

# 基于悬浮式H型石墨烯的纳机电加速度计设计

谷妍霞<sup>1</sup>, 刘文耀<sup>1,2\*</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>, 杨泽宇<sup>1</sup>, 田昊源<sup>1</sup>, 唐军<sup>1,2</sup>, 刘俊<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 量子传感与精密测量仪器山西省重点实验室, 山西 太原 030051;  
2. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 石墨烯因超薄的薄膜厚度和优异的电学、机械性能成为纳机电系统领域膜材料的理想选择, 在传感领域有极大的应用潜力。现有的二维材料纳机电加速度传感器尽管表现出小体积优势, 但器件灵敏度亟需提升。提出了基于悬浮式H型石墨烯-质量块的纳机电加速度谐振器结构, 探究了H型石墨烯的特性。仿真了H型石墨烯薄膜尺寸、质量块尺寸对谐振频率的影响, 确定了石墨烯谐振器的尺寸。通过梁与质量块交界处的传感动力学分析, 解释了谐振器灵敏度提升与应力分布的关联机制。最终, 传感器位移灵敏度达到47.30 nm/nN, 与体积相同的传统悬浮式石墨烯加速度计相比, 不增加质量块尺寸, 灵敏度可提高3.76倍, 品质因数可提升2.46倍。该设计为加速度计、陀螺仪、位移传感等低成本、高灵敏度、超小型化纳米机械传感器的性能改进提供参考。

**关键词:** 悬浮石墨烯; 力学特性; 有限元法; 高灵敏加速度计; 纳机电系统

**中图分类号:** TH741; TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025019

**引用格式:** 谷妍霞, 刘文耀, 李伟, 等. 基于悬浮式H型石墨烯的纳机电加速度计设计[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 138-147.

GU Yanxia, LIU Wenyao, LI Wei, et al. Design of nano-electromechanical accelerometers based on suspended H-shape graphene[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 138-147.

## Design of Nano-Electromechanical Accelerometers Based on Suspended H-Shape Graphene

GU Yanxia<sup>1</sup>, LIU Wenyao<sup>1,2\*</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, YANG Zeyu<sup>1</sup>, TIAN Haoyuan<sup>1</sup>,  
TANG Jun<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>1,2</sup>

(1. Shanxi Province Key Laboratory of Quantum Sensing and Precision Measurement Instrument,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Graphene, an ultrathin material, features excellent electrical and mechanical properties, making it an ideal candidate for membrane materials in the field of nano-electromechanical systems. It shows great potential for sensing applications. The size of current nano-electromechanical sensors is extremely small, and the primary challenge lies in enhancing device sensitivity. In this work, a novel suspended H-shaped graphene resonator for acceleration is first proposed, and the properties of the H-shape graphene are explored. The effect of the size of H-shape graphene and its mass on frequency and displacement is simu-

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3203400); 国家自然科学基金资助项目(U21A20141, 62273314, 51821003)

作者简介: 谷妍霞(2000-), 女, 硕士生, 主要从事薄膜谐振器传感研究。E-mail: s202206009@st.nuc.edu.cn。

\* 通信作者: 刘文耀(1988-), 男, 教授, 博士, 主要从事微腔量子传感研究。E-mail: liuwenyao@nuc.edu.cn。

lated, and the final dimensions of the graphene resonator are designed. The correlation between device sensitivity enhancement and stress distribution is explored by analyzing the sensing dynamics at the beam-mass interface. Eventually, the displacement sensitivity of the sensor can reach 47.30 nm/nN. Compared with conventional suspended graphene accelerometers, the sensitivity is improved by 3.76 times, and the Q-factor is enhanced by 2.46 times without increasing the size of the proof mass. These findings lay the foundation for the design and manufacture of low-cost, high-sensitivity, miniaturized nano-electromechanical systems, such as accelerometers, gyroscopes, and displacement sensors.

**Key words:** suspended graphene; mechanical properties; finite element method; high-sensitivity accelerometer; nano-electromechanical systems

## 0 引言

谐振式微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)作为一类直接输出数字量信号的高精度、高灵敏度、高稳定性、高可靠性的传感器,已广泛应用于航天航空<sup>[1-2]</sup>、医疗健康<sup>[3-4]</sup>、导航定位<sup>[5-6]</sup>以及智能控制<sup>[7]</sup>等领域。随着传感器应用环境的改变,谐振式传感器朝着小型化、微型化的趋势发展,并牵引关键部位谐振敏感单元的尺寸从毫米、微米量级过渡至纳米量级。然而,传统 MEMS 传感主要采用金属、石英晶体、单晶硅材料加工谐振敏感单元,当厚度降至纳米量级时,一般采用微刻蚀工艺,制造难度较高。在需要超高灵敏度的特殊场景中,材料易出现晶格缺陷、抗干扰能力弱等问题,导致无法满足应用需求<sup>[8]</sup>。石墨烯、二硫化钼、六方氮化硼等新型二维材料应运而生,为纳机电系统(Nano-Electro-Mechanical Systems, NEMS)提供了新机遇,可将其与机械自由度、电气自由度及纳米尺度相结合。

石墨烯作为全世界首个被发现的二维材料,因其超薄的薄膜厚度和优异的电学、机械性能(与硅半导体生产线兼容性)而成为纳米机电系统领域一种具有巨大应用前景的材料,迅速用于压力<sup>[9-10]</sup>、加速度<sup>[11-12]</sup>、质量<sup>[13-14]</sup>、声学<sup>[15-16]</sup>、光学<sup>[17-18]</sup>等传感领域。与压力、质量传感不同,加速度传感的灵敏度与质量块的大小成正比。目前,最大的挑战是探究如何在保持体积缩小或不变的前提下,提升传感灵敏度。Hurst 等<sup>[19]</sup>提出一种 SU-8/金夹紧石墨烯纳机电加速度计,体积比最先进的 MEMS 加速度计缩小约 3 个数量级。Jie 等<sup>[20]</sup>研究了长方形石墨烯薄膜尺寸和敏感质量块尺寸对共振频率的影响,建立了加速度与石墨烯

谐振器谐振频率的定量关系。Yoon 等<sup>[21]</sup>探索了最佳孔隙及机械共振性能的主要竞争参数(质量损失和碳碳键断裂),实验研究了悬浮式多孔石墨烯谐振器的机械共振特性,但未将模型与传感机制参数相结合分析。近年来,Fan 等<sup>[22]</sup>针对 NEMS 设备需要的超小型谐振器,理论设计并初次通过实验验证了有悬挂质量块的双层四边固支膜(Membrane, MR)结构压阻式加速度计,其具有高制造成品率及长寿命<sup>[22-23]</sup>。随后,探究了双层两边固支(Two-Ribbon, TR)结构、双层两边固支平行双带(Four-Ribbon-Parallel, FRP)结构和双层两边固支交叉双带(Four-Ribbon-Cross, FRC)结构的谐振式加速度计的力学性能<sup>[24-28]</sup>。然而,在器件横向尺寸的缩小已达到极限的情况下,规则形状石墨烯带的尺寸改变需权衡灵敏度与断裂性能。目前,在不增加传感器体积的情况下,通过结构单元的优化实现灵敏度和稳定性的提升,为纳机电加速度计性能提升带来了新思路<sup>[29-31]</sup>。

因此,本文提出了一种用于纳机电加速度传感器的 H 型新型谐振器结构,由石墨烯制成的 H 型弹簧和由 Si/SiO<sub>2</sub> 制成的质量块组成。器件谐振通过电激励/光读出方式实现。在保持敏感质量块尺寸不变且敏感薄膜不断裂的前提下, H 型弹簧中间带与夹紧边的过渡处应力分布集中且均匀,能够引起更大的石墨烯横向拉伸量,实现位移灵敏度的有效提升。建立外力-挠度关系数学模型,采用有限元法计算不同薄膜尺寸、质量块尺寸的谐振器的频率、位移,并探索残余应力、外力变化对谐振器位移的影响,确定了石墨烯谐振单元的最终尺寸。与体积相同的现有悬浮式石墨烯加速度计相比,在保持敏感质量块尺寸不变的前提下, H 型新型谐振器结构的灵敏度可提高 3.76 倍,品质因数可提升 2.46 倍,测量量程为 0~280 g。

## 1 设计与理论

### 1.1 H型石墨烯纳机电加速度计方案

谐振器模型包括由悬浮式石墨烯制成的H型弹簧和由Si/SiO<sub>2</sub>制成的敏感质量块。H型弹簧由1个悬挂质量块的中间悬浮带、2个有固定锚点的悬浮带组成(带的两端固定在基底上),其纵向刚度远大于横向刚度。如图1所示,本文以14 μm氧化硅顶硅层(Device Layer, DL)、2 μm氧化层(Box Layer, BL)和350 μm底硅层(Handle Layer, HL)的SOI(Silicon-on-Insulator)晶圆作为器件主体结构进行单元设计,实现集成电路中元器件的介质隔离。

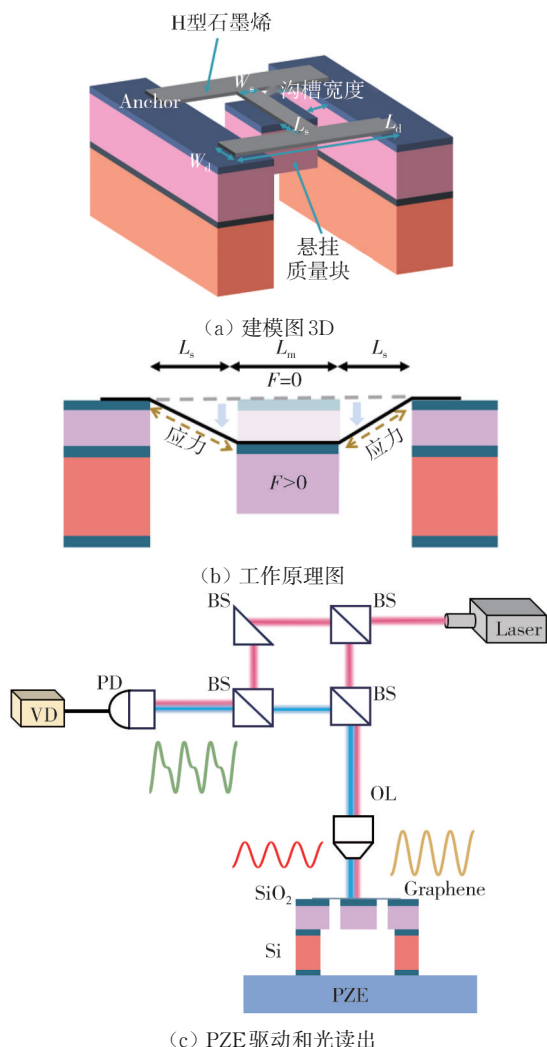


图1 H型谐振式加速度计

Fig. 1 H-shape resonant accelerometers

通过反应离子刻蚀(Reacthe Ion Etching, RIE)和深反应离子刻蚀(Deep Reacthe Ion Etching, DRIE)方法对衬底图案化,形成沟槽并确定

Si/SiO<sub>2</sub>质量块大小。使用干法转移系统将机械剥离的石墨烯转移到SOI衬底上。利用电子束光刻和O<sub>2</sub>等离子体蚀刻技术,在石墨烯薄膜上构建H型结构。悬浮的H型石墨烯既是NEMS传感器的结构单元,也是传感单元。之后采用RIE干蚀刻和蒸汽HF蚀刻有效去除部分BL层,释放Si/SiO<sub>2</sub>质量块,使其悬浮在石墨烯上。SiO<sub>2</sub>衬底表面与石墨烯之间的超强范德华力保证了质量块能够稳定地附着在悬浮石墨烯上。薄膜附着点可能存在应力的不连续性现象,产生剥离力,但不会将薄膜从衬底上分离。为降低谐振阻尼、提高信噪比和可靠性,可对结构进行真空封装。

如图1(b)所示,当无外部加速度时,由质量块重力产生的石墨烯拉伸作用较小,此时石墨烯可视为水平状态。施加外部加速度引起系统的惯性力改变,从而使质量块发生位移变化,带动膜的拉伸,膜内残余应力积聚引起H型石墨烯弹簧-质量系统的共振频率发生变化。

为保证精度,器件谐振通过电激励/光读出方式实现,如图1(c)所示,系统主要包括自建测振部分、振动解码器(Vibrometer Decoder, VD)、压电激振器(Piezoelectric Exciter, PZE)。将被测设备放置在PZE上,PZE可将给定的输入信号转换为z轴上的振动,激发石墨烯谐振器的共振,并引入谐振信号处的加速度。激光器(Laser)发出的偏振光由分光器(Beam Splitter, BS)分成两路,一路作为测量光,另一路作为参考光。激光通过物镜(Objective Lens, OL)聚焦后打到物体表面,反射信号携带被测信息。光信号传入光电探测器(Photo-Detector, PD)转换为可被振动解码器解算的电信号。使用光读出方式可提升测量精度、增大动态范围,借助NEMS石墨烯-质量块结构谐振器可进一步提升灵敏度与分辨率。

### 1.2 H型石墨烯纳机电加速度计谐振理论

当石墨烯薄膜和质量块之间为刚性连接时,没有相对运动。不失一般性地,石墨烯薄膜-质量块系统的外力-挠度特性<sup>[25]</sup>关系可表示如下

$$F = AP = (2L_s W_s + 2L_d W_d)(P_T + P_E + P_N) = \frac{2H}{L_s^2} (L_s W_s + L_d W_d) \cdot \left( \sigma_0 + \frac{EH^2}{(1-\nu^2)L_s^2} + \frac{3EZ^2}{2(1-\nu^2)L_s^2} \right) Z, \quad (1)$$

式中:  $A$  为悬浮石墨烯膜的面积;  $P$  为施加在石墨烯膜-质量块系统上的载荷压力,  $P$  包含三项: 线性  $P_T$  与石墨烯薄膜内部的固有张力成正比(张力项), 加权线性项  $P_E$  与石墨烯的杨氏模量成正比(弯曲刚度项), 第三项  $P_N$  为非线性的;  $L_s$ 、 $W_s$  分别为中间悬浮石墨烯膜的单侧长度、宽度;  $L_d$ 、 $W_d$  分别为夹紧带的长度、宽度;  $\sigma_0$  为残余应力;  $E$  为石墨烯的杨氏模量;  $H$  为石墨烯的厚度;  $\nu$  为石墨烯的泊松比;  $Z$  为悬挂质量块的位移。从式(1)可知, 在确定主体结构时, 石墨烯膜-质量块系统共振频率与石墨烯尺寸、石墨烯固有张力、所施加外力等均有关联。随后使用 COMSOL 进行多物理场耦合与有限元分析, 用于模拟石墨烯-质量块敏感单元。外力  $F$  以体载荷的形式施加于质量块以模拟外部加速度。模型力学参数及材料如表 1 所示。为方便后续研究, 引入参数中间悬浮石墨烯带的单侧长度  $L_s$  及宽度  $W_s$ 、夹紧带的长度  $L_d$  及宽度  $W_d$ 、敏感质量块上表面边长  $L_m$ , 以对影响传感性能的关键参数进行讨论。

表 1 材料的力学参数  
Tab. 1 Material mechanical parameters

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/GPa	泊松比
石墨烯	2 200	1 000	0.18
二氧化硅	2 329	170	0.28
硅	2 200	71	0.17

为验证本文模型的准确性, 建立模型模拟悬浮双层 TR 结构的位移, 其中杨氏模量为 0.22 TPa, 残余应力为 318 MPa, Si/SiO<sub>2</sub> 质量块为 20 μm×20 μm×16.4 μm, 石墨烯带的长度为 4 μm, 宽度为 6 μm, 厚度为 0.667 μm<sup>[22]</sup>。结果表明, 当施加的外力为 1 000 nN 时, 质量块位移为

370 nm, 与文献[22]位移测试结果 374 nm 较为吻合, 表明了模型的有效性。

## 2 分析与讨论

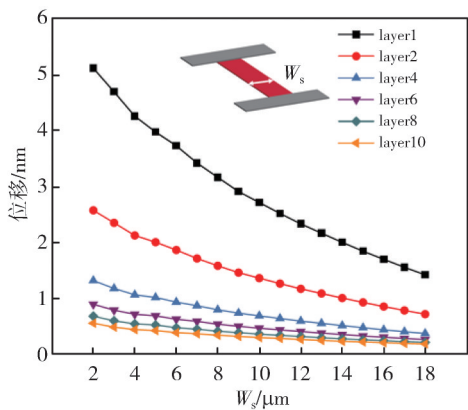
### 2.1 谐振器参数分析

根据目前可加工的结构尺寸设计, 采用 1~10 层石墨烯作为 NEMS 谐振器的敏感膜, 对悬浮石墨烯谐振结构<sup>[26-27]</sup>进行结构及固定方式的优化。其初始参数见表 2。

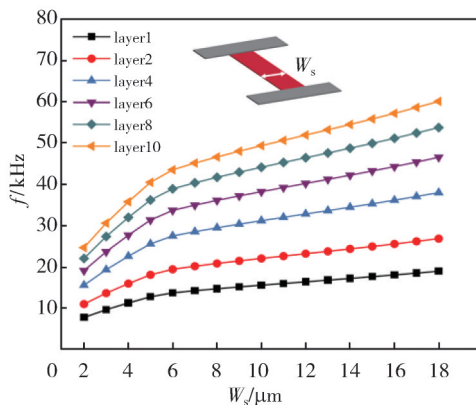
表 2 材料的初始参数  
Tab. 2 Initial parameters of the material

残余应力/MPa	外力/nN	石墨烯/μm				质量块/μm
		$L_s$	$W_s$	$L_d$	$W_d$	
250	0.1	3	6	30	6	20×20×16

首先, 探究中间悬浮石墨烯带的单侧宽度  $W_s$  及长度  $L_s$  对谐振器位移和频率的影响。如图 2(a) 所示, 石墨烯的位移随中间带宽度  $W_s$  的增加而减小。由于相同外力时, 承受力的膜有效面积逐步增大, 引起的膜应力变化逐步减小。如图 2(b) 所示, 当  $W_s$  从 2 μm 增加到 18 μm, 石墨烯-质量块系统的谐振频率随  $W_s$  的增加而提高, 一阶斜率先陡后缓, 多层石墨烯的变化较为显著。其中,  $W_s$  为 6 μm 前后谐振频率的变化量发生转折。根据谐振单元的频率一般由组成材料的特性和设计的尺寸大小来决定<sup>[32-33]</sup>, 可推知转折点由 H 型石墨烯结构中间梁的长宽比引起。图 2(c) 为不同  $L_s$  时单层石墨烯谐振频率随  $W_s$  逐步增加的变化曲线, 随着  $L_s$  的增加, 谐振频率转折点从  $W_s$  为 8 μm 减小到 7、5、3 μm, 最终至无转折点, 即转折点逐步前移。说明在长宽比较小时频率变化较快, 在长宽比较大时频率变化较慢。



(a) 质量块位移随  $W_s$  的变化



(b) 不同层数时系统频数随  $W_s$  的变化

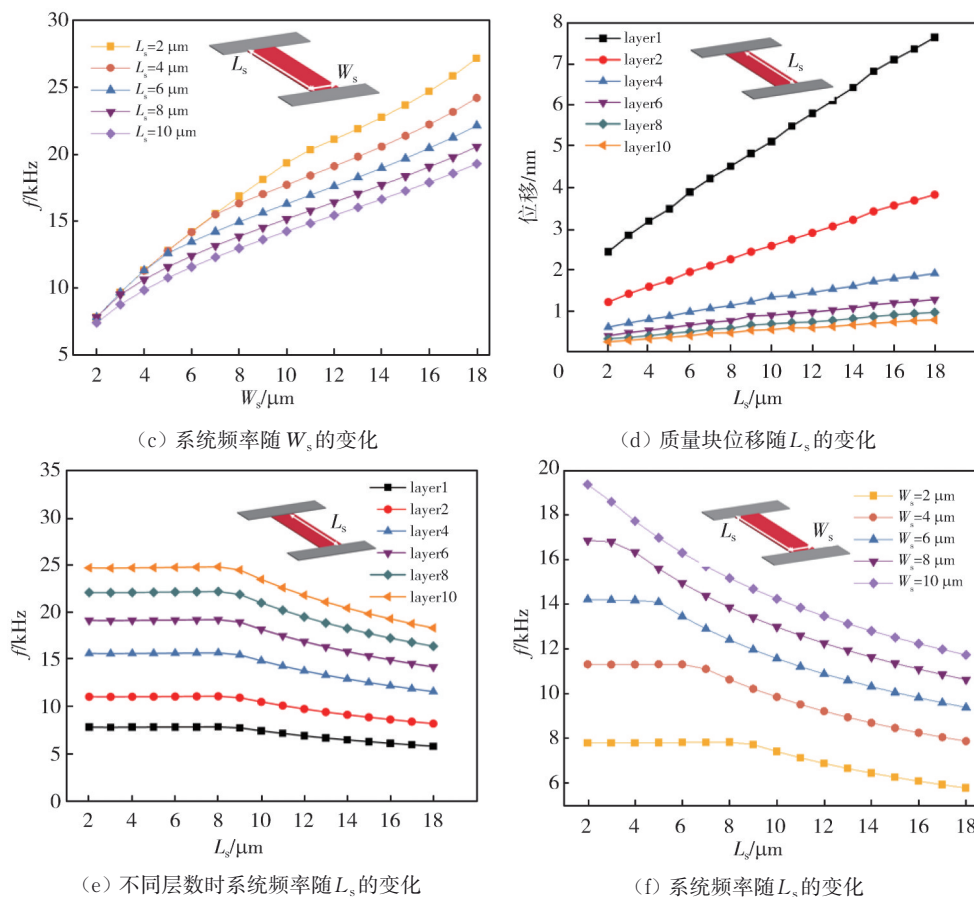


图2 H型石墨烯的中间带尺寸的影响

Fig. 2 The effect of intermediate ribbon size in H-shape graphene

质量块的位移随中间悬浮石墨烯带长度  $L_s$  的增加呈现逐步增加的趋势。相同外力时膜的有效拉伸量逐步增大, 单层石墨烯的变化较为显著, 如图 2(d) 所示。石墨烯-质量块系统的谐振频率随  $L_s$  的增加而降低, 趋势先快后慢, 如图 2(e) 所示。其中,  $L_s$  约为  $8 \mu\text{m}$  时谐振频率的变化量发生转折。图 2(f) 给出不同  $W_s$  时单层石墨烯谐振频率随  $L_s$  逐步增加的变化曲线, 谐振频率转折点从  $L_s$  为  $8 \mu\text{m}$  减小到  $7$ 、 $5$ 、 $3 \mu\text{m}$ , 最终至无转折点。

石墨烯弹簧的夹紧边宽度  $W_d$  及长度  $L_d$  对谐振器位移和频率的影响如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 当石墨烯夹紧边的宽度  $W_d$  从  $2 \mu\text{m}$  增加到  $18 \mu\text{m}$  时, 质量块的位移随  $W_d$  的增加而减小, 多层时的变化趋势较为接近。如图 3(b) 所示, 当石墨烯带的夹紧边长度  $L_d$  从  $2 \mu\text{m}$  增加到  $18 \mu\text{m}$  时, 石墨烯-质量块系统的谐振频率随 H 型石墨烯  $L_d$  的增加而提高, 接近线性趋势。如图 3(c) 和 3(d) 所示, 固定石墨烯带的夹紧边长度  $L_d$  而改变  $W_d$  尺寸, 或固定夹紧边宽度  $W_d$  而改变  $L_d$  尺寸, 石墨烯-质量块系统的谐振频率几乎保持不变。

采用非对称结构, 进一步探讨石墨烯弹簧的宽度  $W_{d1}$  对谐振器位移和频率的影响, 将 H 型石墨烯的一夹紧边固定, 改变另一夹紧边的尺寸。如图 4(a) 所示, 当石墨烯带的宽度  $W_{d1}$  从  $4 \mu\text{m}$  增加到  $12 \mu\text{m}$  时, 单层或双层石墨烯-质量块结构的位移随  $W_{d1}$  的增加而呈现先减小后不变的趋势, 多层石墨烯(4~6层)-质量块结构的位移随  $W_{d1}$  的增加呈现先减小后增加的趋势。同对称结构的规律相同,  $W_{d1}$  的增加不影响系统的谐振频率, 如图 4(b) 所示。此外, 针对夹紧边固定、改变另一侧石墨烯带长度再进行仿真, 石墨烯-质量块结构的谐振频率亦保持不变。

研究单层石墨烯的残余应力对谐振器位移的影响。如图 5(a) 所示, 当外力  $F$  从  $1 \text{ nN}$  增加到  $5 \text{ nN}$  时, 敏感质量块的位移在逐步增加, 残余应力越小, 位移量越大。获得  $1 \text{ pm}$  的质量块的位移和带的挠度, 有效加速度水平应达到  $0.2 \sim 0.3 \text{ g}$  量级。最后, 将中间悬浮石墨烯带的单侧长度  $L_s$  设置为  $3 \mu\text{m}$  及宽度  $W_s$  为  $6 \mu\text{m}$ , 夹紧边的长度  $L_d$  设置为  $30 \mu\text{m}$  及宽度  $W_d$  为  $6 \mu\text{m}$ , 厚度设为  $0.335 \text{ nm}$ 。质量块上表面边长  $L_m$  设置为  $20 \mu\text{m}$ 。控制单变量, 选择 4 个具有

代表性模型进行对比(见表 3)。

表 3 四种模型的参数

Tab. 3 Parameters of four models

单侧长度 $L_s/\mu\text{m}$	单侧宽度 $W_s/\mu\text{m}$	夹紧带长度 $L_d/\mu\text{m}$	夹紧带宽度 $W_d/\mu\text{m}$	质量块边长 $L_m/\mu\text{m}$	薄膜厚度/nm	灵敏度/ $(\text{nm}\cdot\text{nN}^{-1})$
3	10	30	6	20	0.335	26.69
3	5	30	6	20	0.335	34.02
3	6	30	6	15	0.335	34.13
3	6	30	6, 10	20	0.335	27.51

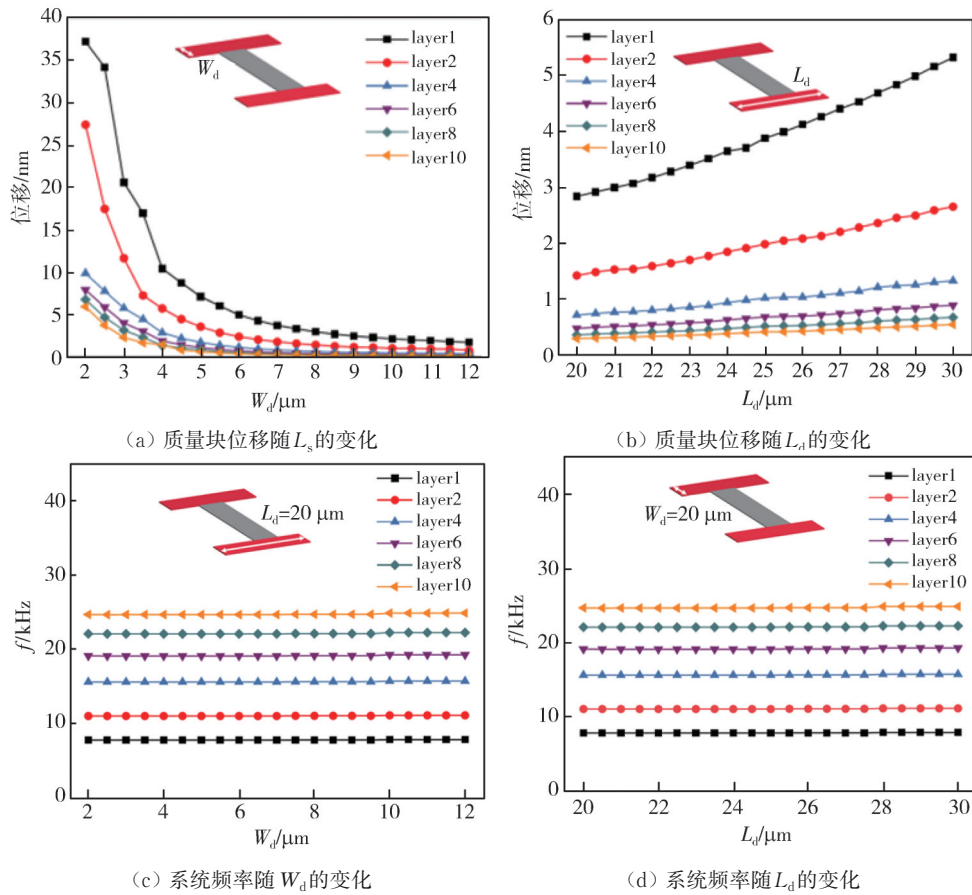


图 3 H型石墨烯的夹紧带尺寸的影响

Fig. 3 The effect of clamping ribbon size in H-shape graphene

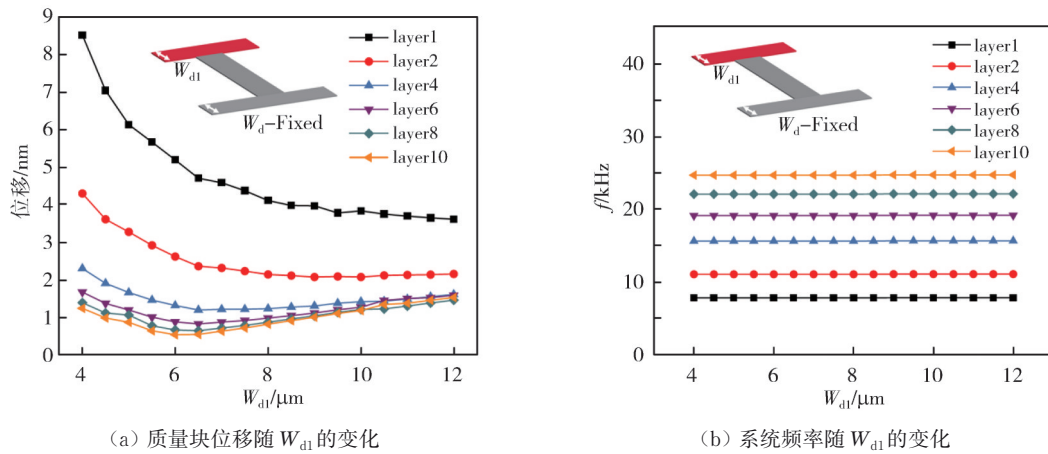


图 4 非对称结构H型石墨烯的  $W_{d1}$  改变的影响

Fig. 4 The effect of one clamping ribbon size in asymmetrically H-shape graphene

如图 5(b) 所示, 在施加外力 0~3.5 nN 时, 对称结构的中间带宽度  $W_s$  为 10  $\mu\text{m}$  与非对称结构的一夹紧边宽度  $W_{d1}$  为 10  $\mu\text{m}$  的位移变化相近。对称结构的中间带宽度  $W_s$  为 5  $\mu\text{m}$  与敏感质量块

上表面边长  $L_m$  为 15  $\mu\text{m}$  的位移变化相近, 较优于另外两种结构。选择对称结构且中间带宽度  $W_s$  为 5  $\mu\text{m}$  的模型进行灵敏度计算和线性度拟合。

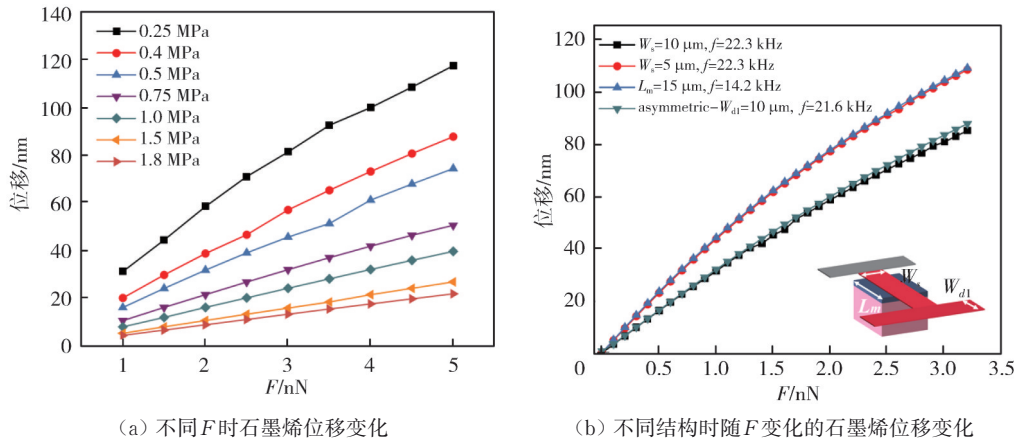


图 5 位移随外力的变化

Fig. 5 Displacement varying with applied force

### 2.2 谐振器传感特性分析

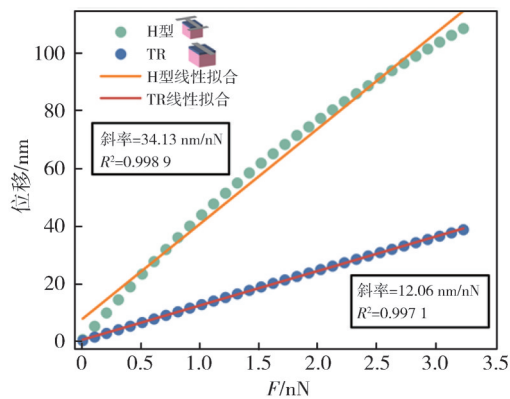
图 6 为不同结构的模型灵敏度。如图 6(a) 所示, 对所设计的单层 H 型石墨烯结构在外力 0~3.5 nN 范围的位移变化进行线性拟合, 位移灵敏度为 34.13 nm/nN。较 TR 结构, 灵敏度提升 2.83 倍。如图 6(b) 所示, 在外力 0~0.325 nN (0~2.6 g) 范围, 将同等体积的 H 型结构与单层

MR 结构、单层 TR 结构、单层 FRC 结构、单层 FRP 结构进行对比, H 型结构的灵敏度最高, 较目前最优 FRP 结构灵敏度提升 3.76 倍。四边固支的 MR 灵敏度最差。针对目前实验研究的各双层结构<sup>[26-27]</sup>, 双层石墨烯在制备过程中更不易塌陷, 故选取双层石墨烯-质量块结构作为所设计模型的最佳配置。如图 6(c) 所示, H 型结构灵敏度为 23.27 nm/nN。对比分析见表 4。

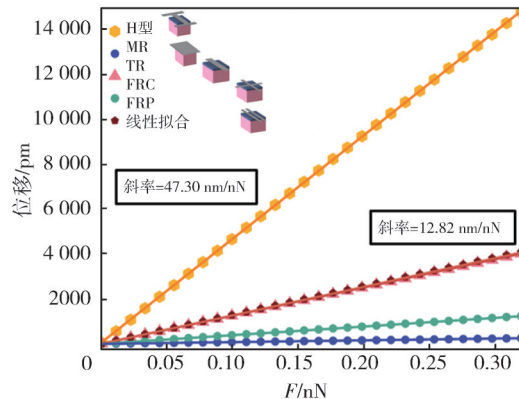
表 4 5 种结构的灵敏度对比

Tab. 4 Sensitivity comparison of five structures

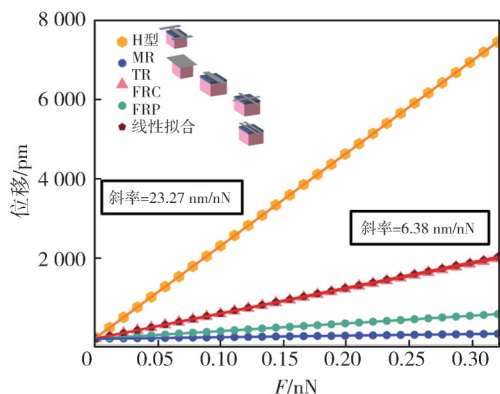
薄膜材料	形状	尺寸参数/ $\mu\text{m}$	单层灵敏度/ $(\text{nm}\cdot\text{nN}^{-1})$	双层灵敏度/ $(\text{nm}\cdot\text{nN}^{-1})$	参考文献
石墨烯	MR	30×38	0.80	0.40	[21]
石墨烯	TR	5×38	12.58	6.21	[22]
石墨烯	FRC	2.5×38/ribbon	3.86	1.92	[27]
石墨烯	FRP	2.5×38/ribbon	12.82	6.38	[27]
石墨烯	H型	3×6, 30×6	47.30	23.27	本文



(a) 单层 H 型与 TR 结构灵敏度对比



(b) 单层 H 型与膜、TR、FRC、FRP 结构灵敏度对比



(c) 双层H型与膜、TR、FRC、FRP结构灵敏度对比

图 6 传感器性能分析

Fig. 6 Sensor performance analysis

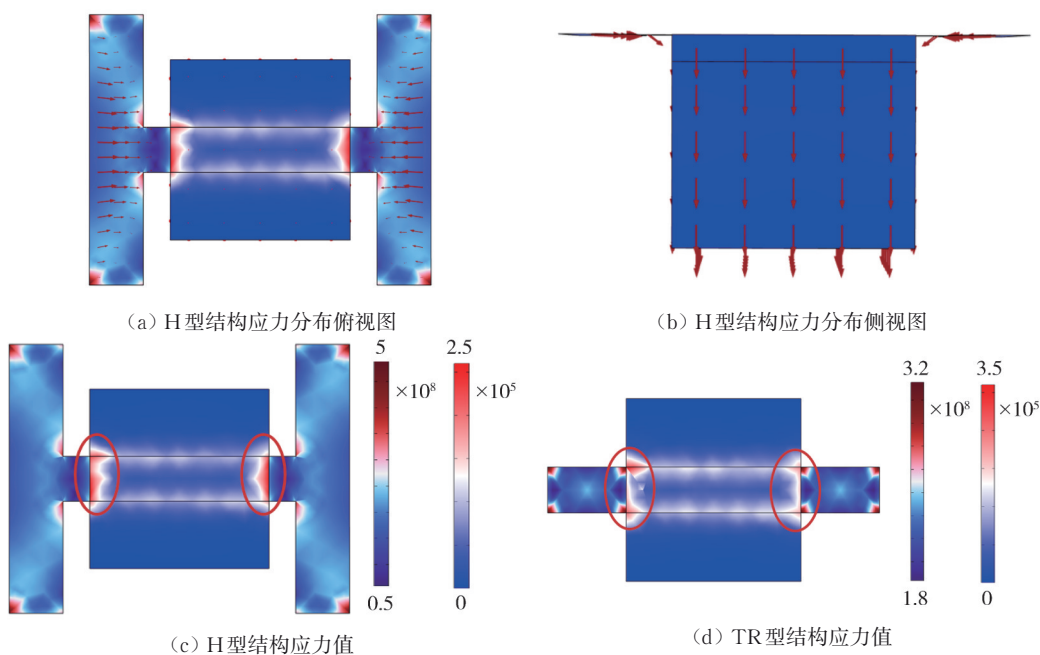
图 6 中起始敏感载荷为 0.69 pN, 仅选取 0~3.5 nN(0~28 g)的外力范围为器件的量程。外部加速度在 28 g 以上时, 器件仍然有明显的响应。根据线性公式(1)计算得到设计的加速度计非线性

度误差为 3.91%, 线性拟合度较好。

$$e_1 = \pm \left( \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $\Delta_{\max}$  为实际特性曲线与拟合直线的最大偏差;  $y_{FS}$  为满量程输出值。

图 7 为应力分布对灵敏度提升的影响机理。针对 H 型结构, 在 0.01 nN 外力作用下, 质量块的位移为 464.78 pm, 引起与质量块的过渡边界处(标圈)的石墨烯膜均匀向下拉伸 464.78 pm, 此刻过渡边界的整个区域能量迅速堆积, 应力分布集中且较为平均, 应力值为  $2.97 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。针对 TR 结构, 质量块的位移为 126.04 pm, 与质量块的过渡边界处(标圈)的石墨烯膜的最大向下拉伸量产生于过渡角, 位移值为 126.04 pm, 应力值为  $2.62 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。所以, H 型结构的石墨烯弹簧-质量块加速度计设计可有效实现高灵敏度。



单位:  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$

图 7 应力图

Fig. 7 Stress diagram

实验中品质因数(Q)的大小与多种阻尼机制有关, 主要来自于内生损耗和额外损耗, 后者是主要损耗<sup>[34]</sup>。对 Q 定量分析,

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_a}, \quad (3)$$

式中:  $Q_i$  为内部材料相关损失造成的损耗;  $Q_c$  为夹持损耗, 取决于振动模式和夹持方式;  $Q_a$  为声子隧穿损耗, 是机械振动能量传递到谐振单元的

外部环境中并且无法返回造成的损耗。针对振动系统能量耗散, 设置损耗因数添加到膜物理场中<sup>[20]</sup>, 通过全局计算得到品质因数, 应力分布更平均的 H 型结构改善了夹持方式, 相比于 TR 结构可提升品质因数 2.46 倍。

### 3 结 语

与电容式或压阻式 MEMS 加速度计相比, 谐

振式石墨烯加速度计因小体积具有更大潜力。如何通过突破规则化结构设计使加速度传感兼具小体积、高灵敏度的优势鲜有报导。因此,本文提出一种由石墨烯制成的H型弹簧和由Si/SiO<sub>2</sub>制成的质量块组成的纳机电加速度计谐振结构。石墨烯膜与敏感质量块过渡边界的整个区域能量迅速堆积,应力分布集中且较为均匀是器件灵敏度提升的原因。针对关键参数,分析了H型石墨烯弹簧性能、残余应力对谐振频率与位移量的影响。设计的单层石墨烯传感器位移灵敏度为47.30 nm/nN,谐振频率范围从几kHz到几十kHz,量程为0~280 g。与现有研究中体积相同的石墨烯加速度计谐振器相比,该结构保持敏感质量块不变,灵敏度提高了3.76倍,品质因数提升了2.46倍。本文研究工作可与大规模半导体制造技术兼容,为二维材料传感研究提供模型基础及科学理论。

#### 参考文献:

- [1] GRÖNLAND T A, RANGSTEN P, NESE M, et al. Miniaturization of components and systems for space using MEMS-technology [J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61(1-6): 228-233.
- [2] LEE J, JO H, KIM S, et al. Lab-on-PCB for space propulsion: integrated membraneless micro-ignitor for MEMS solid propellant thruster [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 363: 114696.
- [3] KAISTI M, PANULA T, LEPPÄNEN J, et al. Clinical assessment of a non-invasive wearable MEMS pressure sensor array for monitoring of arterial pulse waveform, heart rate and detection of atrial fibrillation [J]. *NPJ Digital Medicine*, 2019, 2: 39.
- [4] PASDARI-KIA M, MASIHI A, MOHAMMADI M, et al. Variational-based approach to investigate Fano resonant plasmonic metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16645-16658.
- [5] VALLE J J, SÁNCHEZ-CHIVA J M, FERNÁNDEZ D, et al. Design, fabrication, characterization and reliability study of CMOS-MEMS Lorentz-force magnetometers [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8: 103.
- [6] KAZIOR T E. Beyond CMOS: heterogeneous integration of III-V devices, RF MEMS and other dissimilar materials/devices with Si CMOS to create intelligent microsystems [J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2014, 372(2012): 20130105.
- [7] LIANG J, CAO J, LIU R, et al. Distributed intelligent MEMS [J]. *ACM Computing Surveys*, 2017, 49(1): 1-29.
- [8] 万震, 李成, 刘宇健, 等. 石墨烯谐振式力学量传感器研究进展 [J]. *物理学报*, 2022, 71(12): 95-111. WAN Zhen, LI Cheng, LIU Yujian, et al. Research progress of electromechanical graphene resonant sensors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(12): 95-111. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 代岳, 刘冠军, 邱静, 等. 悬浮石墨烯薄膜的压力敏感特性建模与仿真分析 [J]. *测试技术学报*, 2017, 31(1): 1-7. DAI Yue, LIU Guanjun, QIU Jing, et al. Modeling and simulation analysis on pressure-sensing characteristics of suspended graphene membranes [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2017, 31(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] LI G, LIU F, YANG S, et al. High-sensitivity MEMS force and acceleration sensor based on graphene-induced non-radiative transition [J]. *Carbon*, 2023, 209: 118001.
- [12] LIU Y, LI C, LI J, et al. High-sensitivity fiber optic graphene resonant accelerometer [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(7): 1790-1793.
- [13] AHMAD FAZELZADEH S, GHAVANLOO E. Nanoscale mass sensing based on vibration of single-layered graphene sheet in thermal environments [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(1): 84-91.
- [14] LIU H, LÜ Z. Modeling of novel nanoscale mass sensor made of smart FG magneto-electro-elastic nanofilm integrated with graphene layers [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106749.
- [15] WANG Y, YANG T, LAO J, et al. Ultra-sensitive graphene strain sensor for sound signal acquisition and recognition [J]. *Nano Research*, 2015, 8(5): 1627-1636.
- [16] LU B, LV L, YANG H, et al. High performance broadband acoustic absorption and sound sensing of a bubbled graphene monolith [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(18): 11423-11429.
- [17] 刘文, 田晋平, 杨荣草. 三层石墨烯组成的太赫兹可调宽频带超材料吸收器 [J]. *测试技术学报*, 2022, 36(5): 384-390. LIU Wen, TIAN Jinping, YANG Rongcao. Study on terahertz tunable broadband metamaterial absorber

- composed of three-layer graphene patterns[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2022, 36(5): 384-390. (in Chinese)
- [18] WANG J, WANG X, GAO X, et al. Polarization insensitivity electromagnetically induced reflection in graphene metasurface[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2021, 12(3): 362-368.
- [19] HURST A M, LEE S, CHA W, et al. A graphene accelerometer[C]//2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2015: 865-868.
- [20] JIE W, HU F, WANG X, et al. Acceleration sensing based on graphene resonator[C]//SPIE Proceedings, Second International Conference on Photonics and Optical Engineering, 2017: 102562E.
- [21] YOON J, KWON M H, SHIN D H, et al. Mechanical resonance properties of porous graphene membrane: simulation study and proof of concept experiment[J]. *Current Applied Physics*, 2021, 23: 30-35.
- [22] FAN X, FORSBERG F, SMITH A D, et al. Suspended graphene membranes with attached silicon proof masses as piezoresistive nanoelectromechanical systems accelerometers[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(10): 6788-6799.
- [23] FAN X, FORSBERG F, SMITH A D, et al. Graphene ribbons with suspended masses as transducers in ultra-small nanoelectromechanical accelerometers[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2: 394-404.
- [24] FAN X, NIKLAUS F. NEMS sensors based on suspended graphene[C]//2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2021: 1169-1172.
- [25] MORENO D, FAN X, NIKLAUS F, et al. Proof of concept of a graphene-based resonant accelerometer[C]//2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021: 838-840.
- [26] FAN X, NIKLAUS F. Deformation behavior and mechanical properties of suspended double-layer graphene ribbons induced by large atomic force microscopy indentation forces[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(3): 2100826.
- [27] MORENO-GARCIA D, FAN X, SMITH A D, et al. A resonant graphene NEMS vibrometer[J]. *Small*, 2022, 18(28): 2201816.
- [28] FAN X, MORENO-GARCIA D, DING J, et al. Resonant transducers consisting of graphene ribbons with attached proof masses for NEMS sensors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 7(1): 102-109.
- [29] KUMAR M, BHASKARAN H. Ultrasensitive room-temperature piezoresistive transduction in graphene-based nanoelectromechanical systems[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(4): 2562-2567.
- [30] XIAO Y, HU F, ZHANG Y, et al. A novel two-axis differential resonant accelerometer based on graphene with transmission beams[J]. *Sensors*, 2022, 22(2): 641.
- [31] LIANG G, TEONG H, LAM K T. Computational study of graphene nanoribbon resonant tunneling diodes[C]//2009 13th International Workshop on Computational Electronics, 2009: 1-3.
- [32] 杨巍. 形变碳纳米管的结构及晶格振动特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [33] 房超, 乔顺达, 何应, 等. T字头石英音叉的设计及其气体传感性能[J]. *光学学报*, 2023, 43(18): 142-148.
- FANG Chao, QIAO Shunda, HE Ying, et al. Design and sensing performance of T-shaped quartz tuning forks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 142-148. (in Chinese)
- [34] 李宗阳. 薄膜腔光力系统中激光辐射压诱导四波混频过程的研究[D]. 太原: 山西大学, 2018.