

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.01.06

温度对石墨烯膜光纤 F-P 声压 传感器灵敏度影响研究

尹浩腾¹, 李成^{1,2}, 宋学锋³, 樊尚春¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 深圳北航新兴产业技术研究院, 广东 深圳 518057; 3. 南方科技大学 创新创业学院, 广东 深圳 518000)

摘要: 石墨烯具有优异的机械、电学与光学等传感特性, 有希望成为下一代可穿戴电子设备的功能敏感材料。石墨烯膜 Fabry-Perot (F-P) 声压传感器具有高灵敏度、小型化和抗电磁干扰等优点, 但会受到温度漂移的影响。温度对传感器的影响主要体现在 F-P 腔长变化, 引起工作点漂移, 导致传感器光学灵敏度发生变化, 以及改变石墨烯膜预应力。本文制备了石墨烯膜光纤 F-P 声压传感器探头, 通过声压测试表明, 温度改变了悬浮石墨烯膜的机械力学特性, 在 1 kHz 处使其机械灵敏度由 1.80 nm/Pa 提高至 2.44 nm/Pa。

关键词: 石墨烯; F-P 声压传感器; 温度影响; 灵敏度

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)01-0032-05

Effect of Temperature on Sensitivity of Optical Fiber Fabry-Perot Acoustic Sensor with Graphene Diaphragm

YIN Haoteng¹, LI Cheng^{1,2}, SONG Xuefeng³, FAN Shangchun¹

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

2. Research Institute of Beihang University in Shenzhen, Shenzhen 518057 China;

3. College of Innovation and Entrepreneurship, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Due to its excellent mechanical, electrical and optical sensing properties, graphene is expected to become a functional sensitive material for the next generation of wearable electronic devices. Although graphene-based optical fiber Fabry-Perot (F-P) acoustic sensor has the advantages of high sensitivity, miniaturization and anti-electromagnetic interference, it will be affected by temperature drift. The influence of temperature on the sensor mainly changes the F-P cavity length, thereby causing the working point drift and then the change in the optical sensitivity of the sensor. As a result, the prestress of graphene film needs to be adjusted. In this paper, an optical fiber F-P acoustic sensor using graphene diaphragm was fabricated and then acoustic test demonstrated the change of mechanical properties of suspended graphene diaphragm, thus achieving the increase of the mechanical sensitivity from 1.80 nm/Pa to 2.44 nm/Pa at 1 kHz.

Key words: graphene; F-P acoustic sensor; temperature effect; sensitivity

0 引言

光纤 F-P 声压传感器具有抗电磁干扰、小型化、探测端无源、可远距离传输和高灵敏度的优点, 近年来得到了广泛的研究^[1]。石墨烯因其优异的机械力学特性、超薄厚度和高杨氏模量^[2-3], 有望成为一种理想的声压传感器振膜材料, 使传感器具有高灵敏度和高带宽的应用特点。2013 年中国香港理工大学 Ma^[3] 等人使用多层石墨烯制作了 F-P 声压传感器, 使振膜在 1 Pa@10 kHz 下实现了 1.1 nm 的中心挠度变形, 即 1.1 nm/Pa 的机械灵敏度(单位压力变化导致的压敏膜

片中心挠度变化)^[4]。2019 年美国坦普尔大学 Qian 等人分别使用石墨烯膜和石墨烯-银复合膜制作了 F-P 声压传感器, 在 0.5 ~ 10 kHz 范围内实现 1.55 nm/Pa 和 1.17 nm/Pa 的机械灵敏度^[5]。

在温度影响下, F-P 声压传感器中各结构部件的材料均会发生不同程度的热膨胀, 从而导致 F-P 腔长和悬浮薄膜预应力发生变化。其中, 前者将导致传感器工作点发生漂移, 进而导致光学灵敏度(单位腔长变化导致的光强变化)发生变化; 后者则导致薄膜机械灵敏度的变化。为此, 本文在分析温度对传感器响应特性影响的基础上, 实验研究了温度对石墨烯膜光纤 F-P

声压传感器灵敏度的影响。

1 传感器的制备及工作原理

1.1 石墨烯膜 F-P 传感器的制备

图 1(a) 示出了所制备的 F-P 传感器的结构示意图, 包含单模光纤、氧化锆陶瓷插芯和石墨烯膜。其制备方法为: 首先, 使用酒精浴超声清洗, 去除氧化锆陶瓷插芯的灰尘和杂质, 将石墨烯膜裁剪至合适尺寸, 并放入丙酮中, 待 PMMA 保护层完全溶解后, 使用插芯将悬浮的石墨烯膜捞出; 之后, 将端面吸附有石墨烯膜的插芯置于精密干燥箱, 加热到 40℃, 保持 1 h, 则干燥后石墨烯膜受范德华力作用吸附于插芯端面; 接下来, 将制作好的探头固定在三维微动位移平台, 将端面切割平整的单模光纤插入插芯尾部, 并利用光谱仪确定 F-P 干涉腔的长度; 最后, 使用环氧树脂固定光纤, 待胶完全固化后, 即完成石墨烯膜 F-P 探头的制备。图 1(b) 示出了制备的石墨烯膜 F-P 传感器的实物图。

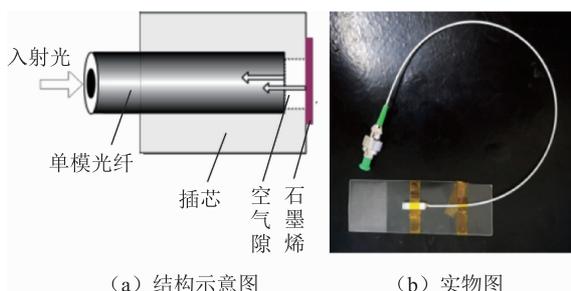


图 1 F-P 声压传感器

1.2 声压敏感机理

参考图 1(a), 石墨烯膜与光纤端面组成了 F-P 干涉腔的两个反射面。当外界声压作用于 F-P 干涉腔时, 两侧的压力差使石墨烯膜产生挠度形变, 从而改变 F-P 腔长, 通过强度解调可得到腔长变化, 实现声压测量。在双光束干涉近似条件下, 传感器的输出电压的交流分量 V_{ac} 与声压引起的石墨烯膜挠度 (即腔长变化) ΔL 的关系可表示为

$$V_{ac} = \mathcal{R} \cdot I_0 \cdot S_0 \cdot \Delta L \quad (1)$$

式中: \mathcal{R} 为光电转换系数; I_0 为光源功率; S_0 为光学灵敏度。 S_0 可表示为

$$S_0 = \frac{d(I_r/I_0)}{dL} = 2\sqrt{R_1 R_2 \xi} \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot L\right) \quad (2)$$

式中: I_r 为反射光强; λ 为光源波长; R_1 , R_2 分别为光纤端面与石墨烯反射面的反射率; ξ 是腔长损耗率; L 为 F-P 干涉腔长度。当光源波长 λ 一定时, 光学灵敏

度 S_0 是腔长 L 的周期函数; 当 λ 和 L 满足式(3)的条件时, S_0 取得最大值。对于已知腔长的 F-P 传感器, 为取得最大的光学灵敏度值, 可选择的光源波长点不止一个, 这些波长点也即该 F-P 声压传感器的正交工作点。

$$\frac{4\pi}{\lambda} \cdot L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \pi \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

1.3 温度对机械灵敏度的影响

根据 Beams 模型^[7], 当周边固支圆膜片在预应力 σ 拉伸下受均布压力时, 其中心挠度 ω 与施加压力 p 之间满足关系:

$$p = \frac{8Et\omega^3}{3(1-\nu)r^4} + \frac{4\sigma t}{r^2}\omega \quad (4)$$

式中: E 为圆膜片弹性模量; t 为圆膜片厚度; ν 为泊松比; r 为圆膜片半径。根据 Campbell 模型^[8], 当预应力较大时, 膜片中心挠度随均布压力呈线性变化, 如式(5)所示。

$$\Delta L = \omega = \frac{pr^2}{4\sigma t} \quad (5)$$

由此, 薄膜的机械灵敏度可表示为式(6), 即单位压力载荷引起的薄膜中心挠度为

$$S_m = \frac{\Delta L}{p} = \frac{r^2}{4\sigma t} \quad (6)$$

由于石墨烯膜中心挠度 ω 即为腔长变化, 根据式(1)和(6), 可得传感器的电压灵敏度 (单位压力变化导致的传感器电压输出变化) 为

$$S_v = \frac{V_{ac}}{p} = \mathcal{R} \cdot I_0 \cdot S_0 \cdot S_m \quad (7)$$

当 F-P 结构发生温度变化时, 由于石墨烯膜和氧化锆插芯基底分别具有负、正的热膨胀系数^[10], 两者之间的热变形差异使石墨烯膜承受热应力的作用。对于悬浮石墨烯膜, 其预应力可表示为

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{th} \quad (8)$$

式中: σ_0 为初始预应力; σ_{th} 为热应力。其中, 初始预应力产生的原因主要是石墨烯膜受基底的吸附作用以及薄膜转移过程中所形成的应力; 热应力则主要是由于薄膜与基底之间不同的热膨胀系数而引起, 其可表示为

$$\sigma_{th} = \frac{E_f}{1-\nu_f} (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T \quad (9)$$

式中: E_f , ν_f , α_f 分别表示石墨烯薄膜的杨氏弹性模量、泊松比和热膨胀系数; α_s 为陶瓷插芯基底的热膨胀系数; ΔT 为温度的改变量。

本文中, 10 层石墨烯膜的 E_f , ν_f 和 α_f 分别取 1

TPa, $0.17^{[9]}$ 和 $-8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1[10]}$; 陶瓷插芯基底的热膨胀系数 α_s 取 $1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1[10]}$, 则由式(9)可知, 当温度从 25°C 下降至 13°C 时, 相应的石墨烯膜内热应力会增加 0.13GPa 。

2 温度影响实验与分析

2.1 声压测试平台

图 2 为声压测试实验平台的结构示意图。在消音箱内, 将制备的 F-P 声压传感器和参比传感器 MP201 (标称灵敏度为 50.7mV/Pa) 置于扬声器轴线的对称位置。由可调谐激光器激发窄带激光, 通过环形器进入 F-P 腔, 反射光经环形器馈入光电探测器 (DC - 200 kHz 光电探测器的转换系数为 10^7V/W), 通过送入示波器进行显示和存储。

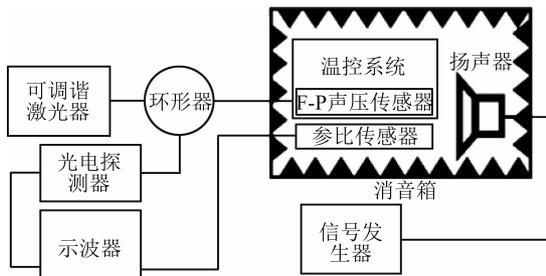


图 2 声压测试实验平台结构示意图

2.2 F-P 传感器温度影响实验

在无声压激励条件下, 首先对 F-P 结构的温度敏感性进行了测试。以 0.2°C 为间隔, 从 25°C 降温至 13°C , 再逐渐升温至 25°C 。在每一种温度状态下, 使用分辨力为 0.01nm 的光谱仪对 F-P 结构的反射光谱进行测量, 通过光谱解调可求得不同温度下 F-P 腔的长度, 如图 3 所示。

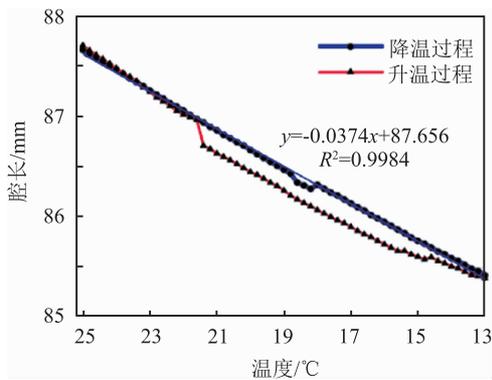


图 3 腔长随温度的变化关系

实验结果表明, 在 $13 \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内腔长与温度存在较强的线性关系, 且温度越低, 腔长越短; 而且, 降温过程中腔长-温度的耦合关系可拟合为 $-37.4 \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。这主要是由于陶瓷插芯、光纤和环氧树脂在低温下收缩, 从而导致腔长变短。参考图 4 中光谱 A, 调控前测得探头温度 25°C , 根据测得的 F-P 腔反射光谱, 将可调谐激光器的波长设置为 1556nm , 功率设置为 -19.3dBm , 此时传感器具有最大光学灵敏度。使用扬声器在 1kHz 处产生 0.9Pa 的稳定声压, 以 0.2°C 为间隔, 从 25°C 降温至 13°C , 之后再恢复至 25°C , 此过程中传感器响应如图 5 所示。因温度引起 F-P 腔长度变化, 传感器响应近似呈周期性变化。而当腔长发生单调线性变化时, F-P 声压传感器的光学灵敏度将发生周期性变化。在图 5 中 a ~ g 各点处, 曲线分别取得最大响应, 这些点对应的反射光谱 A ~ G 如图 4 所示。即, 当使用波长为 1556nm 的检测光进行强度解调时, a ~ g 各点都位于正交的工作点上。

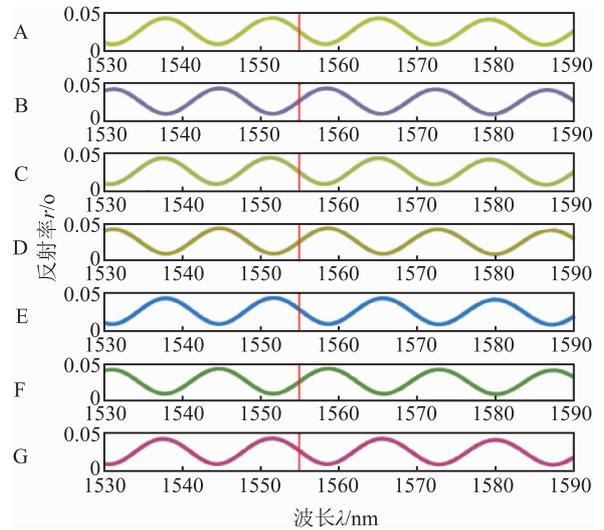


图 4 正交点外的反射光谱

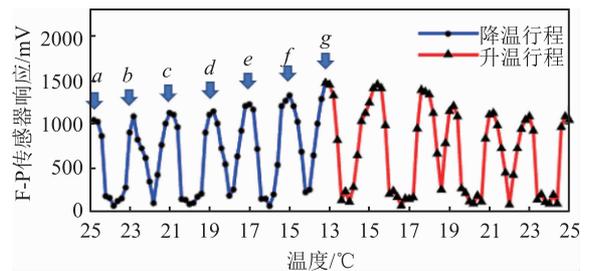


图 5 1kHz 下不同温度时声压响应

为评估温度对传感器机械灵敏度的影响,测试在不同温度下传感器的声压响应,如图6所示。由此可知,传感器的声压响应具有明显的线性特性。将光纤端面反射率 $R_1 = 2.54\%$ 、10层石墨烯膜反射率 $R_2 = 1.49\%$ 和腔长损耗系数 0.2 代入式(1)和(5),则可确定不同温度下因薄膜热应力改变而导致的 F-P 传感器的机械灵敏度和薄膜预应力的变化趋势,如图7所示。

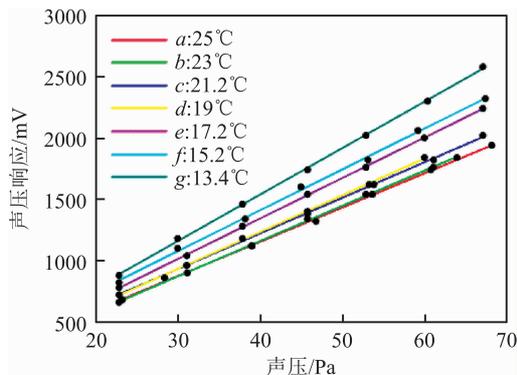
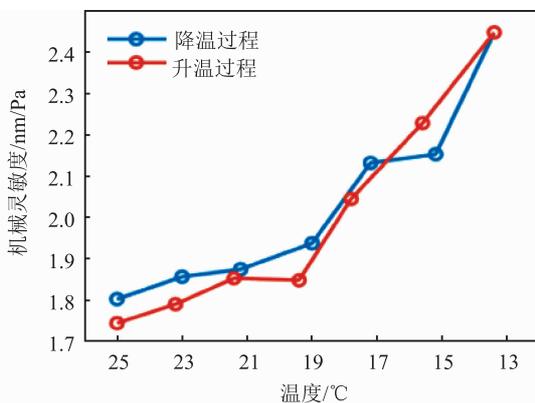
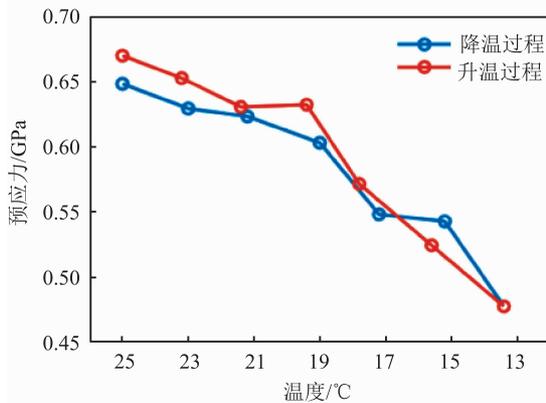


图6 降温行程中正交工作点处声压响应



(a) 机械灵敏度



(b) 预应力

图7 热应力对机械灵敏度和预应力的影响

实验结果表明,适当降温可减小悬浮石墨烯膜的预应力,使其从 0.67 GPa 降至 0.48 GPa,由此相应地将传感器振膜的机械零灵敏度从初始的 1.80 nm/Pa 提高到 2.44 nm/Pa。借助式(9),则引发上述预应力主要变化的悬浮石墨烯膜热应力的变化量约为 0.19 GPa。

3 结论

设计和制作了可进行薄膜热应力调控的石墨烯光纤 F-P 声压传感器组件,搭建了基于半导体制冷片(实验调节范围为 13 ~ 25°C)的温度调节系统,在 1 kHz 下进行了不同温度的声压测试。实验结果表明:随着温度的降低,石墨烯膜预应力逐渐下降;相应地,传感器机械灵敏度从初始条件下的 1.80 nm/Pa 增加至 2.44 nm/Pa(增幅约 35.6%);随着实验温度的降低,受材料热变形的影响,F-P 腔长逐渐减小,进而造成传感器的光学灵敏度出现近似周期性变化,即限制这种强度解调型膜片式 F-P 声压传感器的电压输出响应范围。为此,针对上述的温度耦合影响问题,通过减小 F-P 传感器敏感结构的温度不匹配系数,结合干涉信号解调算法的优化,开展融温度抑制的应力调控式石墨烯膜 F-P 声压传感器增敏的深入研究具有重要的实际意义和应用价值。

参考文献

- [1] 杜江. 用于光纤麦克风探测系统的光纤探头设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [2] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [3] 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.
- [4] Ma J, Xuan H, Ho L H, et al. Fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932-935.
- [5] Dong Q, Hyungdae B. Miniature fiber optic acoustic pressure sensors with air-backed graphene diaphragms[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2019, 141: 041003.
- [6] Yu B, Kim D W, Deng J, et al. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers[J]. Applied Optics, 2003, 42(16): 3241-3250.
- [7] J W Beams. The structure and properties of thin film[M]. New

York: John Wiley and Sons, 1959.

- [8] Campbell J D. On the theory of initially tensioned circular membranes subjected to uniform pressure[J]. *Journal of Mechanics & Applied Mathematics*, 1956, 9(1): 84-93.
- [9] Le C, Wei X D, Ky J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385-388.
- [10] Yoon D, Son Y W, Cheong H. Negative thermal expansion coefficient of graphene measured by Raman spectroscopy[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(8): 3227-3231.
- [11] Hayashi H, Saitou T, Maruyama N, et al. Thermal expansion coefficient of yttria stabilized zirconia for various yttria contents [J]. *Solid State Ionics, Diffusion & Reactions*, 2005, 176(5-6): 613-619.

收稿日期: 2020-01-06; 收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573033); 深圳市科技计划项目(JCYJ20180504165721952); 教育部创新团队资助项目(IRT2013)

作者简介

尹浩腾(1993-), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事光纤声压传感器研究。



李成, 男, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院副教授, 博士生导师, 研究方向为光纤 Fabry-Perot 传感器、先进传感与智能仪器。2007 年博士毕业于清华大学精密仪器与机械学系, 2009 年入职北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 期



间先后赴新加坡南洋理工大学和美国加州大学伯克利分校开展访学交流。学术兼职: 中国仪器仪表学会传感器分会常务理事、北京微创医学学会副秘书长。发表学术论文 100 余篇, 其中 SCL/EI 检索论文近 80 篇; 授权中国发明专利 10 项, 获软件著作权 3 项; 参编规划级教材 3 本, 其中获北京市精品规划教材 1 本。