

石墨烯纳机电系统及其与光纤的集成研究

刘增勇, 曹鸿谦, 徐飞*, 陆延青

南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093

摘要 石墨烯具有比表面积大、弹性模量大、刚度大和密度低等特性,是极佳的纳机电系统(NEMS)基础材料。石墨烯纳机电系统主要研究石墨烯薄膜的机电性能,其共振频率对质量、力和热具有非常灵敏的响应,在传感领域具有广泛的应用前景。光纤传感器已得到广泛应用,二者相结合能够发挥更大的优势。本文主要对石墨烯纳机电系统的工作原理、制备工艺、传感应用和基于光纤的石墨烯纳机电系统传感器进行了综述与展望。

关键词 光纤光学; 石墨烯; 纳机电系统; 光纤; 传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110006

Graphene Nanoelectromechanical System and Its Integration with Optical Fiber

Liu Zengyong, Cao Hongqian, Xu Fei*, Lu Yanqing

College of Engineering and Applied Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract Graphene is an excellent base material for a nanoelectromechanical system (NEMS) because of its extraordinary characteristics, including a large specific surface area, high Young's modulus, enormous stiffness, and low density. The graphene NEMS mainly studies the electromechanical properties of graphene films. Its resonant frequency has a very sensitive response to mass, force, and heat, which has a great application prospect in the sensing field. Meanwhile, the optical fiber sensor has been widely studied and applied, whose combination with graphene can possess a greater advantage. In this paper, the working principle, preparation process, sensing application of the graphene NEMS as well as the fiber-based graphene NEMS sensors are reviewed and prospected.

Key words fiber optics; graphene; nano-electromechanical system; optical fiber; sensing

OCIS codes 060.2310; 060.2370

1 引言

随着微加工工艺不断发展,纳机电系统(NEMS)是继微机电系统(MEMS)后产生的一个新概念,主要研究材料在纳米尺度下的机电性能。随着材料尺寸的降低,其性质也发生显著变化。通过振动过程中的共振频率、噪声和品质因子等信息可以研究材料的机电性能和对外界参量的机械响应。

石墨烯于 2004 年首次被发现,其是一种由碳原子构成的蜂窝状二维材料,具有优异的机电性能^[1-3]。石墨烯弹性模量可达 TPa 量级,导电率也接近金属,同时具有非常好的化学稳定性,适用于纳

机电系统。2005 年,首次将微米尺寸的单层石墨烯剥离到绝缘衬底上^[4]。单层厚度的石墨烯,有利于小尺寸器件的集成。

石墨烯纳机电系统可以对外界压力产生非常灵敏的响应,在传感领域有很大的应用潜力。石墨烯纳机电系统也可以研究材料在纳米尺度下的机电行为和能量耗散过程^[5-7],这对未来制备高性能纳米器件具有很高的研究价值。最早的石墨烯纳机电系统通过机械剥离制备,2009 年,Chen 等^[8]首次实现了机械剥离的电激发探测的石墨烯纳机电系统,但该方法制备的石墨烯尺寸小、产量低。随后,通过化学气相沉积(CVD)生长制备的石墨烯薄膜克服了以

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 科技部国家重点研发计划课题(2017YFC1403800)、国家自然科学基金重点项目(61535005)

* E-mail: feixu@nju.edu.cn

上缺点。

光纤具有抗电磁干扰、易操作、耐高温、质量小和体积小等优点,在传感领域已得到广泛应用^[9-11],非常适合与石墨烯纳机电系统进行集成。2014年, Ma等^[12]首次实现了全光纤的石墨烯纳机电系统器件,并测试了气压响应,但是器件的回复性与集成度还有待提高。本文主要介绍石墨烯纳机电系统的工作原理、制备工艺、传感应用及其与光纤的集成。

2 工作原理

2.1 驱动与检测方式

石墨烯纳机电系统最关键的部分为石墨烯薄膜振动的驱动与检测。

驱动方式分为光激发和电激发。如图1(a)所示,光激发通过一束强度周期性变化的激光准直聚焦照射在石墨烯薄膜上,石墨烯周期吸热并收缩或膨胀,从而产生振动;电激发借鉴场效应晶体管的结构,在石墨烯的两边分别制备源电极和漏电极,底部

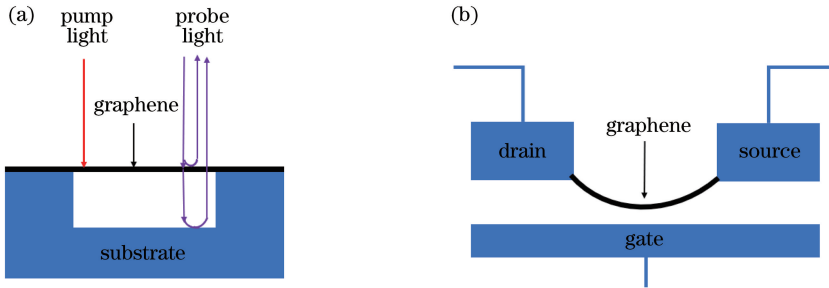


图1 石墨烯纳机电系统示意图。(a)光激发与光检测;(b)电激发与电检测

Fig. 1 Schematic of graphene nanoelectromechanical system. (a) Optical excitation and optical detection; (b) electrical excitation and electrical detection

从图1可以看出,电学激发与探测的优点是结构紧凑,装置相对简单以及引入热效应的干扰小;而光学的优点是抗电磁干扰,另外光探测时通过控制光斑直径,可以检测石墨烯不同位置的振动,获得的信息也更丰富。利用原子力显微镜探针也可以实现空间检测^[17],但是实验装置更复杂,可移动性差,且不利于集成化。

2.2 关键参数

石墨烯的共振频率与其尺寸、厚度和内应力有关,以两端固支梁型石墨烯薄膜为例,其基模共振频率的表达式为^[18]

$$f_0 = \sqrt{(A\sqrt{E/\rho} \cdot t/L^2)^2 + 0.57A^2S/\rho L^2 t}, \quad (1)$$

式中: A 为常数,1.03; E 为石墨烯的弹性模量; ρ 为石墨烯的密度, $7.4 \times 10^{-19} \text{ kg}/\mu\text{m}^2$; t 与 L 分别为石

衬底则为栅电极,加在石墨烯薄膜和栅电极间的电压呈周期性变化,石墨烯因受到周期性的静电力作用而产生振动,如图1(b)所示。

检测方式也可分为光检测和电检测。光检测通过干涉光强变化的幅度进行检测,悬空石墨烯薄膜与衬底形成法布里-珀罗(F-P)腔,信号光经准直聚焦后首先照射到石墨烯薄膜表面,一部分在薄膜表面直接原路反射,另一部分透过石墨烯薄膜照射到底部,经反射后再透过石墨烯原路返回。反射回的两束光由于光程差产生干涉,干涉光强与F-P腔腔长有关。而石墨烯振动幅度等于F-P腔腔长变化幅度,在一个周期内,干涉光强变化幅度正相关于石墨烯振动幅度;电检测原理为石墨烯的电导与内应力有关,石墨烯薄膜振动时,其电导也会改变;此外,还可以利用原子力显微镜探针与石墨烯相互作用检测石墨烯振动。而整个系统的驱动与检测可以全光^[13-14],也可以全电^[8,15],还可以混合使用^[16]。

石墨烯的厚度与长度; S 为石墨烯的内应力(N/m),其可为材料本身残留的应力,也可以是外界环境作用在石墨烯上的应力,比如热应力和电磁力。从(1)式可以看出,石墨烯尺寸越小,应力越高,其共振频率越高(范围为kHz~GHz)。此外,石墨烯纳机电系统共振频率受到环境温度和力学量(压力、质量、振动等)因素的影响,所以,石墨烯纳机电系统是一个很好的传感器平台,一切可以转化为温度和力学量的外部环境变化(如风速、磁场、加速度等)都可能通过石墨烯纳机电系统实现高灵敏度检测。

对于热应力的传感,二者关系式为^[16]

$$\Delta T \approx \{ [4\pi S_0(1-\nu)]/\alpha E \} \cdot \Delta f_0/f_0, \quad (2)$$

式中: ΔT 为温度变化; S_0 为石墨烯初始内应力; ν 为石墨烯的泊松比; α 为石墨烯的热膨胀系数; Δf_0 为基模共振频率变化; f_0 为基模共振频率。石墨烯

的质量非常小,热容也非常低,因此很快即可实现温度的稳定。同时,石墨烯的导热性良好,通过改变石墨烯与衬底接触的面积,可以控制石墨烯对热的响应度。

石墨烯纳机电系统另外一个关键参数为品质因子 Q , 其定义为共振峰频率值 f_0 与半峰全宽 (FWHM) 的比值, 如图 2 所示。品质因子用于衡量器件的能量储存与耗散的水平。高 Q 值峰的直观表现是共振峰比较锐利, 容易分辨。同时, 高 Q 值有利于降低器件工作需要的抽运功率, 也有利于提高器件的传感性能。Barton 等^[19] 研究了四周固定的圆形石墨烯 Q 值与尺寸的关系, 直径为 2~30 μm 的石墨烯直径越小, 则 Q 值越低; 石墨烯的 Q 值会随着温度的降低而显著提高, 100 mK 以下时, 甚至能达到 10^5 ; van der Zande 等^[20] 研究了温度范围从 9 K 到室温 (约 300 K) 时 Q 值的变化, 总体趋势为 Q 值随着温度的降低而升高, 其还研究了 Q^{-1} 与温度 T 的关系: 当温度低于 40 K 时, Q^{-1} 与 $T^{0.35 \pm 0.05}$ 成正比; 当温度高于 40 K 时, Q^{-1} 与 $T^{2.3 \pm 0.1}$ 成正比。另外, 环境气压降低时, 气体阻尼的降低会导致 Q 值增加; 目前, Q 值与石墨烯内应力的关系还没有详细研究, 但已有结果^[13] 表明, 高内应力的石墨烯 Q 值也较高, 可能是应力较高时, 储存在石墨烯中的能量也较高, 石墨烯能量耗散改变, 从而导致更高的 Q 值。

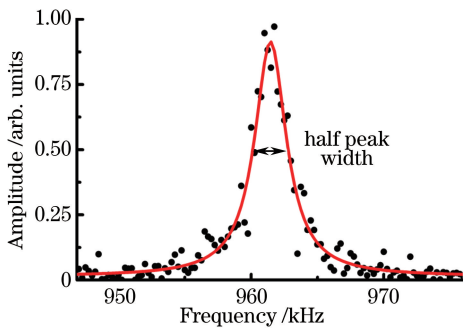


图 2 典型的石墨烯纳机电系统共振峰^[21]

Fig. 2 Resonant peak of typical graphene nanoelectromechanical system^[21]

对于力学量传感, 器件的检测极限可以表示为^[18]

$$D = \sqrt{(4k_B T M_{\text{eff}} \cdot 2\pi f_0) / Q}, \quad (3)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数; T 为温度; M_{eff} 为石墨烯的有效质量。环境温度越低, 石墨烯有效质量越小, 共振频率越低, 当品质因子越高时, 器件的检测极限越好。然而, 由上述结果可知, 石墨烯尺寸降低时,

有效质量降低, 但共振频率增加, 品质因子降低。故实际应用时, 为了优化器件的传感性能, 应综合考虑各种因素。

3 制备工艺

石墨烯纳机电系统的制备工艺较多, 没有统一的标准, 这主要与石墨烯薄膜的获得方法有关。目前, 常用的获得方法有机械剥离、CVD 生长和外延生长等。

机械剥离方法利用胶带从体块石墨上反复剥离, 从而得到少层甚至单层的石墨烯。其优点是取材方便、成本低廉, 但是缺点也很明显, 即整个过程难以定量控制, 产量低, 另外, 石墨烯易受到环境污染, 从而影响实验结果。可以将获得的石墨烯薄膜转移到衬底上 (一般为二氧化硅) 进行测试, 也可以再利用微加工技术 (如电子束曝光、湿法刻蚀等) 修饰结构或者在石墨烯薄膜上制备电极用于进一步的研究。Bunch 等^[18] 利用机械剥离制备两端固支梁型石墨烯纳机电系统, 厚度为 1~75 原子层, 长度为 0.5~10 μm , 并用电驱动检测的方法进行了相应测试。Chen 等^[8] 在机械剥离石墨烯时, 利用微加工方法制备电极, 研究了器件共振频率随栅极电压的变化以及对吸附质量的响应。Bunch 等^[22] 将机械剥离的石墨烯薄膜转移到带有洞的二氧化硅衬底上, 并将器件置于真空腔, 由于存在内外压差, 石墨烯膜鼓起来 (未破裂)。经过超过 24 h 的驰豫, 石墨烯薄膜才恢复平整, 证明石墨烯与二氧化硅衬底具有很强的作用力, 同时气体腔对腔内气体具有很强的束缚作用。

通常采用 CVD 生长法或者外延生长法制备较大面积的石墨烯薄膜纳机电系统。以 CVD 法在铜箔表面生长的石墨烯为例, 在石墨烯表面旋涂一定厚度的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)^[23] 或者聚二甲基硅氧烷 (PDMS)^[24] 作为支撑物; 利用化学溶液将铜箔腐蚀掉, 清洗掉离子杂质; 然后, 将石墨烯转移到相应衬底上, 去除支撑物; 进行测试, 或者利用微加工方法修饰结构与制备电极。该方法操作简单规范, 产量高, 缺点是成本较高和会引入环境污染。与机械剥离相比, 由于工艺不同, 该方法生产的石墨烯内应力不同, 进而影响器件的机电性能。此外, Robinson 等^[13] 利用氧化石墨烯片晶, 通过液相薄膜沉积技术获得的石墨烯薄膜也具有较好的机电性能。

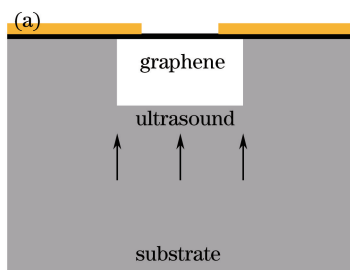
4 传感应用

目前, 石墨烯纳机电系统研究的热点主要集中在

对纳机电系统能量耗散、模式耦合和量子领域的研究^[25-27]以及传感领域的应用。前者所需实验条件较高(比如低温实验环境、高检测极限的实验仪器等)和扎实的数学、物理背景,所得成果对未来开发高性能、低功耗的纳米器件具有指导意义;而后者对实验条件要求较低,直接应用前景也相对明朗,相比于其他传感器件,基于纳机电系统的传感器检测极限更低,空间分辨率也极佳。目前报道的传感应用还是以力和热为主,其中力学传感包括静态质量和动态振动等。

4.1 质量传感

由于石墨烯的质量极低,当极微小质量的物体附着在表薄膜面时,石墨烯就会产生非常灵敏的响应。Chen等^[8]在真空腔里蒸发一定质量的并五苯,并记录了蒸发前后石墨烯共振频率的变化:在低栅压下,共振频率增加;高栅压下反而降低,甚至出现某个栅压值时共振频率不变。这是因为栅压静电力和质量吸附引起的石墨烯内应力变化,该器件在较大栅压下,质量检测极限达到 $10^{-21} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。Chang等^[28]利用非局部弹性理论,研究了附着质量



对圆形双层石墨烯共振频率的影响,随着附着质量的增加,共振频率和响应灵敏度降低,相同质量的物质离石墨烯薄膜中心越远,共振频率越高,同时物质附着在中心时灵敏度达到最大值。

4.2 振动传感

石墨烯纳机电系统需要在真空中工作,其很难进行以空气为媒介的力传感,比如声波传感。但是Verbiest等^[29]利用石墨烯薄膜的衬底将超声作用力传递到石墨烯上,如图3(a)所示,其实现了对超声振动幅度的传感。整个器件利用电驱动和电检测方法,石墨烯的长宽分别为 $2.2 \mu\text{m}$ 和 $1.6 \mu\text{m}$,可以达到 7 pm 的分辨率,且超声频率不低于 100 MHz 。Jiang等^[30]利用有限元仿真实验,研究了垂直作用在石墨烯薄膜上的压力对石墨烯共振频率的影响,当压力 $<100 \text{ kPa}$ 时,共振频率随压力线性变化,单层石墨烯纳机电系统的压力灵敏度可达 26838 Hz/kPa ,比传统共振型压力传感器的灵敏度高两个数量级。此外,还可以通过优化石墨烯薄膜结构和降低内应力提高其灵敏度。

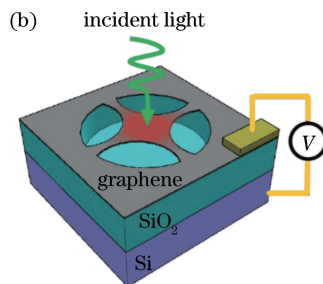


图3 石墨烯纳机电系统的应用示意图。(a)石墨烯纳机电系统声波探测^[29]; (b)石墨烯纳机电系统热辐射探测^[16]

Fig. 3 Application diagram of graphene nanoelectromechanical system. (a) Acoustic detection of graphene nanoelectromechanical system^[29]; (b) thermal radiation detection of graphene nanoelectromechanical system^[16]

4.3 热传感

Singh等^[31]研究了单层石墨烯共振频率与温度的关系,发现在 $30\sim 300 \text{ K}$ 温度下,石墨烯的热膨胀系数为负值,随着温度升高,共振频率降低,且温度越高,频率变化越大。Blaikie等^[16]利用石墨烯薄膜共振频率对温度的敏感特性,制备了快速响应和高灵敏的辐射热计。入射光照射到石墨烯表面产生热量,石墨烯吸热收缩导致内应力改变,进而改变共振频率,实现了对辐射的传感。如图3(b)所示,为了提高石墨烯将入射光功率变化转化为温度变化的效率,并缩短温度稳定的时间,利用聚焦离子束刻蚀将悬空圆形石墨烯薄膜制备成蹦床型结构,有效增加了石墨烯的热阻。整个器件利用电驱动和光检测方法,基模共振频率达到 10.7 MHz , Q 值为 910 ,被测

波长为 532 nm ,灵敏度为 $52.5 \text{ kHz}/\mu\text{W}$,在室温下实现了 $7 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的等效噪声功率,灵敏度比基于电学效应的石墨烯辐射热计高 100 倍,响应速度也远高于最先进的微辐射热计。

5 基于光纤的石墨烯纳米机电系统器件

利用光学手段驱动,检测石墨烯纳机电系统时,由于选用空间光,所以实验器材多,调试复杂操作困难,这无疑增加了实验难度。而光纤基于全反射原理,具有优异的导光性能,同时具有可远程操作、可复用、抗电磁干扰、尺寸小、质量轻、耐高温和柔韧性好等优点^[32-34],可以替代空间光,完成石墨烯纳机电系统的构建。

在光纤上制备石墨烯纳机电系统时,工艺和在硅基衬底上制备时类似,都是采用 CVD 生长在铜箔上的石墨烯。如图 4 所示^[12],剪出一小片长有石墨烯的铜箔;在石墨烯薄膜表面旋涂一定厚度的 PMMA;将复合薄膜置于三氯化铁溶液表面,待到三氯化铁腐蚀完铜箔后,石墨烯由于表面张力会漂浮在溶液表面,将薄膜转移到去离子水中

清洗数次,以去除铜离子与铁离子等杂质;将复合膜转移到光纤端面或者相应衬底上,利用丙酮去除 PMMA,当石墨烯层数大于 2 时,由于其优异的力学性能,可以不需要利用 PMMA 作为转移过程的支撑膜,直接利用湿法转移,将石墨烯薄膜转移到相应衬底上。该方法操作简单,不会受到 PMMA 和丙酮的污染。

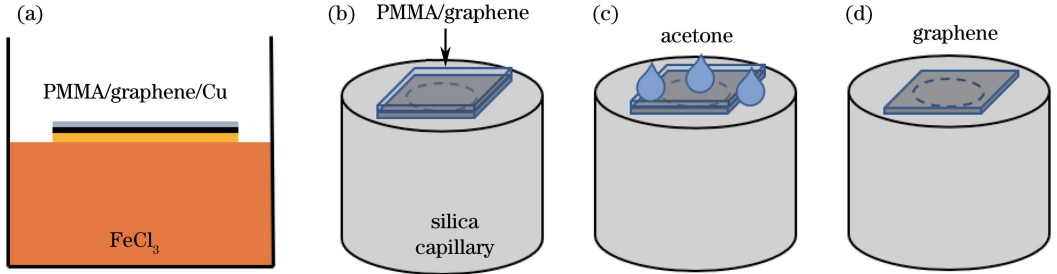


图 4 光纤上制备石墨烯纳机电系统流程图。(a)漂浮在 FeCl₃ 溶液表面的 PMMA/graphene/Cu^[12];

(b)转移到毛细玻璃管端面的 PMMA/graphene;(c)用于除去 PMMA 聚合物的丙酮;(d)仅存有石墨烯薄膜的毛细玻璃管端面
Fig. 4 Flow chart for fabrication of graphene nanoelectromechanical system on fiber. (a) PMMA/graphene/Cu suspended on FeCl₃ solution surface^[12]; (b)PMMA/graphene film transferred to silica capillary end face; (c) acetone used to dissolve PMMA polymers; (d) silica capillary end face covered with graphene film only

Ma 等^[12]首次制备了全光纤的石墨烯纳机电系统。如图 5 所示,通过湿法转移方法将 CVD 生长的石墨烯薄膜转移到内径为 125 μm 的陶瓷玻璃套管端面上,然后将端面切平的单模光纤从陶瓷套管另一头插入,使得光纤端面和石墨烯形成 F-P 腔,再利用环氧树脂胶将单模光纤与陶瓷套管固定,增强器件的稳定性。利用飞秒激光器修饰悬空石墨烯的形状,形成两端固支梁型的结构。将样品置于真空腔进行测试。测试系统利用抽运-信号双光路进行,光源 1 作为抽运光,通过隔离器、强度调制器和掺铒光纤放大器(EDFA)到达耦合器;光源 2 作为信号光,通过隔离器到达同一个耦合器。两束光会合后,经过环路器到达光纤端面和石墨烯表面,再经过反射返回环路器,通

过环路器的另一个通道,为避免干扰需经过滤波器过滤抽运光。最后信号光到达光电探测器,光信号转化为电信号,将石墨烯振动信息显示在网络分析仪上。在 0.01 Pa 的气压下,厚度为 15 nm 的石墨烯薄膜的基模共振频率为 135 kHz, Q 值为 81。气压响应测试结果表明,随着气压的升高,共振频率和 Q 值都降低,可以达到 3.8 fN/√Hz 的力检测极限。值得注意的是,该研究对气压响应的结果不具有回复性,可能是石墨烯薄膜与衬底的接触不牢固造成的,该石墨烯薄膜是转移到陶瓷套管上后再套上单模光纤,并不是严格意义的全光纤石墨烯纳机电系统。如果能解决传感回复性,并直接在光纤端面制备石墨烯纳机电系统,器件的实用性会更强,集成性会更好。

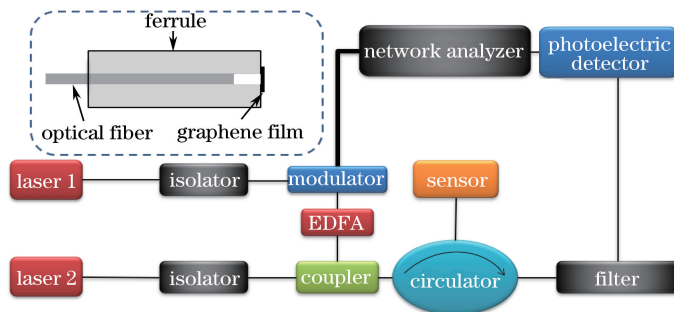


图 5 全光纤系统激发与测试石墨烯纳机电系统^[12](陶瓷套管中光纤端面与石墨烯形成的 F-P 腔)

Fig. 5 All-fiber system for excitation and testing of graphene nanoelectromechanical systems^[12] (inset: F-P cavity formed by fiber end face and graphene in ceramic sleeve)

Tan 等^[35]将石墨烯-光纤端面陶瓷套管结构制成的 F-P 腔用作光学检测部分,将器件置于待乙炔气室,利用声波抽运石墨烯振动,通过信号处理,实现通过振动幅度值对乙炔气体浓度的传感。厚度为 100 nm,直径为 2.5 mm 的石墨烯薄膜检测极限达到 1.198×10^{-7} ,归一化噪声等效吸收系数为 $9.782 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ 。由于空气阻尼,石墨烯纳机电系统必须在真空中工作,而该研究利用石墨烯薄膜在气体环境中受声波受迫振动,气体含量不同,气体阻尼不同,导致石墨烯振动幅度改变,进而实现对气体浓度传感,为石墨烯纳机电系统的非真空环境传感应用提供了新思路。Liu 等^[36]通过切平端面的光纤熔接玻璃管再

转移石墨烯薄膜形成 F-P 腔,在光纤侧面制备金电极,利用电流产生的热效应改变石墨烯的内应力,实现了对微小电流的传感,如图 6(a)和图 6(b)所示,图中 I 为电流,灵敏度达到 $262.5 \text{ kHz}/\text{mA}^2$ 。该器件结构实现了石墨烯薄膜和光纤的直接集成,结构紧凑,有利于集成化。Liu 等^[21]在光纤端面悬空石墨烯薄膜上覆盖超顺磁纳米颗粒,将磁场作用于磁性纳米颗粒,改变石墨烯的内应力,实现了对磁场的传感,如图 6(c)和图 6(d)所示。该研究将石墨烯与其他类型的材料相结合,增强了石墨烯对磁场的响应度。由于磁性颗粒在有梯度的磁场中才会受力作用,因此,该器件具有探测磁场梯度的潜力。

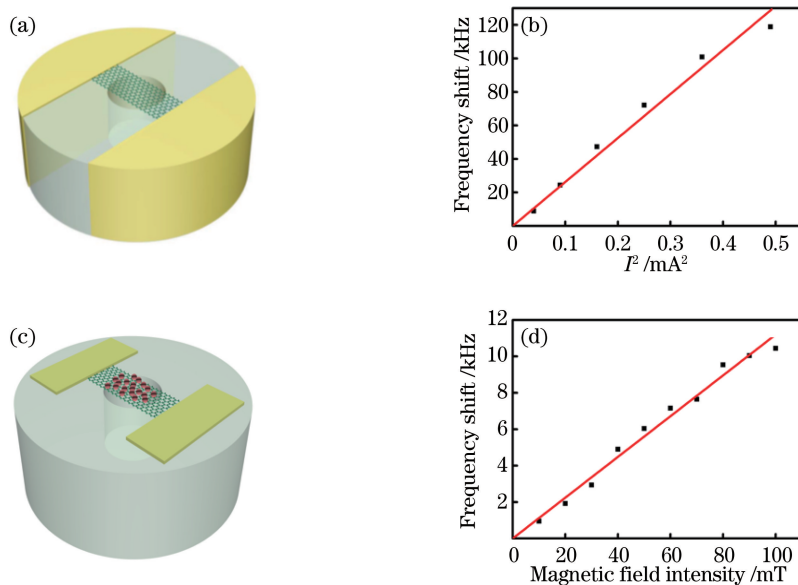


图 6 全光纤石墨烯纳机电系统的应用示意图。(a)基于全光纤石墨烯纳机电系统的电流传感器^[36];

(b)共振频率随 I^2 的变化;(c)基于全光纤石墨烯纳机电系统的磁场传感器^[21];(d)共振频率随磁场强度的变化

Fig. 6 Application diagram of all-fiber graphene nanoelectromechanical system. (a) Current sensor based on all-fiber graphene nanoelectromechanical system^[36]; (b) resonant frequency versus I^2 ; (c) magnetic field sensor based on all-fiber graphene nanoelectromechanical system^[21]; (d) resonant frequency versus magnetic field intensity

6 结束语

石墨烯纳机电系统对质量、力和热等具有非常灵敏的响应,由于其需要在真空环境中工作,因此,实际应用中还存在一定的挑战。利用石墨烯纳机电系统探测非接触力具有独到优势,如电场力和磁场力,或者将外界参量变化通过一定的媒介传递到石墨烯薄膜;同时,研究纳米尺度石墨烯的机电性能可以为未来制备高性能纳米器件打下坚实基础。

在传感领域全光纤优点非常显著,制备全光纤的石墨烯纳机电系统器件,无论从操作还是应用都

具有非常好的前景。目前,相对于平面衬底上的制备工艺,光纤上的制备工艺还不够成熟,器件的稳定性与成品率还有待提高。而在应用方面,由于器件需要在真空环境下工作,如果将光纤头的器件封装在小型的真空密闭管中,提高器件的便携性,甚至能实现在日常环境中的使用。因此随着相关研究的推进,其应用范围会越来越广泛。

参 考 文 献

- [1] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, *et al.* Graphene photonics and optoelectronics [J]. Nature Photonics,

- 2010, 4(9): 611-622.
- [2] Geim A K. Graphene: status and prospects [J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [3] Frank I W, Tanenbaum D M, van der Zande A M, *et al.* Mechanical properties of suspended graphene sheets[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2007, 25(6): 2558-2561.
- [4] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 197-200.
- [5] Singh V, Shevchuk O, Blanter Y M, *et al.* Negative nonlinear damping of a multilayer graphene mechanical resonator[J]. *Physical Review B*, 2016, 93(24): 245407.
- [6] Chen C Y, Deshpande V V, Koshino M, *et al.* Modulation of mechanical resonance by chemical potential oscillation in graphene[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(3): 240-244.
- [7] Ghahari F, Walkup D, Gutiérrez C, *et al.* An on/off Berry phase switch in circular graphene resonators [J]. *Science*, 2017, 356(6340): 845-849.
- [8] Chen C Y, 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] Denisov A, Soto M A, Thévenaz L. Going beyond 1000000 resolved points in a Brillouin distributed fiber sensor: theoretical analysis and experimental demonstration[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(5): e16074.
- [10] Barrias A, Casas J, Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 748.
- [11] Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y, *et al.* Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 99.
- [12] Ma J, Jin W, Xuan H F, *et al.* Fiber-optic ferrule-top nanomechanical resonator with multilayer graphene film [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4769-4772.
- [13] Robinson J T, Zalalutdinov M, Baldwin J W, *et al.* Wafer-scale reduced graphene oxide films for nanomechanical devices [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(10): 3441-3445.
- [14] Shivaraman S, Barton R A, Yu X, *et al.* Free-standing epitaxial graphene[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(9): 3100-3105.
- [15] Song X F, Oksanen M, Sillanpää M A, *et al.* Stamp transferred suspended graphene mechanical resonators for radio frequency electrical readout [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(1): 198-202.
- [16] Blaikie A, Miller D, Alemán B J. A fast, sensitive, room-temperature graphene nanomechanical bolometer [EB/OL]. (2018-10-31) [2018-12-25]. <https://arxiv.org/abs/1810.13422>.
- [17] Garcia-Sanchez D, van der Zande A M, Paulo A S, *et al.* Imaging mechanical vibrations in suspended graphene sheets [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(5): 1399-1403.
- [18] Bunch J S, van der Zande A M, Verbridge S S, *et al.* Electromechanical resonators from graphene sheets[J]. *Science*, 2007, 315(5811): 490-493.
- [19] Barton R A, Ilic B, van der Zande A M, *et al.* High, size-dependent quality factor in an array of graphene mechanical resonators [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(3): 1232-1236.
- [20] van der Zande A M, Barton R A, Alden J S, *et al.* Large-scale arrays of single-layer graphene resonators [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(12): 4869-4873.
- [21] Liu Z Y, Yan S C, Lu Z D, *et al.* A fiber-optic magnetometer based on graphene NEMS using superparamagnetic nanoparticles [C] // CLEO Pacific Rim Conference, July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. Washington D. C.: OSA, 2018: W3A.76.
- [22] Bunch J S, Verbridge S S, Alden J S, *et al.* Impermeable atomic membranes from graphene sheets[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(8): 2458-2462.
- [23] Li X, Cai W, An J, *et al.* Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils[J]. *Science*, 2009, 324(5932): 1312-1314.
- [24] Kim K S, Zhao Y, Jang H, *et al.* Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes [J]. *Nature*, 2009, 457(7230): 706-710.
- [25] Reserbat-Plantey A, Schädler K G, Gaudreau L, *et al.* Electromechanical control of nitrogen-vacancy defect emission using graphene NEMS [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10218.
- [26] Luo G, Zhang Z Z, Deng G W, *et al.* Strong indirect coupling between graphene-based mechanical resonators via a phonon cavity [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 383.
- [27] Christopoulos T, Tsilipakos O, Grivas N, *et al.*

- Modeling nonlinear resonators comprising graphene: a coupled mode theory approach[C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California United States. Washington D. C. : OSA, 2017: FTu3H.3.
- [28] Chang W J, Lee H L. Mass detection using a double-layer circular graphene-based nanomechanical resonator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(3): 034303.
- [29] Verbiest G J, Kirchhof J N, Sonntag J, *et al.* Detecting ultrasound vibrations with graphene resonators[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 5132-5137.
- [30] Jiang S W, Gong X H, Guo X, *et al.* Potential application of graphene nanomechanical resonator as pressure sensor [J]. *Solid State Communications*, 2014, 193: 30-33.
- [31] Singh V, Sengupta S, Solanki H S, *et al.* Probing thermal expansion of graphene and modal dispersion at low-temperature using graphene nanoelectromechanical systems resonators [J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(16): 165204.
- [32] Wang W H, Xiong Z Y, Shi W Q, *et al.* Fiber-optic surface plasmon resonance sensing technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090008.
王文华, 熊正焯, 师文庆, 等. 光纤表面等离子体共振传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090008.
- [33] Li C, Lu X Q, Yu C B, *et al.* Fiber-optic acoustic sensor based on multi-layered graphene material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328017.
李晨, 陆雪琪, 庾财斌, 等. 基于多层石墨烯材料的光纤声波传感器 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328017.
- [34] Wu Y H, Zhu S, Xu W, *et al.* Progress in distributed optical fiber crack sensing engineering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090002.
吴永红, 朱莎, 许蔚, 等. 分布式光纤裂缝传感工程应用研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 090002.
- [35] Tan Y Z, Zhang C Z, Jin W, *et al.* Optical fiber photoacoustic gas sensor with graphene nanomechanical resonator as the acoustic detector [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 199-209.
- [36] Liu Z Y, Xu F. Miniature sensor based on fiber-graphene-integrated NEMS [C] // 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE, 2017: 17466235.