU-8 胶的热缩效应使附着在其上的石墨烯薄膜获得张力,制备出如图 5 所示石墨烯谐振器^[9]。实验观察到在退火后石墨烯谐振器的谐振频率和 Q 值有一定程度的增加。室温下,长度 $10 \mu\text{m}$ 的石墨烯谐振器 Q 值

最高超过了 7000。

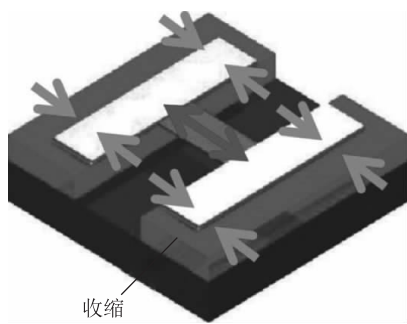


图 5 SU-8 胶热缩效应示意图

2014 年，北京航空航天大学樊尚春教授领导的研究小组着手石墨烯谐振器的实验研究，设计制备了一种圆形薄膜石墨烯谐振器，搭建了光学激励/检测实验平台，分析了结构参数与温度对其谐振特性的影响规律，进行了室温常压下谐振性能、温度影响以及室温下压力传感效应实验测试^[10]。

3 石墨烯谐振器理论分析

学术界普遍认可的材料谐振特性的理论研究方法分为基于连续介质力学和基于纳米量级力学的分析方法，理论研究方法可以借助 ANSYS 等有限元分析软件或 LAMMPS 等分子动力学仿真软件进行分析、解算。

2008 年，瑞典查尔默斯技术大学 Atalaya J 等将单层石墨烯等效成弹性薄板，基于连续介质弹性理论得出了在施加外力时石墨烯的平衡形状和运动方程^[11]。文章分析了无缺陷四边固支石墨烯的静态响应和动态响应，给出了谐振频率近似计算公式，得到的不同振动模式下的谐振频率略大于通过量子力学和实验等方法得到的石墨烯的谐振频率，如图 6 所示。

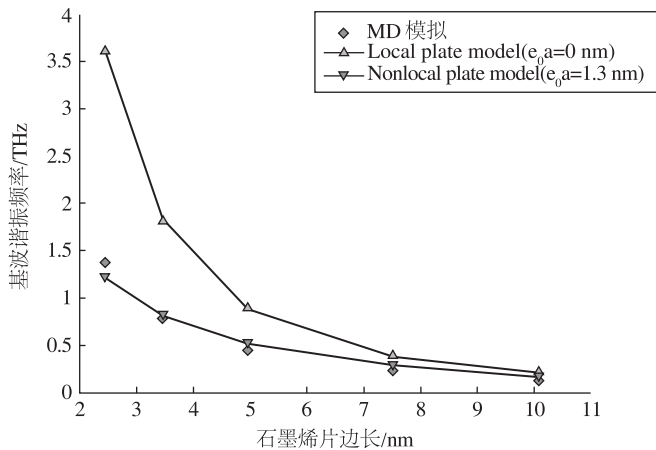


图 6 不同方法计算出的四边固支单层石墨烯基频

2009 年，印度理工学院 Murmu T 等利用非局部弹性理论分析了嵌在弹性介质中的单层石墨烯的振动特性^[12]，发现尺寸较小时，单层石墨烯的基频对尺寸变化十分敏感。

目前，分子动力学法是研究纳米材料特性使用最广泛的方法。2012 年，韩国世明大学 Kwon O K 等利用分子动力学方法分析了纳米压痕下石墨烯谐振子的力学响应，发现石墨烯谐振子很大程度上可以被纳米压力和初始位移调谐，石墨烯谐振式传感器也因此具有做成 NEMS 传感器的巨大潜力^[13-14]。

2014 年，华中科技大学汪学方教授等用有限元法研究了周边固支方形石墨烯膜的谐振频率与差压、预应力、结构参数的关系^[15]。

同年，北京航空航天大学樊尚春教授领导的研究小组开始开展单层石墨烯谐振器的理论研究，采用分子动力学方法研究了单层石墨烯谐振子的谐振特性，包括自由振动时的谐振频率和振型，以及尺寸、手性、应变、初始位移、边界条件等因素对其谐振特性的影响^[16-17]。

4 结论

自 2004 年首次通过机械剥离法制备出单层石墨烯起，国内外有关石墨烯的研究涌现出大量成果。但在具有超高灵敏度的石墨烯谐振式振动测量方面，系统的理论和实验研究鲜有报道。在石墨烯谐振器特性方面，缺少影响谐振子 Q 值的主要因素及其规律的探索研究。

大结构尺寸的敏感结构适合低 g (重力加速度) 测量，而当结构尺寸越小时，谐振频率将变高，但同时将获得更优越的动态性能，包括更短的上升时间，更小的超调等，这些对于高 g 测量有很好的应用前景。比如冲击试验等振动测试，在航空航天、武器装备、国家重大工程、计量标准、大型装备制造等方面的研究、生产和测试中具有普遍而巨大的需求，因此探索超高灵敏度石墨烯振动测量具有十分重要的研究意义。

针对高 g 测量如冲击、跌落试验的特殊应用需求，我们拟采用典型的石墨烯谐振式振动传感器，结构如图 2 所示。从石墨烯谐振式振动传感器整体结构的优化设计与测试、石墨烯梁谐振子谐振特性研究、具有敏感质量块的石墨烯梁谐振子成型的理论及实验研究等关键技术路线出发，建立石墨烯谐振式振动传感器模型，揭示其工作机理、传感器性能的主要影响因素及影响规律，给出石墨烯谐振式振动传感器的优化设

(下转第 8 页)

- Trends. IEEE Computer Society, 2006: 195 – 202.
- [18] 梅金燕. 双目测距系统中快速匹配算法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [19] Kuglin C D, Hines D C. The phase correlation image alignment method[C]//In Proc of IEEE Int Conf on Cybernetics and Society, 1975: 163 – 165.
- [20] 肖志涛, 卢晓方, 耿磊, 等. 基于极线校正的亚像素相位立体匹配方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 12(43): 225 – 230.
- [21] 林俊义, 黄常标, 刘斌, 等. 提高双目视觉立体匹配精度的一种方法[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(6): 64 – 66.
- [22] 胡海. 基于双目立体视觉的相位匹配算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [23] 成剑华. 基于相位匹配的自由曲面双目视觉测量方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [24] HOSNI A, BLEYER M, GELAUTZ M, ET AL. LOCAL STEREO MATCHING USING GEODESIC SUPPORT WEIGHTS[C]// IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING. IEEE, 2010: 2093 – 2096.
- [25] Zitnick C L, Kanade T. A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion detection[J]. Proceedings IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(7): 675 – 684.
- [26] 朱素杰, 周波, 刘忠艳. 一种基于相位的立体匹配算法[J]. 工业仪表与自动化装置. 2013(2): 101 – 104.

(上接第 3 页)

计理论, 设计传感器整体结构。同时揭示影响石墨烯梁谐振子 Q 值的关键因素及规律, 制作高 Q 值的石墨烯梁谐振子, 研制石墨烯谐振式振动传感器原理样机。并以此为突破口, 开展针对更多应用背景的石墨烯谐振式振动传感器或针对其他参数测量的石墨烯谐振式传感器的研究。

参 考 文 献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666.
- [2] Kang J W, Lee J H, Hwang H J, et al. Developing accelerometer based on graphene nanoribbon resonators[J]. Physics Letters A, 2012, 376(45): 3248 – 3255.
- [3] Kang J W, Park J H, Lee G Y, et al. Molecular dynamics simulation on crossroad – type graphene – resonator accelerometer[J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoscience, 2015, 12(11): 4186 – 4190.
- [4] Hurst A M, Lee S, Cha W, et al. A graphene accelerometer[C]//Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2015 28th IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 865 – 868.
- [5] 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, 102(15): 666.
- [6] Jiea W, Hua F, Wang X, et al. Acceleration sensing based on graphene resonator[C]//Second International Conference on Photonics and Optical Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2017: 102562E – 102562E – 8.
- [7] Bunch J S, van A M, Verbridge SS, et al. Electromechanical Resonators from Graphene Sheets[J]. Science, 2007, 315(5811): 490.
- [8] Chen C, Rosenblatt S, Bolotin K I, et al. Performance of monolayer graphene nanomechanical resonators with electrical readout[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(12): 861 – 867.
- [9] Oshidari Y, Hatakeyama T, Kometani R. High Quality Factor Graphene Resonator Fabrication Using Resist Shrinkage – Induced Strain[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(11): 7201.
- [10] 庠玉梅. 谐振式石墨烯膜压力传感效应研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.
- [11] Atalaya J, Isacsson A, Kinaret J M. Continuum elastic modeling of graphene resonators[J]. Nano letters, 2008, 8(12): 4196 – 4200.
- [12] Murmu T, Pradhan S C. Vibration analysis of nano – single – layered graphene sheets embedded in elastic medium based on nonlocal elasticity theory[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(6): 064319.
- [13] Kwon O K, Lee G Y, Hwang H J, et al. Molecular dynamics modeling and simulations to understand gate – tunable graphene – nanoribbon – resonator[J]. Physica E: Low – dimensional Systems and Nanostructures, 2012, 45: 194 – 200.
- [14] Kwon O K, Lee J H, Park J, et al. Molecular dynamics simulation study on graphene – nanoribbon – resonators tuned by adjusting axial strain[J]. Current Applied Physics, 2013, 13(2): 360 – 365.
- [15] Xionghui Gong, Shengwei Jiang, Xuefang Wang, et al. Finite element analysis of graphene resonator tuned by pressure difference[C]. 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2014: 520 – 523.
- [16] 邢维巍, 张晨霄, 樊尚春, 等. 石墨烯谐振特性研究进展[J]. 无机材料学报, 2016, 31(7): 673 – 680.
- [17] 张晨霄. 单层石墨烯谐振子谐振特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.