

# 基于石墨烯复合结构的 MZ 型压力传感器

李艳<sup>1</sup>, 朱珂慧<sup>2</sup>, 梁帅, 王泽龙, 肖屹峰, 杨福铃, 朱珂慧\*

(中国矿业大学, 北京 100083)

**摘要:** 本文基于石墨烯波导的光学特性, 研究了基于石墨烯复合结构的 MZ 型压力传感器的新型敏感机理与性能优化方法, 设计并制备了不同类型的石墨烯复合结构压力传感器, 实现了 MZ 型压力传感器灵敏度的提高。论文首先提出了石墨烯复合结构的建模方法, 讨论了有效折射率的计算方法, 并且构建了理想状态下的传感器金字塔结构的理论模型, 实现了理论上传感器压力-折射率-输出光信号的信息传递。其次, 设计了一种石墨烯波导复合结构压力传感器。以灵敏度、传输损耗、分辨率、测量范围为目标, 优化设计石墨烯波导的干涉长度、臂间距、纤芯宽度等参数, 并通过制备器件验证了石墨烯复合结构优化设计方法的有效性。

**关键词:** 压力传感器; 石墨烯; 复合结构; 马赫-曾德尔干涉

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## 1 传感器设计背景和应用价值

设计背景: 光学压力传感器具有低衰减、抗电磁干扰能力强、远程可控等优点[1, 2], 广泛应用于智能医疗[3]、软体机器人[4]、智能穿戴[5]等领域。随着新型传感技术的不断涌现, 光学传感技术正呈现出强劲的发展势头。目前, 该技术已成为许多国家竞相探索的前沿技术, 在国防和民用领域得到了广泛应用。美国、西欧、日本等国投入了大量的人力、财力和物力用于研发光学传感器, 并且高度重视其应用研究。

我国在光学传感领域的研究正处于快速发展阶段, 主要关注高性能和新材料的光学传感器研究, 但目前的研究仍无法完全满足实际需求, 因此需要持续不断的努力。在尺寸尽可能小的前提下尽可能地提升压力灵敏度吸引了众多研究人员的关注。传统的光学压力传感器有端面光纤型, 马赫曾德尔干涉型 (MZ), 布拉格光栅型等[2, 6-8], 但是大多受限于敏感机理, 压力灵敏度存在上限。基于石墨烯的复合结构具有多种多样的物理特性[9, 10]和前所未有的优越表现。同时, 石墨烯具有独特的光学特性[11-13], 如石墨烯的光吸收特性对上表面

<sup>1</sup>第一作者信息: 李艳, 女, 中国矿业大学(北京)机电学院机器人系副教授, 光电传感, yanli.83@163.com

<sup>2</sup>通讯作者信息: 朱珂慧, 男, 中国矿业大学(北京)机电学院机器人系研究生, 光电压力传感, 1279394013@qq.com

介质折射率敏感等，因此在实现有限空间内高灵敏、宽量程、强稳定的压力传感方面具有巨大的潜力。石墨烯与光子、电子之间的能量交换是其光子-电子交互过程的核心。当光子能量传递给石墨烯的电子时，石墨烯费米能级远离狄拉克点，这在光学上表现为复折射率的调制，从而影响石墨烯在光波段的模式分布和吸收损耗。由于石墨烯具有独特的光电子特性，它对微纳光子学的发展产生了革命性的影响。

石墨烯波导与光波导的结合具有天然的优势，具有广阔的前景和丰富的实用性。近年来，涌现了越来越多的石墨烯波导相关研究。建立压力传感中的石墨烯复合结构的敏感机理模型具有高度的前瞻性和充分的可行性。石墨烯波导特性的理论和实验研究具有基础性的科学意义，而石墨烯与波导结合后，其物理模型、工作机理和功能特性等参数都有待进一步探索。基于石墨烯复合结构的 MZ 型压力传感器的制造和性能分析，有助于深入研究石墨烯在压力传感方面的特长和不足，进而实现高灵敏度、大量程的光学压力传感。为后续研究提供理论借鉴与优化方法

应用价值：提出了一种石墨烯波导复合结构压力传感器的优化设计方法。以灵敏度和稳定性为目标，建立 PDMS 力敏结构力学模型，优化设计金字塔高度和阵列宽度。同时以灵敏度、传输损耗、分辨率、测量范围为目标，建立石墨烯-波导光学模型，优化设计干涉长度、臂间距、纤芯宽度等参数。实验结果表明，优化设计的传感器的灵敏度为 17.86 nm/kPa，可以检测的最大压力为 4 kPa，与理论分析结果一致，验证了石墨烯波导复合结构压力传感器的设计与建模方法的可行性。

(1) 探索了石墨烯复合结构的理论模型：现有石墨烯波导的敏感机理模型大多是从电导率和载流子密度角度表征波导复折射率，一方面未充分利用压敏结构变形引起的石墨烯电磁场性质变化；另一方面还有可能引入新的不确定性误差源，增加传感建模与复折射率表征的复杂度。本文通过对石墨烯波导复合结构进行建模仿真，基于波导的双光束干涉理论，分析波导输出端信号特点与波导上层折射率变化所带来的影响。其次基于电磁波理论体系，分析石墨烯复合结构的建模方法，并给出了复折射率的推导过程，讨论了有效折射率的计算方法。最后是金字塔压力敏感结构的理论分析，根据石墨烯复合结构压力传感器的结构特点，简化理论参数，实现了理论上传感器压力-折射率-输出光信号的信息传递。

(2) 国内外缺乏石墨烯复合结构压力传感器的优化设计方法，现有的光学压力传感器研究中，石墨烯大多作为力敏结构、F-P 腔膜等结构，利用石墨烯优秀的力学特性实现高灵敏度传感。但是石墨烯与波导结合带来的高折射率特性没有被利用，现有的光学压力敏感结构设计方法也没有考虑到石墨烯的选择吸收性，在光学压力检测方面还有很大的潜力尚未开发。

本文利用了石墨烯与波导结合带来的高折射率特性,对石墨烯波导复合结构压力传感器进行设计,填补了相关领域的空白。

该传感器对微小压力变化展现出优越的灵敏度,可用此传感器进行人体生命体征等生物信号进行检测。对未来的软机器人、国防和智能医学等工业应用中显示出了巨大的潜力。

## 2 创新点与优势

论文围绕石墨烯光学压力传感器进行设计,以石墨烯复合结构的理论研究为基础,为提高压力传感器的灵敏度开展传感器设计相关研究,主要创新点如下:

(1) 建立了石墨烯复合结构压力传感的理论模型。深入分析石墨烯波导复合结构的光吸收特性,研究石墨烯的高折射率对波导消逝场的影响,为后续研究提供理论借鉴与技术验证。

(2) 提出了石墨烯波导复合结构压力传感器结构设计方法。针对压力传感器灵敏性、负载变化的可恢复性多重性能需求,结合 PDMS 材料与石墨烯材料,实现基于 PDMS 结构的力学变形和石墨烯波导光学变化的压力测量。提出了石墨烯波导复合结构压力传感器性能优化方法。针对测量精度低、测量范围小的问题,在结构、材料、信号补偿多方面综合优化,实现高灵敏度、宽测量范围的压力传感。

(3) 提出了一种基于二维材料堆叠的增敏方法。建立了石墨烯波导复合结构压力传感器的敏感机理模型。同时基于石墨烯优异的光学特性,设计了一种石墨烯复合结构压力传感器,建立了二维材料堆叠的灵敏度增强模型,为实现更加灵敏的微小压力传感奠定基础。

与其他不同类型的光压传感器的性能比较,本传感器在同测量范围内有更高的灵敏度。

传感器类型	灵敏度	压力范围
PQDs-Fabry-Perot	2.2nm/kPa	0-80kPa
Cylinder -FBG	1.198 nm/MPa	0-1 MPa
Microfiber MZI	13.31 nm/MPa	< 3 MPa
DMF-MZI	0.348 nm/MPa	< 7 MPa
Extrinsic Fabry-Perot	70.8 nm/MPa	< 10 MPa
MZI-WG	-199.0 pm/KPa	0-50 kPa
本文	17.86 nm/kPa	0-0.34 kPa

由表格可以看出,在压力范围相同的情况下,石墨烯波导复合结构压力传感器具有极其优越的压力灵敏度。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

所设计的石墨烯基复合材料结构压力传感器的三维（3D）视图如图 1（a）所示。单层石墨烯覆盖在波导上，其折射率大于波导的纤芯折射率。PDMS 力敏结构压在石墨烯膜上，其中一列金字塔的塔尖与传感臂纤芯对齐，与此同时，参考臂上方没有 PDMS 力敏结构的金字塔压在上方。光通过基于定向耦合器的功率分配器分成两部分，两部分在沿传感臂和参考臂传播后在第二个定向耦合器中重新组合。石墨烯复合结构压力传感器的爆炸视图如图 1（b）所示，聚二甲基硅氧烷（PDMS）基材经过刻蚀形成阵列金字塔结构。波导由干法刻蚀和质子交换的铌酸锂（ $\text{LiNbO}_3$ ）组成。

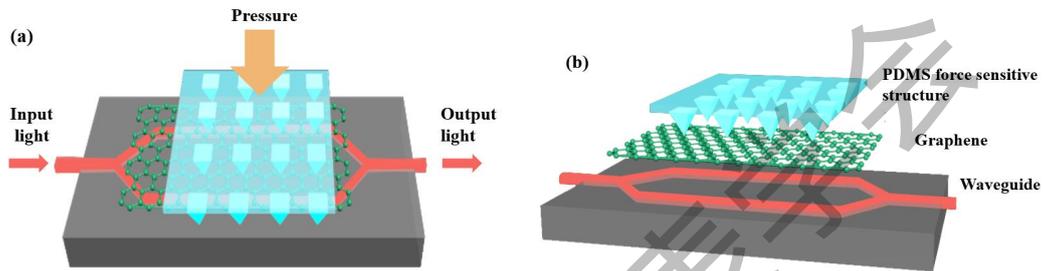


图 1 石墨烯复合结构光学压力传感器的示意图：（a）整体结构示意图（b）爆炸视图

在这样的波导配置下，石墨烯和波导界面上的电场是不连续的，这导致 TE 模式的振幅比 TM 模式高得多。因此，以下设计和分析工作仅涉及基本的 TE 模式。PDMS-石墨烯的接触面积随压力发生变化时，由于石墨烯的独特光学性质，石墨烯复合结构压力传感器的有效折射率会随之发生变化。有效折射率实部和有效折射率虚部与 PDMS 与石墨烯的接触面积的关系如图 2（a）所示，可以得到，随着压力的变大，有效折射率实部变大，有效折射率虚部变小，表明压力引起的 PDMS 力敏结构变形改变了石墨烯-波导中光的传播。随着压力的加大，PDMS 与石墨烯的接触面积不断变大，石墨烯-波导结构光场变化更加明显。石墨烯-波导结构主要通过两臂干涉来实现传感。光信号经过石墨烯-波导结构，输入端和输出端的输出光谱，如图 2（b）所示，表明光信号发生干涉，由于光程差的变化，两个波导臂的光相消形成干涉波谷。压力引起的有效折射率的变化会改变波导中传输的光的相位，引起光谱中波长的偏移。

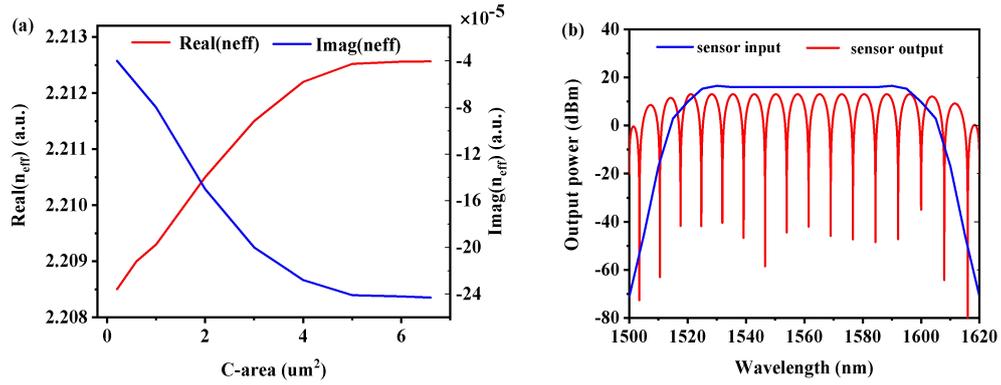


图 2 (a) 石墨烯复合结构压力传感器的有效折射率实部和虚部随 PDMS 与石墨烯接触面积而变化。

(b) 传感器输入端和输出端的输出光谱，其中光信号在传感器处发生干涉

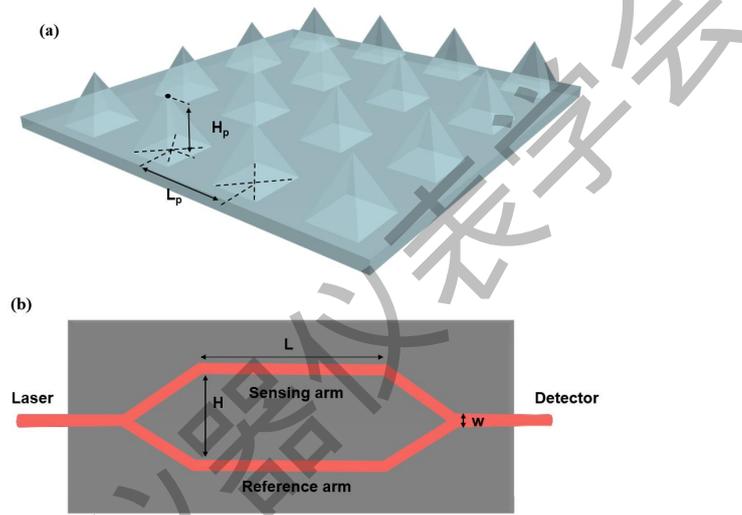


图 3 (a) PDMS 力敏结构， $L_p$  表示相邻列金字塔的距离， $H_p$  表示金字塔的高度 (b) 石墨烯-波导结构示意图，其中  $H$  表示干涉臂与参考臂之间的距离。 $L$  表示传感臂的长度，参考臂的长度与传感臂的长度相同。

$w$  表示芯层的宽度。

石墨烯复合结构压力传感器的分析模型包括力学模型和光学模型。石墨烯复合结构光学压力传感器的灵敏度  $S$  可以表示为：

$$S = S_1 S_2 \quad (1)$$

其中， $S_1$  表示 PDMS 力敏结构的灵敏度， $S_2$  表示石墨烯-波导层的灵敏度。聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 为高弹性材料，相同压力的作用下形状改变量更大。施加在 PDMS 力敏结构上的压力与 PDMS 与石墨烯的接触面积在一定的压力范围内呈线性关系。图 3(a) 示意了 PDMS 力敏结构的三维图，PDMS 力敏结构由阵列金字塔构成，所用的金字塔高度相同，其中  $L_p$  表示阵列金字塔间的距离， $H_p$  表示金字塔的高度。由于 PDMS 层的金字塔对称，每个金字塔的贡献是相等的。在法向力作用下，单个金字塔应力—应变关系为：

$$F = \frac{4}{\sqrt{2}} \frac{E \tan \theta}{(1-\nu^2)} \delta^2 \quad (2)$$

其中,  $\nu$ 表示泊松比,  $E$ 表示杨氏模量,  $\theta$ 表示PDMS力敏结构中金字塔的倾斜角,  $\delta$ 表示单个金字塔的应变。选用不同的PDMS力敏结构尺寸可以实现压力灵敏结构的灵敏度调节[31], 这种设计具有调节传感器灵敏度的潜力。

图3展示了干涉型波导的示意图, 其中H表示干涉臂与参考臂之间的距离, L表示传感臂的长度, 参考臂的长度与传感臂的相同。W表示芯层的宽度。透射条纹可以表示为:

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}} + 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{clad}}} \cos \varphi \quad (3)$$

其中  $I_{\text{core}}$  和  $I_{\text{clad}}$  分别是核心和包层中的光强度。波导的设计干涉可以考虑为双波束干涉, 干涉信号可以表示为正弦函数, 其相位 $\varphi$ 为:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} L \quad (4)$$

其中,  $\lambda$ 为入射光的波长, L为光波导中传感臂长度。 $\Delta n_{\text{eff}}$ 是核心和包层模式之间有效折射率的差异。光纤中的光强度由传感臂的强度和长度共同决定。因此可以通过改变传感臂的长度来控制光波导的输出。石墨烯-波导层的灵敏度  $S_2$  可表示为[7]:

$$S_2 = \frac{d\lambda}{dF} = \frac{1}{\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\lambda} \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}})}{\partial \lambda}} \cdot \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}})}{\partial F} \quad (5)$$

因此, 由于环境折射率变化而导致的任何变化都会导致衰减峰值的偏移。这种光谱偏移可用于测量压力。

### 3.2 设计方法

首先建立PDMS力敏结构力学模型, 分析金字塔高度和阵列宽度对灵敏度的影响。其次基于石墨烯波导光学模型, 分别以灵敏度、传输损耗、分辨率、测量范围为目标, 优化设计波导的干涉长度、臂间距、纤芯宽度等参数。最后搭建了石墨烯波导复合结构压力传感器的实验测试系统, 进行了压力传感测试和稳定性测试。

石墨烯作为覆层与光波导的结合有助于实现未来传感器的小型化。金字塔压力敏感结构、石墨烯覆层与波导的结合的复合结构在光学压力传感方面具有很大的潜力。本节提出了一种新型石墨烯波导复合结构压力传感器。设计目标是最大程度的利用石墨烯与波导结合的压力-波长偏移光学特性, 进而实现高灵敏度的压力测量。建立PDMS力敏结构力学模型, 分析

金字塔高度和阵列宽度对灵敏度和稳定性的影响，考虑实际制造和应用，优化设计 PDMS 力敏结构。同时以灵敏度、传输损耗、分辨率、测量范围为目标，建立石墨烯-波导光学模型，优化设计干涉长度、臂间距、纤芯宽度等参数，并通过实验来验证石墨烯波导复合结构压力传感器的设计与建模方法的可行性。

### 3.2.1 力敏结构优化设计

与传统的柱形、球形等相比，金字塔型结构具有更高的压力传递效率。图 4(a)分别展示了相同底面积的柱形、球形、金字塔形压力敏感结构接触面积变化曲线。40kPa 的压力下接触面积改变量分别为  $0.3\mu\text{m}^2$ 、 $3.2\mu\text{m}^2$ 、 $4.1\mu\text{m}^2$ 。这表明，金字塔型力敏结构对压力的敏感性更高。图 4 (b) 分别展示了金字塔高度为 30 $\mu\text{m}$ 、40 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$  的 PDMS 力敏结构的压力与接触面积拟合曲线，从图 4(b)中可以看到，随着压力的增加，接触面积也在增加，在 0-10kPa 的范围内曲线斜率较大，10kPa 之后曲线斜率变小。高度为 50 $\mu\text{m}$  金字塔阵列的性能优于高度为 40 $\mu\text{m}$  的金字塔阵列的性能。

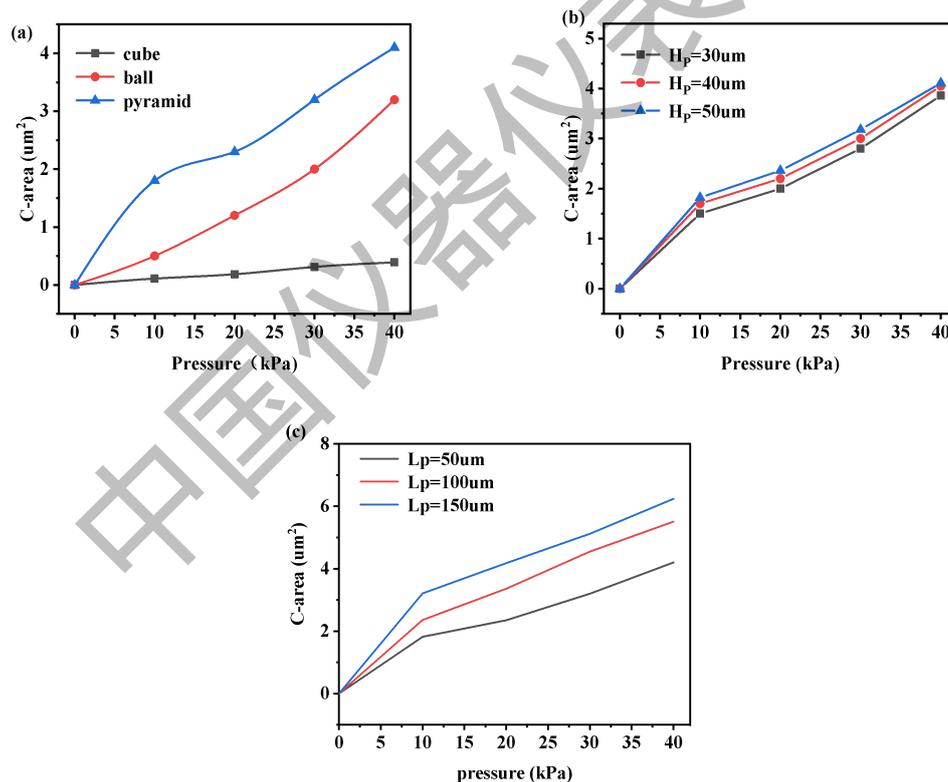


图 4 (a) 不同形状的 PDMS 力敏结构的 PDMS-石墨烯 接触面积随压力的变化。PDMS-石墨烯 接触面积作为不同 PDMS 力敏结构的金字塔高度 (b) 和金字塔横向阵列间距 (c) 下压力的函数

金字塔横向阵列间距能影响 PDMS 力敏结构的灵敏度和稳定性。图 4 (c) 展示了不同金字塔横向阵列间距的压力-接触面积拟合曲线，横向阵列间距为 50 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ 、150 $\mu\text{m}$  的

PDMS 力敏结构接触面积改变量与压力的比值分别为 0.182、0.236、0.321。从线性拟合结果可以看出，金字塔横向阵列间距越大，相同压力下接触面积的改变量越大,原因是金字塔密度降低。考虑到金字塔横向阵列间距过大，相邻阵列的中心处会出现塌陷现象，金字塔横向阵列间距选择为 100  $\mu\text{m}$ 。

### 3.2.2 石墨烯-波导结构的优化设计

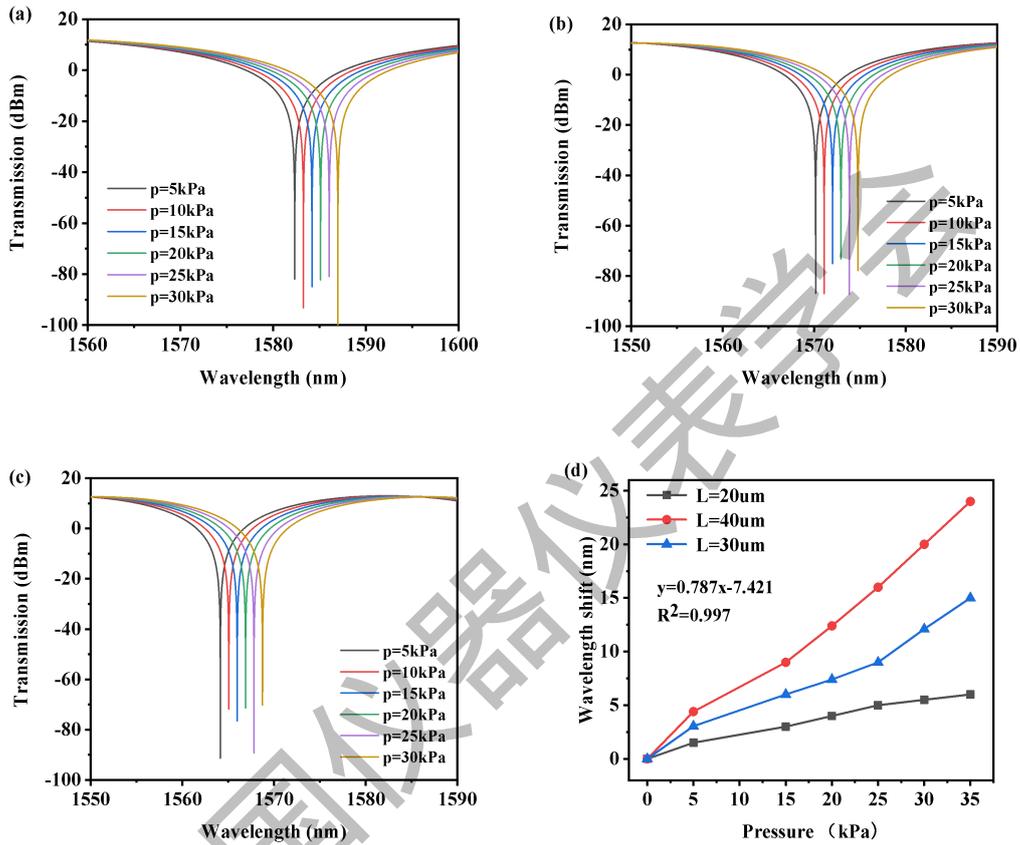


图 5 对于不同的压力，干涉长度 L 为 20mm(a)，30mm(b)，40mm(c) 的石墨烯复合结构压力传感器的输出光谱 (d) 不同干涉长度的传感器的波长偏移和灵敏度结果

为了更好地理解所提结构的干涉机理，采用基于光束传播理论的商用 COMSOL 模块来模拟入射光通过压力传感器传播时的电场强度演变过程。根据公式 (3)，灵敏度  $S_2$  与干涉长度 L 相关。显然，干涉长度 L 越大，波长变化越大，灵敏度 S 越大，但器件的尺寸也越大。图 5 显示了当干扰长度 L 为 30 毫米(a)、40 毫米(b)和 50 毫米(c)时，基于石墨烯的复合结构压力光学传感器在不同压力下的波长传输光谱。图 5 (b) 展示了三种不同干涉长度的传感器的波长偏移量,与压力呈线性变化. 干涉长度 L 为 20mm、30mm、40mm 的传感器对应的压力灵敏度分别为 0.3nm/kPa、0.6nm/kPa、0.9nm/kPa，相应的拟合度分别为 0.958、0.987、0.998，验证了干涉长度 L 逐渐增大时，石墨烯复合结构压力传感器的灵敏度逐渐增

大的趋势。

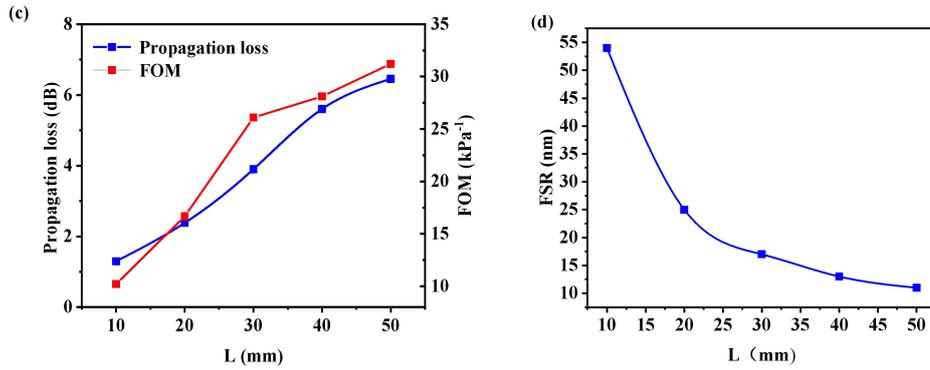


图 6 (a) 计算得到的石墨烯复合结构压力传感器的传输损耗和品质因数作为干涉长度  $L$  的函数 (b) 传感器的 FSR 随干涉长度  $L$  的变化

为了保证压力传感的信号清晰，光波导的传输损耗应尽可能的小。我们选择合适的干涉长度实现石墨烯复合结构压力传感器的低损耗和高分辨率检测。对于波长解调方式的传感器，传感器的分辨率定义为传感器所能探测到的最小波长变化量，这主要取决于光谱仪的最小分辨率和传感器的信噪比。然而信噪比等参数很大程度上受到传感系统中其他仪器的影响。因此，品质因数 FOM 被广泛使用，它定义为灵敏度与其峰值半高宽的比值

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (6)$$

图 6 (a) 展示了不同干涉长度  $L$  的石墨烯复合结构压力传感器的传输损耗和品质因数。可以看出，随着干涉长度  $L$  从 10mm 增加到 50mm，传感器的传输损耗由 1.32dB 上升到 6.45dB，结果表明随着干涉长度的增加，传输损耗不断增加。同时，干涉长度越大，品质因数越大，在干涉长度 10mm 到 30mm 范围内，品质因数 FOM 增长较快，干涉长度 30mm 到 50mm 范围内，品质因数增长趋势变缓，干涉长度的增加对品质因数的增加的影响越小。

测量系统的光谱范围限制了压力检测的测量范围，过大的 FSR 会导致超出 OSA 监测频谱范围的波长偏移。增大干涉长度  $L$  可以减小 FSR，从而满足监视器频谱范围的限制。如图 6 (b) 所示，输出光谱的 FSR 随着干涉长度  $L$  的增加而减小，并且干涉长度  $L$  大于 20mm 时，FSR 小于 30nm，大多数波长解调方式的监视器能够满足条件。考虑传感器的灵敏度、损耗、尺寸等因素，选择合适的干涉长度  $L$  为 40mm。

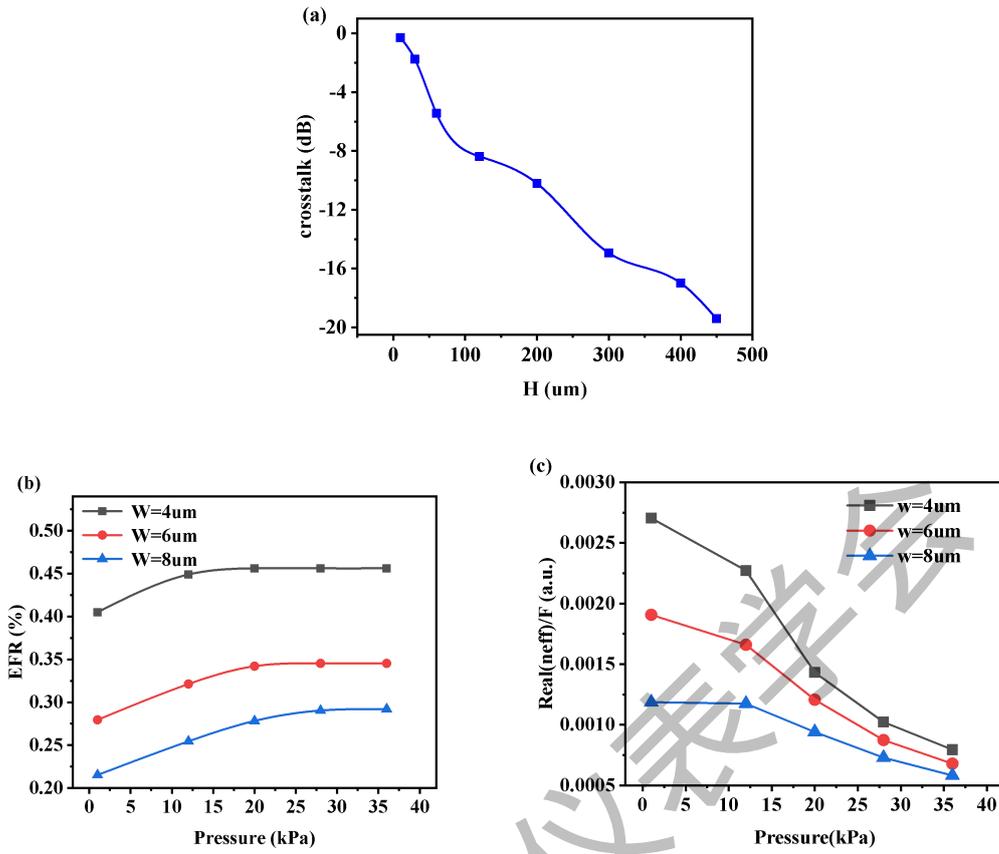


图7 (a) 不同臂间距对应的串扰强度 (b) 不同波导芯层宽度对应的限制因子  
(c) 不同波导芯层宽度对应的有效折射率

两波导相距很远时，两个波导中的模场分布与各自单独存在时相同。随着距离减小到一定范围，各波导中的模式将受到影响。如图7(a)所示，波导传感臂和参考臂的串扰强度随着间距H的增大而减小，H大于400um时，串扰强度低于-18dB，满足传感器系统的要求。波导耦合处的弯曲损耗与H有关，间距H过大则弯曲波导的长度过大。考虑到传感器的尺寸要求，选择合适的间距H=400um。

通常，为了实现低损耗传播，并避免多模传输造成的影响，传感器中采用的光波导必须为单模传输。石墨烯复合结构压力传感器的灵敏度 $S_2$ 与消逝场的分布有关。消逝场所占的比例越大，传感器在表面传感的情况下就越灵敏。消逝场比(EFR)[33]，即包层中的光场强度与总模场强度之比，可以定义为：

$$EFR = \frac{\iint_s |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (7)$$

因此，以消逝场强度的比例最大化为目标，可以实现波导截面尺寸的优化。图7(b)展示了不同纤芯宽度的传感器的压力与EFR的关系。压力相同的情况下，纤芯宽度越大，

EER 越小。这表明光源不变时，纤芯宽度的增大使更少的光泄漏到石墨烯上表面，消逝场强度变小。纤芯宽度为 4 $\mu\text{m}$ 、6 $\mu\text{m}$ 、8 $\mu\text{m}$  的传感器在压力分别大于 14.8kPa、21.2kPa、32.1kPa 后，消逝场强度不再随压力变化，此时的压力超出传感器的检测范围。

根据公式 (4) 可知，有效折射率实部与压力的比值越大，传感器的压力灵敏度越大。如图 7 (c) 所示，随着压力的变大，有效折射率与压力的比值逐渐变小，这表明压力对消逝场分布的影响逐渐变小。对不同纤芯宽度的传感器，相同压力下，纤芯宽度越小，有效折射率与压力的比值越大。这是因为更多的模态场，在较小的  $w$  下，被泄漏到基板中。传感器输出端口与单模光纤连接，为避免多模传输，芯层宽度不能太小。综合考虑传感器的灵敏度与测量范围，选择纤芯宽度为 6 $\mu\text{m}$ 。优化设计的石墨烯复合结构传感器参数如表 1 所示

表 1 优化设计的传感器尺寸参数

参数	PFS 结构		石墨烯波导		
	$H_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$L$ (mm)	$H$ ( $\mu\text{m}$ )	$w$ ( $\mu\text{m}$ )
值	50	100	40	400	6

### 3.4 实验验证过程

实验设置示意图如图 8 所示，该图展示了压力实验测量系统的示意图。为了获得石墨烯波导复合结构压力传感器的输出光谱，采用 1525nm-1600nm 的宽谱光源输入光信号，并利用光谱分析仪的波长分辨率为 0.02 nm 实时监测透射光谱。在实验中，将石墨烯波导复合结构压力传感器放置在商用压力机的稳定位置上，通过压力机长杆的垂直运动施加均匀压力，该长杆末端连接一个圆柱平面。PDMS 力敏结构位于长杆末端圆柱压板上，从而获得均匀的压力。改变压力机施加的压力大小，可在压力机显示屏上实时读取压力并使用 OSA 分析输出光信号，以获得传感器的实时输出光谱。

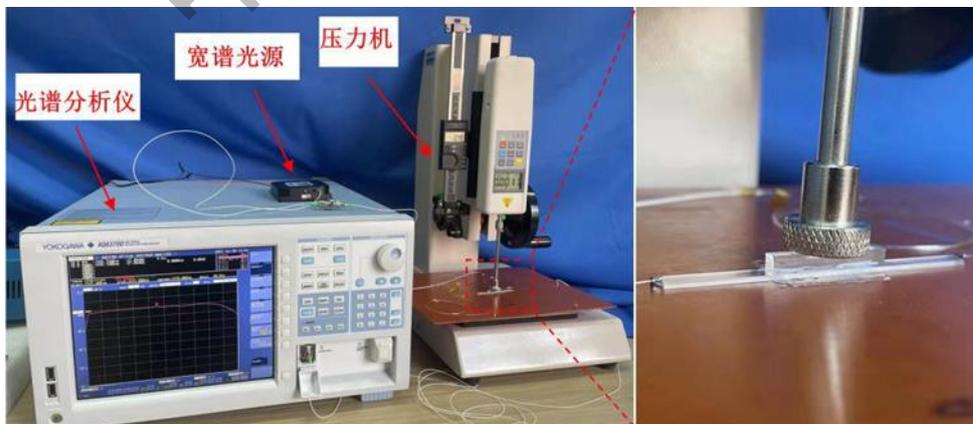


图 8 压力实验测量系统的实验设置示意图

### 3.4.1 压力灵敏度测试

图 9 给出了不同压力下的石墨烯波导复合结构压力传感器的输出光谱。随着机械压力增加，输出光谱的干涉波谷向右移动。当压力机的压力从 0 kPa 增加到 3.4 kPa 时，干涉波谷由 1565.11 nm 移动到 1565.09 nm。

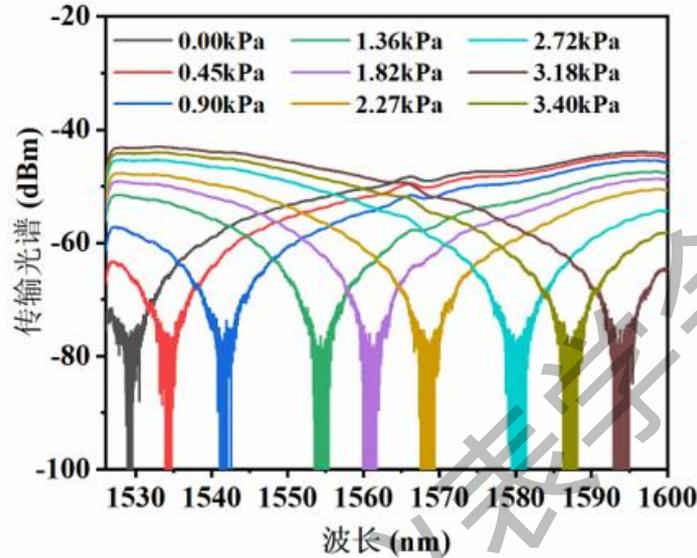


图 9 不同压力下的石墨烯波导复合结构压力传感器的输出光谱

输出光谱的波长偏移量与压力的曲线如图 10 所示。在 0-4 kPa 的测量范围内，压力灵敏度为 17.86 nm/kPa。传感器的实际性能与理论相符，实验结果的拟合曲线与理论曲线存在一定的差距。主要原因可能是由于制造误差，或是干涉臂与传感臂的长度可能不完全一致，实验中两臂的相位差与理论推导存在误差。也可能刻蚀过程中存在误差，PDMS 力敏结构的金字塔阵列高度不相等，压力对石墨烯-波导的光场影响小于理论推导。

制造了两个具有不同干涉长度的传感器。图 11 显示了干涉长度  $L$  分别 30 mm 和 40 mm 时波长偏移相对于压力的变化。经计算，干涉长度为 30 mm 和 40 mm 的石墨烯波导复合结构压力传感器的灵敏度分别为 14.85 nm/kPa 和 17.86 nm/kPa，与图 3.15 中的石墨烯波导复合结构仿真光谱一致，验证了设计的有效性。

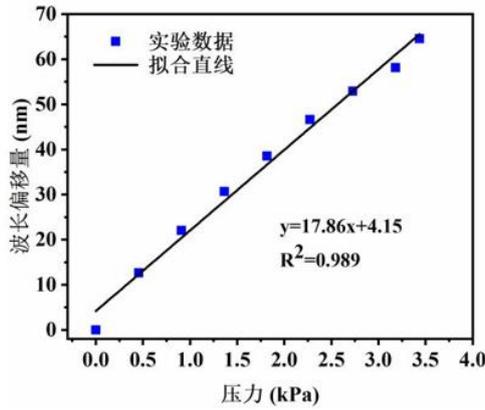


图 10 输出光谱的波长偏移量与压力的曲线

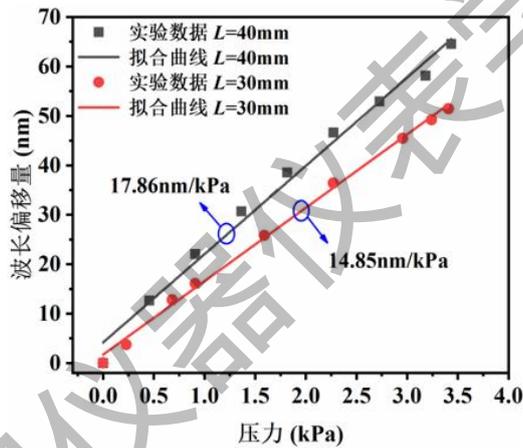


图 11 干涉长度  $L$  分别为 30 mm 和 40 mm 时波长偏移曲线

### 3.4.2 稳定性测试

金字塔结构在压力下已证明可表现出良好的稳定性。本章设计的石墨烯波导复合结构压力传感器在初始压力状态下以 1 Hz 的采样率收集光谱衰减波长 1 小时。结果如图 12 所示，可以得到标准偏差为 60.75 pm，这表明压力传感器显示出良好的稳定性，能够满足测量要求。

图 13 展示了石墨烯波导复合结构压力传感器的多次循环试验，每次试验的输出光谱波长偏移量变化不大，在 0-4 kPa 的压力作用下 PDMS 力敏结构体现出良好的稳定性，能够稳定地压缩变形和回复。重复的压力施加和撤销不会引起输出光谱的波长偏移。实验结果有效证明了优化设计的压力传感器具备良好的重复性。

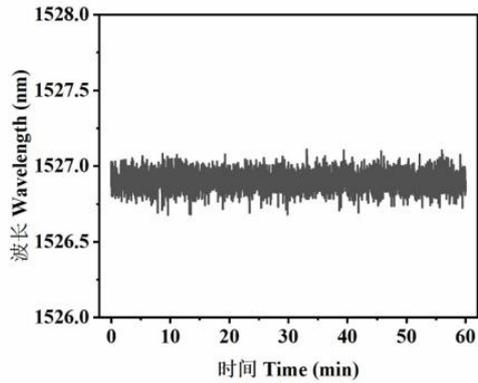


图 12 不同压力下传感器的输出光谱

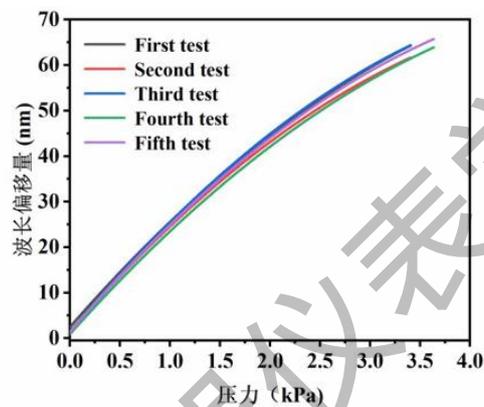


图 13 传感器多次重复性曲线

参考文献: (如有可补充)

- [1]Wen Z, Guan Z, Dong J, et al. A Review of Sensitivity Enhancement in Interferometer-Based Fiber Sensors [J]. Sensors, 2022, 22(7): 453.
- [2]Li T, Zheng Y, Guo W, et al. Micro-bubble F-P cavity and FBG Cascade Structure-based Pressure Sensor with Temperature Self-compensation For Minimally Invasive Surgery [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2022, 63: 111-118.
- [3]Wang S, Ni X, Li L, et al. Noninvasive Monitoring of Vital Signs Based on Highly Sensitive Fiber Optic Mattress [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 6182-6190.
- [4]Hssasym D, Jimenze J, Burack M A, et al. Dyskinesia estimation during activities of daily living using wearable motion sensors and deep recurrent networks [J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 7865.
- [5]Gong S, Schwalb W, Wang Y, et al. A wearable and highly sensitive pressure sensor with

- ultrathin gold nanowires [J]. *Nat Commun*, 2014, 5: 3132.
- [6]Aime L J, Kissinger T, James S W, et al. High sensitivity pressure measurement using optical fibre sensors mounted on a composite diaphragm [J]. *Opt Express*, 2021, 29(3): 4105-4123.
- [7]Kolli R, Bahaddur I, Basavaprasad D, et al. A high Q-factor photonic crystal microring-resonator based pressure sensor [J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2021, 43: 300-304.
- [8]Reja I, Nguyen L V, Peng L, et al. Temperature-Compensated Interferometric High-Temperature Pressure Sensor Using a Pure Silica Microstructured Optical Fiber [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-12.
- [9]Jablan M, Buljan H, Soljagic M. Plasmonics in graphene at infrared frequencies [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(24): 1226-1238.
- [10]Bludov V, Vasilevs M I, Perheps R. Tunable graphene-based polarizer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(8): 1556-1578 .
- [11]Liu B, Yu W, Yan Z, et al. Ultra-narrowband light absorption enhancement of monolayer graphene from waveguide mode [J]. *Opt Express*, 2020, 28(17): 24908-24917.
- [12]Zhang Z, Yang J, He X, et al. Tunable plasmon-induced transparency and slow light in terahertz chipscale semiconductor plasmonic waveguides [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(31): 184-192.
- [13]Choi H, Choi J S, Kim J S, et al. Flexible and transparent gas molecule sensor integrated with sensing and heating graphene layers [J]. *Small*, 2014, 10(18): 3685-3691.