

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.06.07

一种基于光纤 F-P 腔的石墨烯谐振式压力传感器

李子昂^{1,2}, 樊尚春^{1,2}, 李成^{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. 工业和信息化部量子传感技术重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 谐振式传感器具有良好的重复性、分辨率和稳定性, 全光纤谐振式微型传感器则集合了微纳结构与光纤传感特性两者的优点。石墨烯作为近年来发现的一种新型材料, 具有良好的热学和力学特性, 可以作为谐振式传感器中的敏感元件。本文提出了一种基于光纤 F-P 结构的石墨烯谐振式压力传感器, 其兼具微机械传感器和光纤谐振器的优点, 具有较高的谐振频率, 在测量压力的实验中展现出良好的性能, 压力灵敏度最高可达 2.93 Hz/Pa, 具有重要的应用价值。

关键词: 谐振式压力传感器; 石墨烯; F-P 干涉; 压力灵敏度

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)06-0036-04

A Graphene Resonant Pressure Sensor with an Optical Fiber F-P Cavity

LI Ziang^{1,2}, FAN Shangchun^{1,2}, LI Cheng^{1,2}

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

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

Abstract: Resonant sensor has good repeatability, resolution and stability. All-fiber resonant micro sensor has the advantages of micro-nano structure and optical fiber sensing characteristics. Graphene, as a new material discovered in recent years, has good thermodynamic and mechanical properties and can be used as a sensitive element in resonant sensors. A graphene resonant pressure sensor based on optical fiber F-P structure is presented in this paper. It has the advantages of both micro-mechanical sensor and optical fiber resonator. It has high resonant frequency. It shows good performance in pressure measurement experiment. The maximum pressure sensitivity can reach 2.93 Hz/Pa. It has important application value.

Key words: resonant pressure sensor; graphene; F-P interference; pressure sensitivity

0 引言

微机械传感器具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化等特点, 可以微米量级的特征尺寸实现某些传统机械传感器所不能实现的功能^[1]。谐振传感器具有良好的性能指标, 可用来测量多种参数, 如压力, 加速度, 密度等^[2]。微机械谐振式传感器则兼具微机械传感器和谐振式传感器的特点, 通常具有良好的重复性、分辨率和稳定性, 相较传统的模拟信号输出的传感器, 微机械谐振式传感器以频率数字周期信号作为输出, 方便与数字测控系统连接。

全光纤谐振传感技术出现于 20 世纪 80 年代中叶, 是当时一种全新的传感技术。它集光纤、谐振传感技术和硅微结构三项优点于一身, 在航空航天和医学等领域具有特殊的研究价值。全光纤谐振传感技术研究

有三大关键问题, 分别是光激励、拾振技术以及硅微细加工工艺。

微机械谐振器中常用的激励方式包括静电激励、压电激励、电磁激励、电热激励、光热激励等; 常用的拾振方式包括压敏电阻法、电容法、光学检测法。其中, 光热激励和检测的方式具有减小机械能量损失和抗电磁干扰的优点, 而且具有很高的灵敏度和信噪比^[3]。光热激励的原理是光热效应, 被周期调制后的激光照射到谐振子表面后, 使谐振子产生周期性的应变, 引起谐振子的机械振动^[4]。光学检测法分为光强调制检测法和光干涉调制检测法, 采用光干涉调制检测法拾取谐振频率具有更高的精度和灵敏度。因此本文分别采用激光激励和检测的方式实现谐振器的激励和拾振, 以满足高灵敏度压力测量需求。

石墨烯自 2004 年首次被发现以来, 引起了国内外学者的广泛关注^[5]。它是目前已知最薄的材料, 单层

石墨烯厚度仅为 0.335 nm。石墨烯具有优良性能,在力学性能方面,它是目前已知的强度最高的材料,弹性模量高达 $1.0 \text{ TPa}^{[6]}$; 石墨烯还具有良好的热学性质,单层石墨烯在接近室温条件下热导率在 $2000 \sim 5000 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 范围内^[7],在 300 K 温度下的热膨胀系数为 $-7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1[8]}$ 。石墨烯的优良性质使其在航空航天、电子信息、生物制药和光学储能等领域得到了广泛的应用。

1 实验平台的搭建

1.1 谐振探头的制作

使用石英毛细管结构作为石墨烯的基底,毛细管的外径为 $125 \mu\text{m}$,内径为 $50 \mu\text{m}$,如图 1 所示。

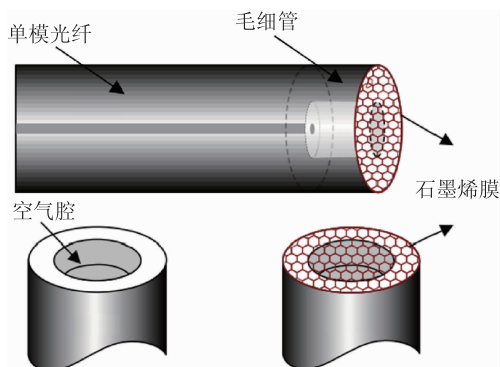


图 1 单模光纤-石英毛细管结构示意图

首先使用光纤切割刀分别将石英毛细管和单模光纤的端面切平,切割角度控制在 0.5° 以内;利用光纤熔接机将石英毛细管与单模光纤熔接,熔接步骤如图 2 所示,适当调整熔接参数,确保熔接后的光纤端面平整、反射率不受影响;在显微镜下控制光纤切割刀,在与熔接点相距 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 处切割石英毛细管,切割得到的空腔长度即为 F-P 干涉腔的初始腔长。

对石英毛细管进行研磨抛光处理,保证石英毛细管端面的平整度;然后,向石英毛细管端面转移石墨烯薄膜(南京吉仓纳米 CVD 石墨烯薄膜,10 层)。转移方法如下:首先,向石墨烯样品基底四周缓缓滴入去离子水,待到样品基底完全浸润后,转移至去离子水中,静置 1 h;之后将石墨烯样品剪成适当大小的方形,放入丙酮溶液中静置 5 min,等待 PMMA 完全去除干净;用镊子夹取石英毛细管探头在丙酮溶液中捞取方形小片状的石墨烯样品,然后放入温箱中 50°C 下干燥 1 h。转移成功后的石墨烯谐振探头示意图如图 1 所示,图 3 为 SEM 下石墨烯谐振探头的实物图。

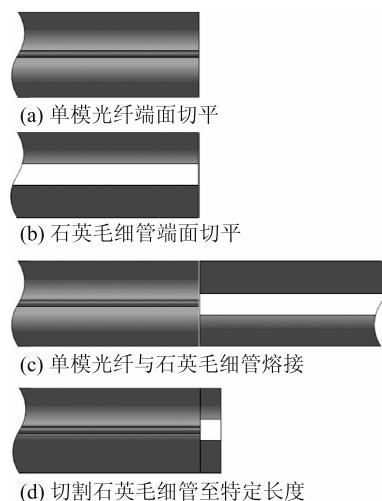


图 2 单模光纤与石英毛细管熔接过程示意图

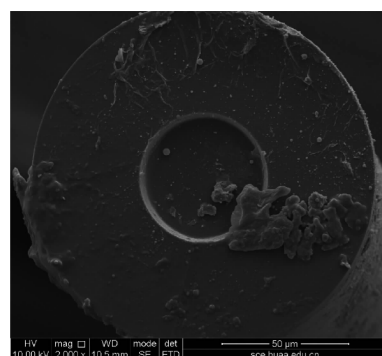


图 3 石墨烯谐振探头 SEM 图

通过宽带光源和光谱仪测得石墨烯谐振探头的干涉光谱,如图 4 所示。由干涉光谱解算得到石墨烯 F-P 腔的腔长为 $58.63 \mu\text{m}$ 。

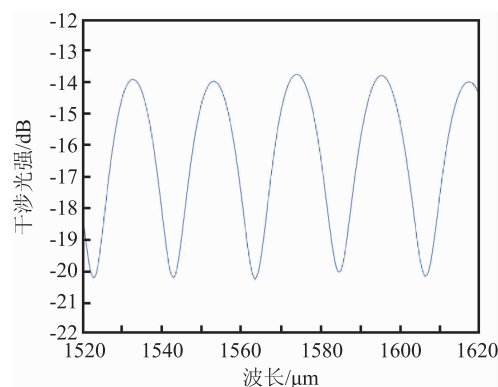


图 4 石墨烯谐振探头干涉光谱图

1.2 谐振压力测试系统

谐振平台由光激励和光检测两部分组成,实验测试系统如图 5 所示。实验平台主要包括两大部分,分

别是激振部分和拾振部分。

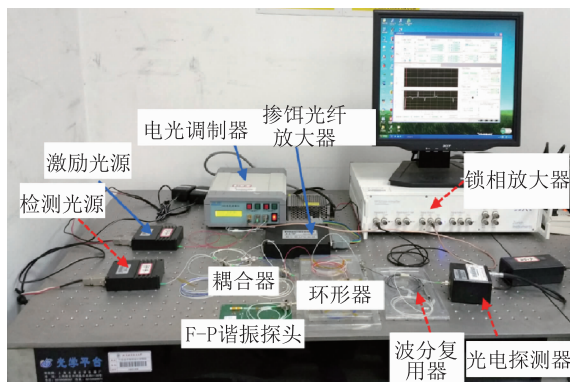


图 5 谐振压力测试平台图

实验平台中一共用到了两个 DFB 光源，一个是激励光源，波长为 1550.12 nm，输出功率为 10 dBm。锁相放大器向电光调制器发出正弦调制信号，激励光源经电光调制器调制后输出，掺铒光纤放大器起到补偿调制后激光功率衰减的作用。

另一个光源是信号的检测光源，波长为 1551.72 nm，输出功率为 10 dBm。三端口耦合器将信号检测光源和被掺铒光纤放大器放大后的调制激励光源耦合在一起。耦合之后的光通过环形器进入 F-P 腔，照射到插芯端面的石墨烯薄膜表面，薄膜吸收激光能量后产生与调制频率相同频率的周期性振动。在 F-P 腔中，激励光源和检测光源都会产生干涉信号，而实验中只需要检测信号产生的干涉光，它在薄膜周期性振动的影响下携带了与薄膜振幅有关的信号。而激励光源产生的干涉光则是一种干扰信号，需要消除它的影响。因此选用了密集型波分复用器进行滤波处理，经过滤波后的干涉光信号通过光电探测器由光信号转变为电信号，最后送入计算机中进行观察与数据处理。

2 谐振压力测试结果

石墨烯谐振探头测得的幅频曲线如图 6 所示，室温常压下石墨烯薄膜的谐振频率为 1.43 MHz，品质因数为 10.24。

将用于测量压力的探头放入真空罐中，在对真空罐进行抽真空处理的过程中，观察两个石墨烯谐振探头谐振频率和品质因数的变化，如图 7 和图 8 所示。

实验中压力变化范围为 0 ~ 68.95 kPa，测量薄膜腔体内、外的相对压力，从图 7 和图 8 中可以看出，随着压力的不断增大，谐振频率不断增大，同时品质因数不断提高。两个探头的谐振频率分别偏移了 211

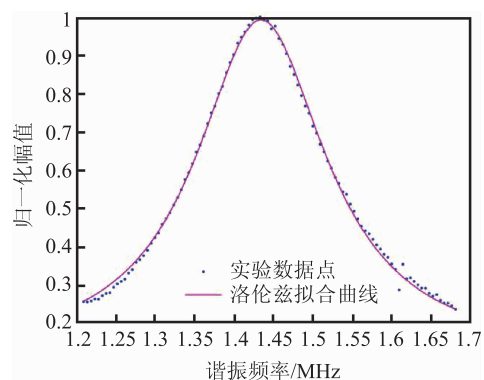


图 6 谐振器幅频曲线图

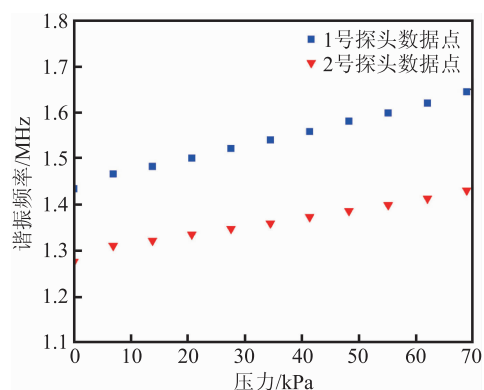


图 7 谐振频率随压力变化图

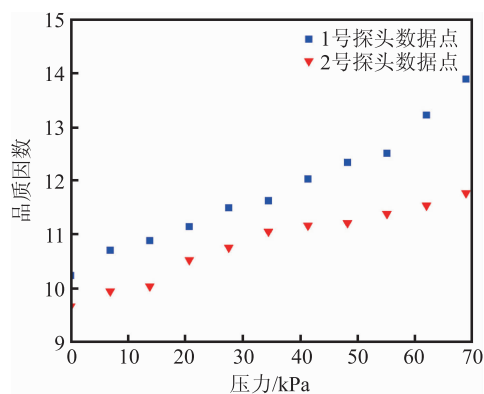


图 8 品质因数随压力变化图

kHz 和 154 kHz，压力灵敏度分别为 2.93 Hz/Pa 和 2.03 Hz/Pa，品质因数分别变化了 3.65 和 2.1。

由于空气阻尼的原因，谐振频率和压力差之间呈近似线性关系，约为 2.93 Hz/Pa。随着真空度的提高，薄膜振动的空气阻尼降低，品质因数有所提高，薄膜振动周期消耗能量降低，提高了压力检测的分辨率。

3 结论

谐振式压力传感器具有数字信号输出、高灵敏度和高分辨率等优点；石墨烯材料作为敏感元件，具有良好的热学和力学特性；而激光激励和检测的方式具有良好的抗电磁干扰的能力。本文将这三种技术相结合，研制了基于光纤 F-P 结构的石墨烯谐振式压力传感器，其兼具微机械传感器和光纤谐振器的优点，具有较高的谐振频率，在测量压力的实验中展现出良好的性能，压力灵敏度最高可达 2.93 Hz/Pa。

石墨烯谐振压力传感器的性能与石墨烯薄膜转移的成功率和转移质量密切相关，薄膜表面的褶皱、微小的破损、边缘处吸附效果不佳等缺陷会严重影响压力敏感特性，尤其是微小的破损往往会伴随漏气情况的发生，使压力测试结果失去准确性。因此，提高石墨烯薄膜转移的成功率和转移质量是后续工作中的重点。此外，本实验中是在有空气阻尼的情况下进行的，品质因数较低，未来将通过降低空气阻尼来提高石墨烯谐振器的品质因数，从而进一步提高石墨烯谐振式压力传感器的性能。

参考文献

- [1] 朱长纯, 韩建强, 刘君华. 微机械传感器的现状与发展[J]. 电子元器件应用, 2003(4): 14-17.
- [2] 蔡晨光, 樊尚春. 谐振式传感器振动特性测试系统[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(7): 174-175, 191.
- [3] 喻浩, 丁纯, 金仲和, 等. 硅微谐振器的光激励[J]. 电子学报, 1998, 26(6): 23-25.

- [4] Lammerink T S J, Elwenspoek M, Fluitman J H J. Frequency dependence of thermal excitation of micromechanical resonators[J]. Sensors and Actuators A (Physical), 1991, 27(1-3): 685-689.
- [5] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [6] Zhou J, Huang R. Internal lattice relaxation of single-layer graphene under in-plane deformation[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2008, 56(4): 1609-1623.
- [7] Nika D L, Pokatilov E P, Askerov A S, et al. Phonon thermal conduction in graphene: Role of Umklapp and edge roughness scattering[J]. Physical Review B, 2009, 79(15): 155413.
- [8] Bao W, Miao F, Chen Z, et al. Controlled ripple texturing of suspended graphene and ultrathin graphite membranes[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(9): 562-566.

收稿日期: 2019-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61773045, 61573033, 61721091); 教育部创新团队-航空航天先进传感技术(IRT_16R02)

作者简介



李子昂(1994-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事谐振式压力传感器研究。

《宇航计测技术》2019 年第 6 期目录

单目视觉三维运动位姿测量方法研究
大场景深度范围下的角度校验立体匹配算法
航天器电线电缆寿命预测模型研究
正压式 $pVTi$ 法气体流量标准装置不确定度评定
贮箱增压孔板流量系数仿真研究
匀速升降温激励法温度传感器校准技术研究
基于电阻法的工艺液位传感器测量系统及其校准装置的研制
基于 AD736 真有效值测量的发电机电压控制技术研究
宽带双极化天线测量探头的设计与仿真

基于 MARS 的多径干扰抑制方法与实验研究
感应同步器前处理模拟电路误差对系统测量精度影响分析
船舶仪表现场计量保障问题研究
发动机装配检测一体化系统设计与关键工艺
一种基于自测试的卫星快检技术研究
气膜孔图像对焦评价函数的实验研究
图像压缩系统设计
基于模拟器的辅助导航测试方法研究