

# 基于石墨烯膜的微小管道内压力测量方法研究

贾璇, 王清杨, 史慧超\*

北京化工大学信息科学与技术学院, 北京

收稿日期: 2026年5月20日; 录用日期: 2026年6月21日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

文章针对微小管道内流体压力测量问题, 设计了一种基于石墨烯膜的法布里-珀罗(F-P)腔结构的压力测量方法, 并搭建实验平台进行验证。在液体静止条件下开展压力标定实验, 获得了压力与输出电压之间的关系曲线。实验结果表明, 传感器输出信号随压力变化呈周期性特征, 在45~54 kPa范围内具有较好的单调性与近似线性关系, 其中通道1与通道2的线性拟合系数分别达到0.98465和0.99654。随后进行了线性趋势验证实验, 两个通道归一化结果与理论变化趋势基本一致。结果验证了该测量方法在微小管道压力检测中的可行性, 可为石墨烯膜光纤压力传感结构在微尺度流体检测中的应用提供参考。

## 关键词

石墨烯膜, 微流道, 压力测量

# Research on a Pressure Measurement Method for Microchannels Based on a Graphene Membrane

Xuan Jia, Qingyang Wang, Huichao Shi\*

College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing

Received: May 20, 2026; accepted: June 21, 2026; published: June 30, 2026

## Abstract

This study addresses the challenge of fluid pressure measurement inside micro-channels by proposing a Fabry-Pérot (F-P) cavity-based pressure measurement method utilizing a graphene membrane and validates the approach through an experimental platform. Pressure calibration experiments were carried out under static liquid conditions to obtain the relationship between pressure

\*通讯作者。

and output voltage. The experimental results showed that the sensor output signal exhibited periodic characteristics with pressure variation and presented good monotonicity and approximate linearity within the pressure range of 45~54 kPa. The linear fitting coefficients of channel 1 and channel 2 reached 0.98465 and 0.99654, respectively. Subsequently, linear trend verification experiments were conducted, and the normalized results of the two channels were generally consistent with the theoretical variation trend. The results verified the feasibility of the proposed method for pressure measurement in microchannels and provided a reference for the application of graphene membrane optical fiber pressure sensing structures in microscale fluid detection.

## Keywords

Graphene Membrane, Microchannel, Pressure Measurement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着微流控技术、MEMS 技术以及生物医学检测等领域的发展,微小管道内流体参数测量逐渐受到广泛关注[1]。在微流控系统运行过程中,流体压力是反映流动状态的重要参数,其变化会直接影响系统运行稳定性及流体输运特性,因此实现对微小管道内流体压力的准确测量对于微流控系统研究与应用具有重要意义。

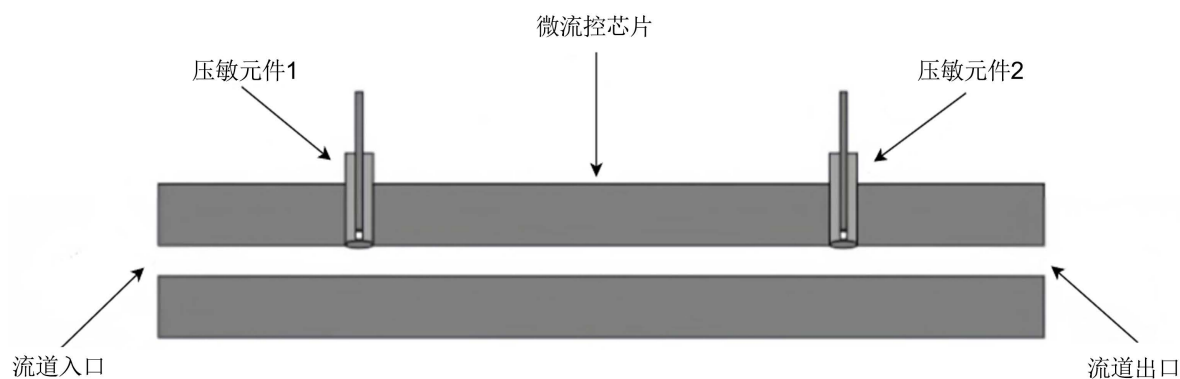
目前常见的压力测量方法主要包括压阻式、电容式以及压电式等[2],但传统宏观压力测量方法在灵敏度、体积以及测量精度等方面难以满足微尺度流体检测需求[3]。近年来,针对微流道的压力测量,研究者们发展出了多种技术路径。基于敏感元件的工作模式,这些方法主要归为四类:薄膜或隔膜法、无膜原位法、无膜侧通道法以及其他方法[4]。薄膜法即微通道中流体的压力会导致微通道壁表面制造的膜发生变形,通过各种压力信号转换元件,可以将膜的挠度量化为压力值[5],本文所采取的就是这种方法。本文提出的基于石墨烯膜 F-P 腔的光学压力测量方法,兼具石墨烯高力学灵敏度和光纤抗干扰的双重优势,在微小管道压力测量中具有良好的应用潜力。

光纤传感技术因具有体积小、抗电磁干扰能力强、灵敏度高以及易于微型化集成等优点,已成为传感器领域的前沿研究重点[6]。其中,基于法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)腔结构的光纤传感器通过腔长变化引起干涉光强变化,实现对外界物理量的检测,具有较好的应用前景。早在 2016 年,高向阳等人就利用石墨烯膜研制了一款光纤法布里-珀罗腔压力传感器[7]。而石墨烯作为一种典型二维材料,具有较高的机械强度、良好的柔性以及对外界载荷变化较为敏感等特点,在微纳传感领域展现出良好的应用潜力[8]。将石墨烯膜与光纤 F-P 腔结构结合为微小管道压力测量提供了一种新的实现方式。

## 2. 测量原理与实验平台

### 2.1. 测量原理

本文采用基于石墨烯膜的法布里-珀罗(F-P)腔结构的压力测量方法实现微小管道内流体压力检测,整体结构如图 1 所示。当流体压力作用于石墨烯膜时,膜片发生微小形变引起腔长变化,从而导致干涉光强发生改变,通过检测输出光信号即可实现微小管道内流体压力测量。



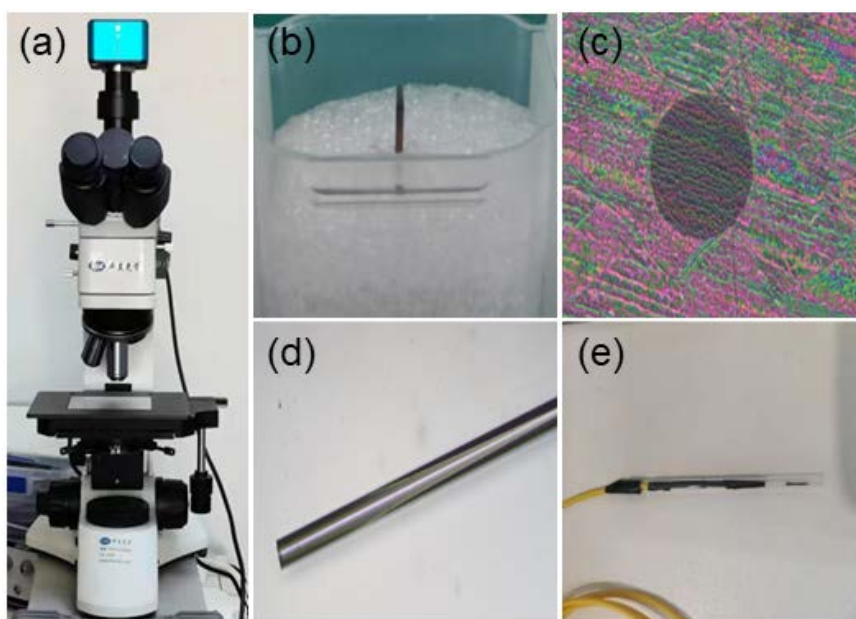
**Figure 1.** Schematic diagram of the overall structure

**图 1.** 整体结构示意图

## 2.2. 压敏结构

本研究中所使用的石墨烯薄膜是采购的 10 层快速转移石墨烯膜样品。首先利用光纤剥线钳对光纤进行剥覆处理，光纤切割刀切割光纤，并采用 75% 酒精对光纤端面进行清洗。将石墨烯膜转移至盛有丙酮溶液的玻璃培养皿中，浸泡约 5 min 以去除 PMMA 涂层。用镊子夹持石英毛细管插芯，将其一端浸入培养血液体内，使石墨烯膜转移吸附于该端面。随后将插芯在 40℃ 的干燥箱内放置 1 小时，干燥后的石墨烯膜通过分子间范德华力稳固地贴合在插芯端面上。

将吸附有石墨烯膜的插芯固定于支架上，处理后的光纤夹持于三维移动平台。通过调节三维移动平台使光纤端面插入石英毛细管插芯另一端适当位置，从而在光纤端面与石墨烯膜之间形成 F-P 腔，利用 AB 胶对裸露光纤与插芯后端进行固定与密封，最终制备得到压力敏感结构。压力敏感结构的制备过程如图 2 所示。



**Figure 2.** Fabrication process of the pressure-sensitive structure: (a) electron microscope; (b) ferrule adsorbed with graphene film; (c) adsorbed graphene film; (d) cleaned fiber end face; (e) pressure-sensitive structure

**图 2.** 压敏结构的制备过程：(a) 电子显微镜，(b) 吸附有石墨烯膜的插芯，(c) 吸附的石墨烯膜，(d) 清洁光纤端面，(e) 压敏结构

### 2.3. 实验平台

实验平台主要由气源、注射泵、样件、三端环形器、激光光源、光电探测模块以及储液管等部分组成(见图 3)。其中, 压力标定实验主要利用气源提供稳定压力, 对传感器输出特性进行测试; 线性趋势验证实验则通过注射泵控制液体流量, 使流体在微流道内产生压力变化。

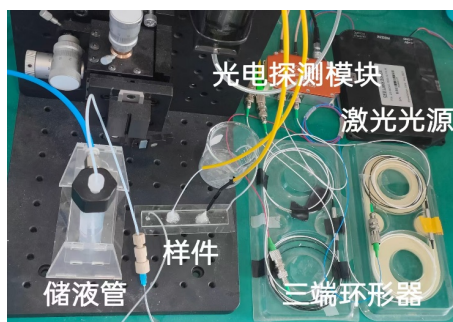


Figure 3. Liquid pressure calibration experimental platform  
图 3. 液体压力标定实验平台

#### 1) 压力发生装置

压力发生装置如图 4 所示, 经由软管连接到被封装的样件上, 向实验系统提供所需的压力环境。具体参数如表 1 所示。

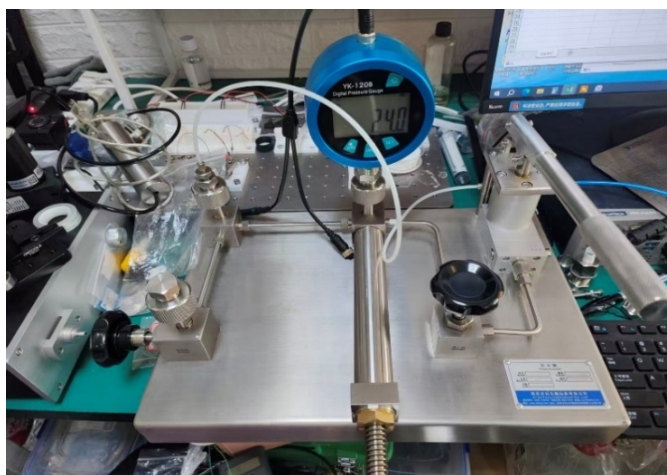


Figure 4. Pressure generation device  
图 4. 压力发生装置

Table 1. Key parameters of the pressure generator

表 1. 压力发生装置的关键参数

项目	关键参数
厂家	西安云仪器仪表有限公司
型号	XY-2002
传压介质	洁净空气
压力范围	(-0.095~6) MPa

## 2) 激光光源

本研究采用如图 5 所示的 1550 nm 分布式反馈(DBF)激光光源作为入射光源，具体参数见表 2。



Figure 5. Laser light source

图 5. 激光光源

Table 2. Key parameters of the laser source

表 2. 激光光源的关键参数

项目	关键参数
尺寸	150 mm × 125 mm × 20 mm
连接头	FA/APC
输出功率	12 mW
线宽	480 kHz
波长	1550 nm

## 3) 三端环形器

本研究选用工作波长为 1550 nm 的光纤环形器(见图 6)，该波长与激光光源的波长一致。具体参数如表 3 所示。

Table 3. Key parameters of the 3-port circulator

表 3. 三端环形器的关键参数

项目	关键参数
光纤类型	SMF-28e
工作波长	1550 nm
线宽	±30 nm
最大插入损耗	Port1-Port2: 0.8 dB Port2-Port3: 0.8 dB
最大偏振相关损耗	0.15 dB
最小回波损耗	50 dB
最小隔离度	Port2-Port1: 40 dB Port3-Port2: 40 dB

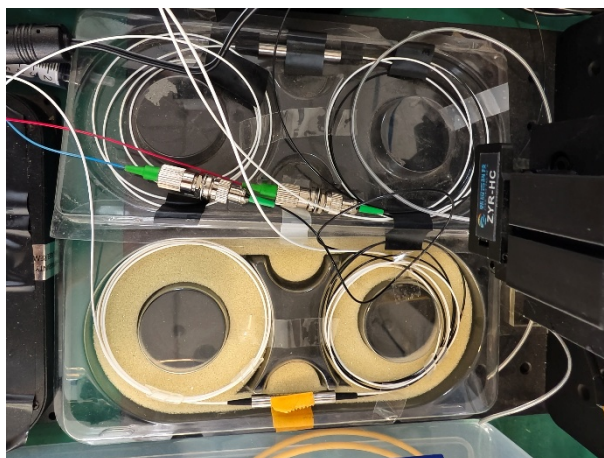


Figure 6. 3-port circulator  
图 6. 三端环形器

### 3. 液体压力标定实验

#### 3.1. 实验步骤

实验前完成各装置之间的连接,并检查实验系统运行状态。在气源输出压力为 0 kPa 的条件下,记录通道 1 与通道 2 的初始输出电压值,作为后续数据处理的基准值。依据  $3\ \mu\text{L}/\text{min}\sim 10\ \mu\text{L}/\text{min}$  范围内各流量点理论计算得到的压力值,对气源输出压力进行调节。待系统稳定且流道内液体处于静止状态后,采集两个通道的输出信号。在每个压力点下分别记录通道 1 与通道 2 对应的输出电压值,并对每组数据重复测量 3 次,以减小随机误差,提高实验结果可靠性。

#### 3.2. 实验结果分析

对采集的数据进行整理与分析,以 0 kPa 对应的输出值作为基准,对各压力点数据进行统一基准处理,分别建立通道 1 和通道 2 的压力 - 电压(光强)关系曲线,如图 7 和图 8 所示。

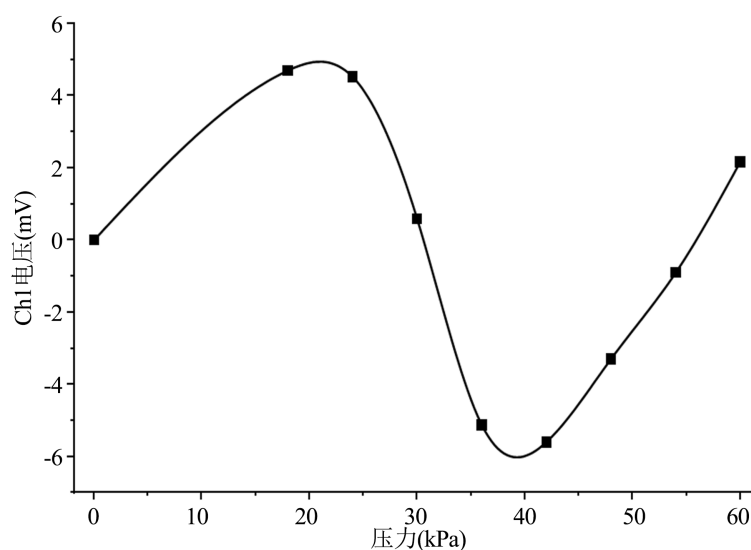


Figure 7. Pressure-voltage curve of Channel 1  
图 7. 通道 1 压力 - 电压关系

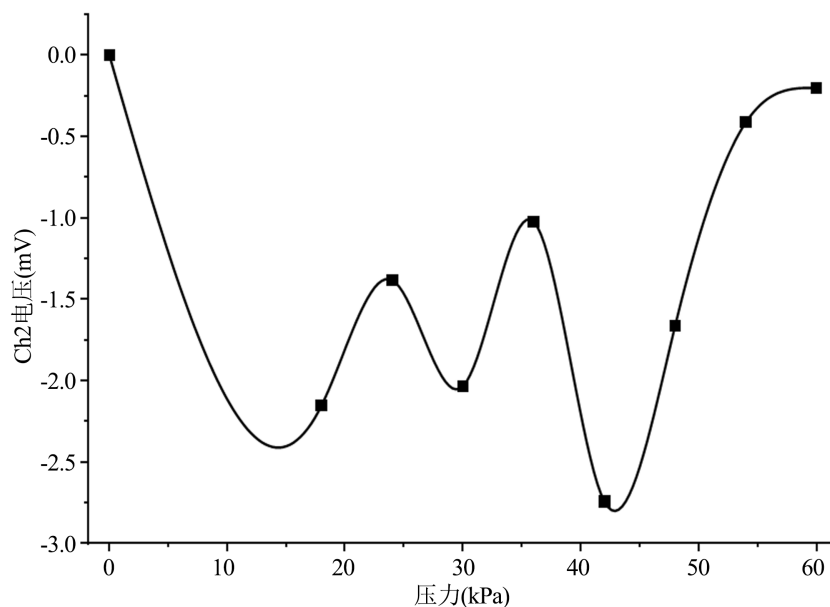


Figure 8. Pressure-voltage curve of Channel 2

图 8. 通道 2 压力 - 电压关系

根据实验结果可知, 在不同压力作用下两通道输出信号均呈现出明显的周期性变化特征, 整体表现为类正弦波形, 这是由于法布里 - 珀罗干涉效应导致光强随腔长变化呈周期性变化。为实现传感器的定量标定, 需要在曲线中选取局部近似线性的区间进行分析。

### 3.3. 线性区间选取实验

根据 3.2 得到的全量程压力 - 电压关系曲线, 选取 45 kPa~54 kPa 为线性工作区间, 在这一范围内选取 4 个压力点进行实验, 步骤与 3.1 类似, 根据数据绘制出图 9 和图 10:

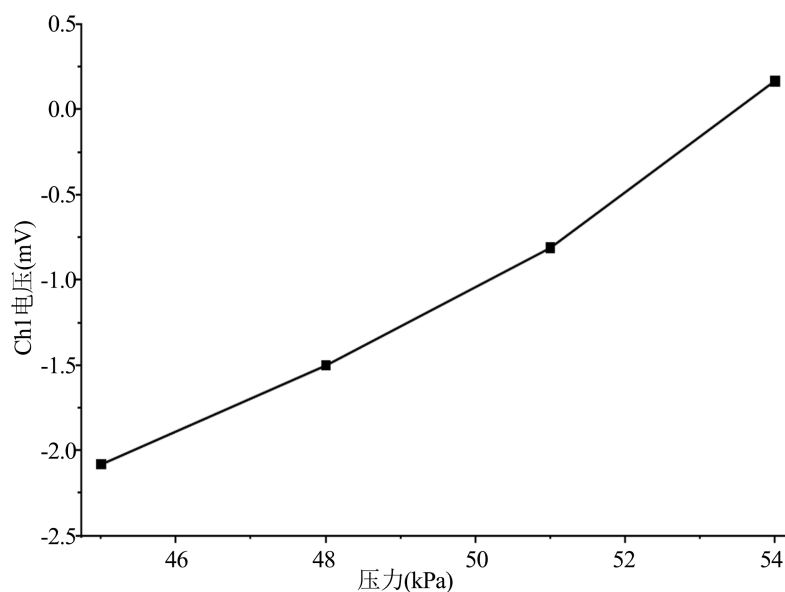
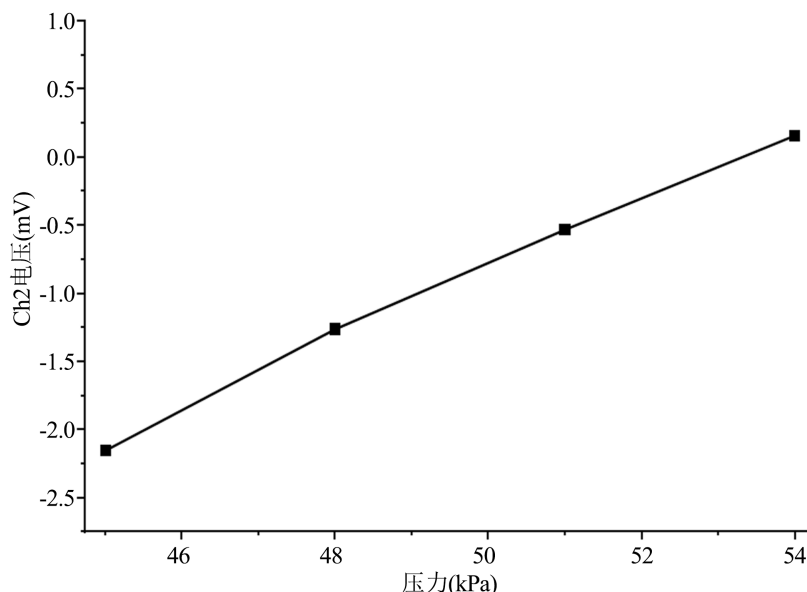


Figure 9. Pressure-voltage relationship of Channel 1 within the linear range

图 9. 线性区间内通道 1 压力-电压关系



**Figure 10.** Pressure-voltage relationship of Channel 2 within the linear range  
**图 10.** 线性区间内通道 2 压力 - 电压关系

处理压力与电压数据，对通道 1 数据进行线性拟合分析，可得到压力值与电压值的对应关系：

$$V = 0.25P - 13.29 \quad (R^2 = 0.98465) \quad (1)$$

反解得到

$$P = 4.00V + 53.16 \quad (2)$$

通道 2 同理得：

$$V = 0.26P - 13.62 \quad (R^2 = 0.99654) \quad (3)$$

反解得到

$$P = 3.85V + 52.38 \quad (4)$$

线性拟合结果表明，通道 1 与通道 2 的灵敏度分别为 0.25 mV/kPa 和 0.26 mV/kPa，线性拟合相关系数分别为 0.98465 和 0.99654，表明传感器在 45~54 kPa 范围内具有较好的灵敏度与线性响应特性，输出信号随压力增加呈单调变化，能够较好反映压力变化规律。

#### 4. 线性趋势验证实验

通过注射泵对流体进行精确推进，在选定的线性工作区间内设置流量为 7.5、8.5 和 10  $\mu\text{L}/\text{min}$ ，对应采集各工况下传感器的输出电压信号，每一流量点重复测量多次并取平均值，得到图 11 与图 12。

由此结果可知，在所选流量范围内，通道 1 与通道 2 的输出电压均随流量增加呈现出单调变化趋势。该变化规律与前述线性区间内压力 - 电压关系的变化趋势一致，说明实验结果符合所选线性区间的变化趋势，从而进一步验证了线性区间选取的合理性与有效性。

为进一步验证标定结果的准确性，根据图 9、图 10 所建立的线性标定关系，将通道 1、通道 2 的输出电压换算为测量压力值，选取两个取压点中点位置的理论压力值作为参考值，采用最大绝对值归一化方法对各列数据分别进行处理，将各列的最大值映射为 1，从而更加直观地比较不同曲线随流量变化的趋势。

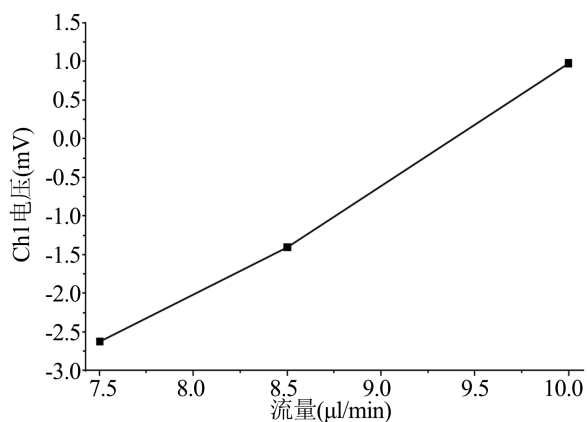


Figure 11. Flow rate-voltage diagram of Channel 1

图 11. 通道 1 流量 - 电压关系图

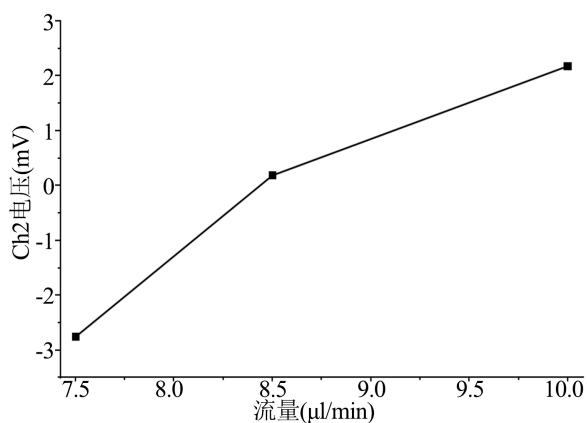


Figure 12. Flow rate-voltage diagram of Channel 2

图 12. 通道 2 流量 - 电压关系图

由图 13 可以看出, 随着流量增加, 归一化后的理论值以及两个通道测量值整体均呈上升趋势, 说明传感器输出能够较好地反映流量变化引起的压力变化规律。整体来看, 实验结果与理论结果变化方向基本一致。

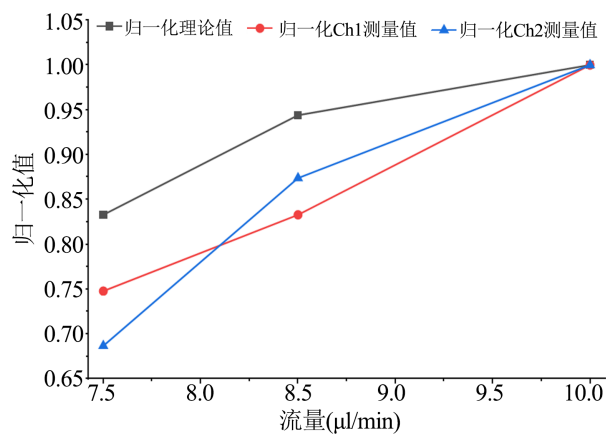


Figure 13. Comparison of normalized theoretical and measured pressure variation trends

图 13. 归一化后理论压力与测量压力变化趋势对比

## 5. 结论

本文提出了一种基于石墨烯膜 F-P 腔结构的微小管道压力测量方法, 并搭建实验平台进行了实验验证。通过压力标定实验获得了压力与输出电压之间的关系曲线, 结果表明传感器输出信号随压力变化呈现周期性特征, 在局部区间内具有较好的单调性与近似线性关系。选取 45~54 kPa 范围作为线性工作区间后, 对实验结果进行了线性趋势验证, 归一化结果与理论变化趋势基本一致, 验证了该测量方法在微小管道压力检测中的可行性, 可为微流控系统压力测量提供一定参考。

## 参考文献

- [1] Saxena, A., Kakde, B. and Mishra, A.K. (2025) Examining the Sensing Technology in Microfluidic Sensors with Material for Various Microfluidic Applications: A Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, **18**, 885-902. <https://doi.org/10.2174/0123520965285419240313040515>
- [2] Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., *et al.* (2023) Advances in High-Performance MEMS Pressure Sensors: Design, Fabrication, and Packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, **9**, Article No. 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>
- [3] Xu, T., Cao, X., Tao, Z., Li, H. and Zhai, Y. (2025) A Sensitivity Enhancement Strategy for Capacitive Pressure Sensors Embedded in Microchannels via Reference Pressure Control. *IEEE Sensors Journal*, **25**, 30496-30506. <https://doi.org/10.1109/jsen.2025.3586687>
- [4] 杨启胜. 基于 T 型微通道压强传感器的液滴生成及其应用实验[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [5] Shen, F., Ai, M., Li, Z., Lu, X., Pang, Y. and Liu, Z. (2021) Pressure Measurement Methods in Microchannels: Advances and Applications. *Microfluidics and Nanofluidics*, **25**, Article No. 39. <https://doi.org/10.1007/s10404-021-02435-w>
- [6] Wang, Y., Chen, B., Wu, G., Xue, C. and Gao, L. (2025) Fiber-Optic Pressure Sensors: Recent Advances in Sensing Mechanisms, Fabrication Technologies, and Multidisciplinary Applications. *Sensors*, **25**, Article 6336. <https://doi.org/10.3390/s25206336>
- [7] 高向阳, 李成, 樊尚春, 等. 石墨烯膜光纤压力传感器线性输出特性分析[C]//全国敏感元件与传感器学术团体联合组织委员会. 第十四届全国敏感元件与传感器学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 2016: 385-388.
- [8] Singh, H., Budiarto, H.A., Singh, B., Kumar, K., Gupta, R., Bhowmik, A., *et al.* (2025) Graphene for Next-Generation Technologies: Advances in Properties, Applications, and Industrial Integration. *Results in Engineering*, **27**, Article ID: 106865. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106865>