

UV胶封装FBG的横向受力判别研究

侯晓敏, 廖帮全*, 李航驹, 贺克勉

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

针对横向受力检测需求, 提出一种基于UV胶封装的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)横向受力识别方法。通过设计聚合物封装结构以改善应变传递性能, 搭建FBG横向受力实验系统, 并利用Java语言开发自动化数据处理程序。该程序基于预设阈值对光功率变化量进行判别, 从而实现对FBG受力状态的准确识别。实验结果表明, 在5 kg横向载荷作用下, FBG中心波长处的光功率变化量为1.784 dBm, 超过1 dBm的判别阈值, 系统能够准确输出受力判定结果。该研究为FBG横向受力检测提供了一种有效的实验方法。

关键词

横向受力, UV胶, 光纤布拉格光栅, 判别

Research on Lateral Stress Identification of FBG Encapsulated in UV Adhesive

Xiaomin Hou, Bangquan Liao*, Hangju Li, Kemian He

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: April 25, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

To address the need for lateral stress detection, this study proposes a method for identifying lateral stress in a fiber Bragg grating (FBG) based on UV adhesive encapsulation. By designing a polymer encapsulation structure to improve strain transfer performance, a lateral stress testing system for the FBG was established, and an automated data processing program was developed using Java. This program identifies changes in optical power based on preset thresholds, thereby enabling accurate identification of the stress state of the FBG. Experimental results show that under a lateral load of 5

*通讯作者。

文章引用: 侯晓敏, 廖帮全, 李航驹, 贺克勉. UV胶封装FBG的横向受力判别研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(3): 520-526. DOI: 10.12677/jsta.2026.143052

kg, the change in optical power at the center wavelength of the FBG is 1.784 dBm, exceeding the detection threshold of 1 dBm, and the system is capable of accurately outputting the stress detection results. This study provides an effective experimental method for FBG lateral stress detection.

Keywords

Lateral Stress, UV Adhesive, Fiber Bragg Grating, Identification

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

光纤传感器因其结构紧凑、灵敏度高、抗电磁干扰、环境适应性强等优点,已在多个技术领域得到广泛应用[1]。作为其中一类重要的光学传感元件,FBG通过检测波长偏移实现对应变的响应,主要用于温度、轴向应变等参数的测量[2]。然而,FBG对横向压力的响应特性与识别方法仍有待深入研究。

2004年,Ngoi等人将FBG嵌入硅橡胶圆柱封装,显著提升了横向压力响应能力[3]。2006年,吴飞等人发现FBG中间段受压时反射峰呈线性、周期性分裂[4];同年,李晓红与戴恩光的研究表明聚合物棒封装可有效抑制双折射效应,改善反射谱展宽与峰分裂现象[5]。2008年,Huang等人研究了不同比例聚合物与硅胶密封剂涂覆对FBG压力传感器灵敏度的影响[6]。2013年,Liu等人提出了高灵敏度横向压力传感器,通过将径向压力转换为轴向应变实现布拉格波长漂移,灵敏度较裸FBG大幅提升[7]。2019年,Sun等人研究了保偏光纤光栅在横向压力作用下的光谱特性,结果表明横向压力会改变保偏光纤的双折射轴及快慢轴的有效折射率,从而引起光谱频移[8]。同年,王彦等人开发了可同步感知温度与压力的FBG柔性传感器,在静态与动态测试中表现出良好的响应特性[9]。2021年,张燕君等人通过毛细铜管嵌套提升了传感器的应力灵敏度与测量精度[10]。2022年,季春波等人采用Python编写程序,通过读取光谱仪数据并与预设阈值比较,实现了对裸光栅受力状态的自动判断[11]。2023年,Zhang等人基于Sagnac环级联FBG结构,通过有限元仿真与实验分析了保偏光纤在横向压力作用下的双折射效应,结果表明级联FBG后灵敏度提高了45.1%[12]。2024年,Abeywardena等人通过将FBG嵌入聚合物层将横向载荷转换为轴向应变,开发了高灵敏度FBG接触压力传感器,灵敏度可达裸FBG的约270倍[13]。2025年,沈志辉等人设计了柔性树脂封装的FBG传感器,实验结果表明其载荷与温度灵敏度均优于其他封装材料[14]。基于上述研究,本文提出一种UV胶封装FBG的横向受力检测方法,并开发了基于Java的受力识别程序,通过检测中心波长处透射光功率的变化判断受力状态,为地铁站台安全线区域的人员站立检测、博物馆重点区域的入侵预警等需判断横向受力是否发生的场景,提供了一种新的技术方案。

2. FBG 横向应变传感原理

根据光纤耦合模理论,FBG的中心波长可表示为[15]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

其中, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。式(1)即为布拉格条件,它表明宽带光在均匀FBG中传输时,只有满足该条件的特定波长光会被反射,其余波长则继续透射,这是FBG实现传感的基本原理。由该式可知,FBG的中心波长由光栅周期与有效折射率共同决定。当外界物理量如应力、温度等发生变化时,会引起两者改变,从而导致布拉格波长漂移。为简化分析,本文假设温度恒定且光栅结构均匀,仅

考虑横向压力对 FBG 响应的影响。

FBG 轴向及横截面受力情况如图 1 所示, 定义 y 方向为横向受力方向, x 为纵向, z 为轴向。当长度为 h 的光纤光栅在某一区段承受均匀横向压力 F 时, 其受力状态可等效为三个串联的子光栅模型, 中间段 h_2 为受压力区域长度, 两端 h_1 和 h_3 为无应力区域长度。

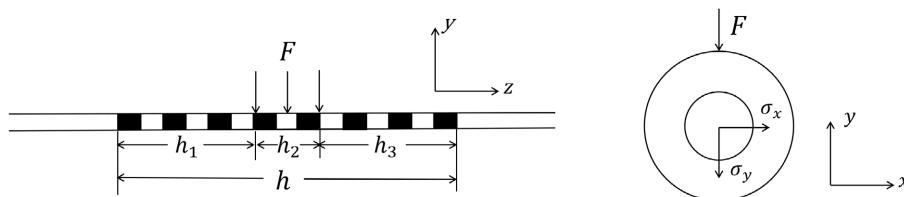


Figure 1. FBG lateral force schematic diagram: axial and cross-sectional view

图 1. FBG 横向受力示意图: 轴向和横截面

由于光栅长度远大于包层直径, 光纤受横向载荷引起的变形可视为平面变形, 即轴向应变 $\varepsilon_z = 0$ 。因此, FBG 各方向上的应力可表示为[16]:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{2F}{\pi h_2 D} \\ \sigma_y = -\frac{6F}{\pi h_2 D} \\ \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (2)$$

其中, D 表示光纤直径, ν 为泊松系数。

当 FBG 受到横向局部压力时, x 、 y 方向应力分布不一致, 即 $\sigma_x \neq \sigma_y$, 这种差异使两方向的有效折射率发生非对称变化, 从而产生应力双折射。折射率变化与应力之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} (\Delta n_{eff})_x = -\frac{n_{eff}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1-\nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_y + \sigma_z) \} \\ (\Delta n_{eff})_y = -\frac{n_{eff}^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1-\nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_x + \sigma_z) \} \end{cases} \quad (3)$$

式中, E 为杨氏模量, p_{11} 与 p_{12} 为光弹系数。联立公式(1)和(3), 可得 FBG 在两个正交偏振方向的中心波长变化为:

$$\begin{cases} \Delta \lambda_x = -\frac{n_{eff}^3 \Lambda}{E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1-\nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_y + \sigma_z) \} \\ \Delta \lambda_y = -\frac{n_{eff}^3 \Lambda}{E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1-\nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_x + \sigma_z) \} \end{cases} \quad (4)$$

由于 $\sigma_x \neq \sigma_y$, 根据公式(4), 可得 $\Delta \lambda_x \neq \Delta \lambda_y$, 即 FBG 在两个偏振方向对应的布拉格波长不再一致。因此, 在横向压力作用下, FBG 中产生的应力双折射效应会导致布拉格波长沿两个偏振方向发生分裂, 从而使光谱展宽并呈现双峰结构。

3. 实验方案

3.1. 横向压力传感器封装

本文采用紫外线(Ultraviolet Rays, UV)固化胶对 FBG 进行封装, 以构建适用于横向压力检测的传感

器。UV 胶作为一种光敏聚合物，在特定波长紫外光照射下可快速固化，具有透明度高、粘接强度高、耐老化和固化收缩率小等特点，适用于光纤传感器的精密封装与保护。

封装好的 FBG 横向压力传感器结构平面图如图 2 所示，其整体尺寸为 20 mm × 10 mm × 1 mm。由于光纤涂覆层厚度远小于封装层整体尺寸，故在以下研究中忽略不计。为改善应变传递效果并保护光栅，将 FBG 埋置于封装结构深度方向的中性面位置，即距表面 0.5 mm 处。为便于 FBG 的准确定位与固定，封装过程中先将 FBG 放置在两层厚度均为 0.5 mm 的硅胶模具之间，并在光纤上施加适当的预应力，以消除封装过程中的松弛效应并提升传感器的线性响应特性。随后，在模具中填充 UV 胶，确保胶体完全覆盖 FBG 及周边区域，最后通过紫外灯照射使胶体固化成型。该封装方式在保证应变有效传递的同时，增强了传感器的机械稳定性和环境适应性。

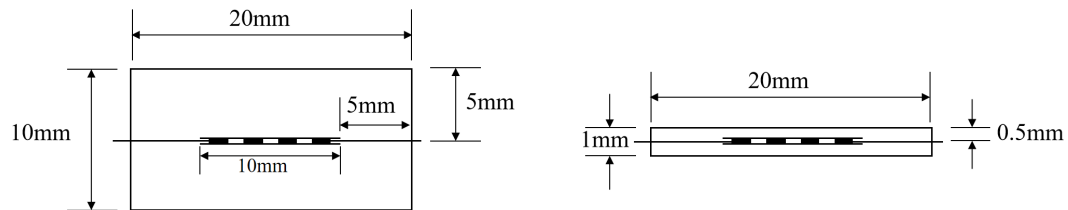


Figure 2. Schematic diagram of FBG sensor packaging structure: top view and side view
图 2. FBG 传感器封装结构示意图：俯视图和侧视图

为在 UV 胶封装的小型长方体传感器的局部横向区域施加压力，设计了如图 3 所示的加载结构。该装置采用三个与传感器材料、尺寸相同的 UV 胶块作为平衡支撑，在垂直于 FBG 的方向上平行放置两根宽度为 3 mm 的亚克力棒，以实现压力的局部平衡传递，其中一根亚克力棒位于光栅正上方用于施加荷载，另一根用于保持结构整体平衡。传感器与平衡胶块放置于光滑平整的铝板上，上方覆盖另一铝板作为加压板，通过在其上施加重物来实现横向加载。基于该结构，FBG 所受横向力可等效为亚克力棒、铝板及重物总重力的 1/4，该设计有助于实现载荷沿光栅横向方向的均匀传递，并减少了非对称加载引起的测量误差。

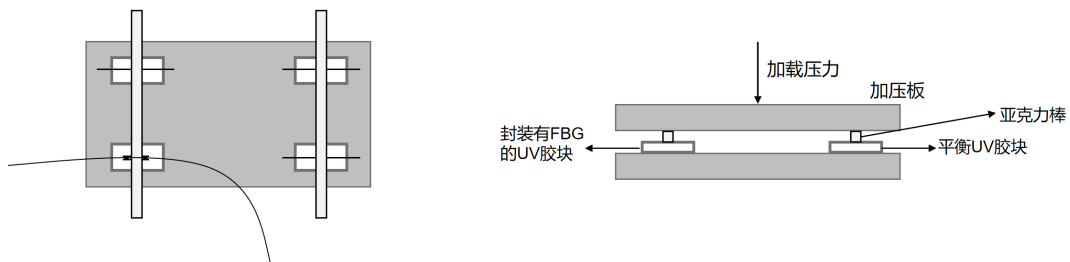


Figure 3. Schematic diagram of FBG transversely locally loaded structure: top view and side view
图 3. FBG 横向局部受力加载结构示意图：俯视图和侧视图

3.2. 横向压力传感实验

FBG 横向受力实验系统如图 4 所示。宽带光源(Amplified Spontaneous Emission, ASE, 波长范围 1525 nm~1610 nm)发出的光经过 FBG，进入光谱分析仪(OSA, 日本横河 AQ6370D, 检测范围 600 nm~1700 nm, 最大分辨率 0.02 nm)。实验使用 OSA 来监测传感器在横向压力作用下的透射光谱变化，并提取布拉格波长与光功率数据。所用 FBG 的中心波长为 1535 nm，光栅栅区长度为 10 mm，带宽为 0.2 nm，横向局部压力施加于光栅的中心位置。

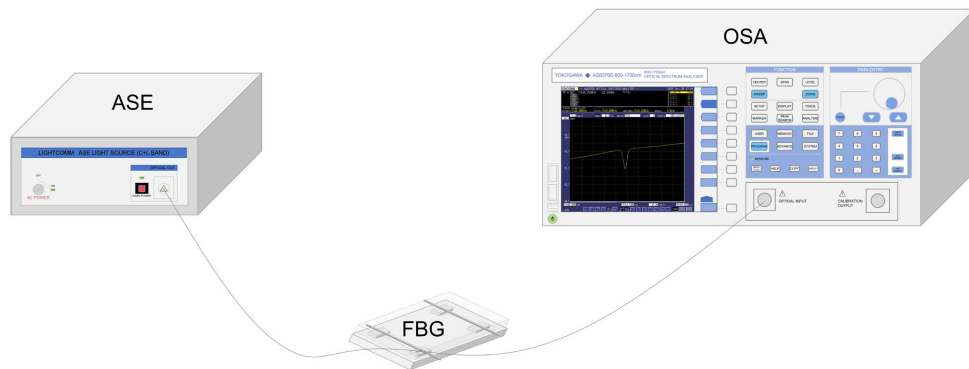


Figure 4. Diagram of FBG transverse stress testing system
图 4. FBG 横向受力实验系统图

在室温且无横向压力作用下, 该 FBG 的中心波长为 1533.68 nm, 较封装前发生一定偏移, 这可能与封装过程中施加的预应力、UV 胶固化收缩不均匀或温度变化等因素有关。与封装前的透射光谱相比, 封装后的整体谱形及波谷深度基本保持一致, 表明封装处理未对传感器的主要光谱特性产生明显影响。

当 FBG 受到 5 kg 重物施加的横向局部压力时, 其透射光谱形态及中心波长处的光功率会发生相应改变。为直观对比受力前后的光谱变化, 本文借助 Origin 软件对受力与未受力状态下的透射光谱进行了对比分析, 如图 5 所示。由图可知, 受力后 FBG 的透射光谱发生展宽、分裂, 且中心波长处的光功率明显变大。

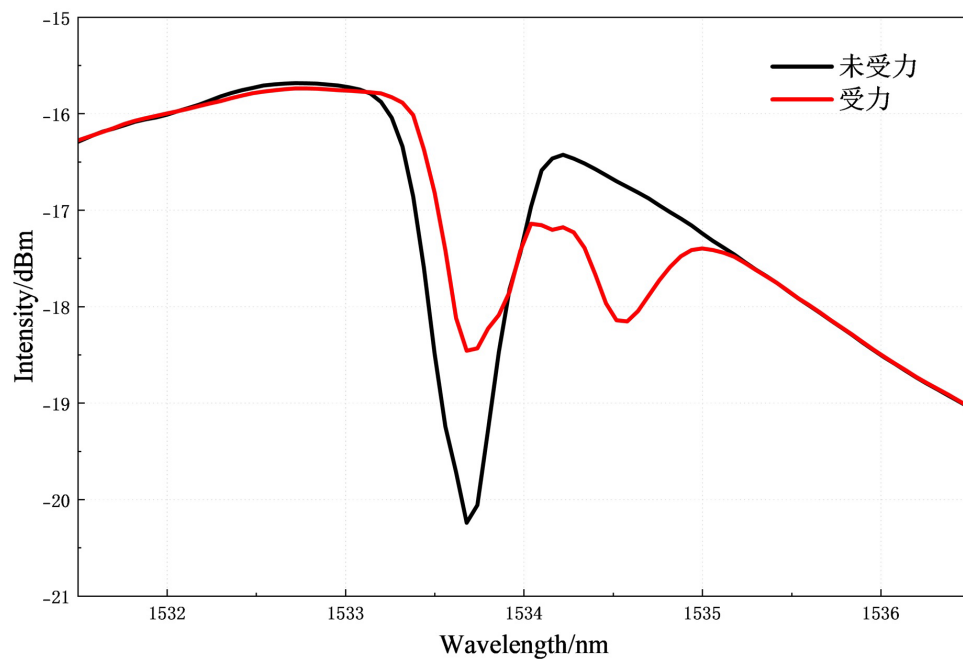


Figure 5. Spectral contrast diagram of any single grating under stress versus all gratings being unstressed
图 5. 光栅受力与未受力时的光谱对比图

基于上述光谱变化特征, 本文进一步开发了自动化识别程序, 以实现 FBG 受力状态的智能判别。该程序依据图 6 所示的算法流程, 读取未受力与受力状态下的光谱数据, 初始化 FBG 的中心波长等参数, 并计算光功率变化量。若变化量超过预设阈值 1 dBm, 则判定为受力, 否则判定为未受力。该阈值

依据 5 kg 横向载荷下的实测结果设定。在该载荷作用下, FBG 中心波长处的光功率变化量为 1.784 dBm, 将该数值取整后确定阈值为 1 dBm。需要说明的是, 该阈值仅适用于本实验的特定传感器及加载条件, 不同条件下需重新确定。

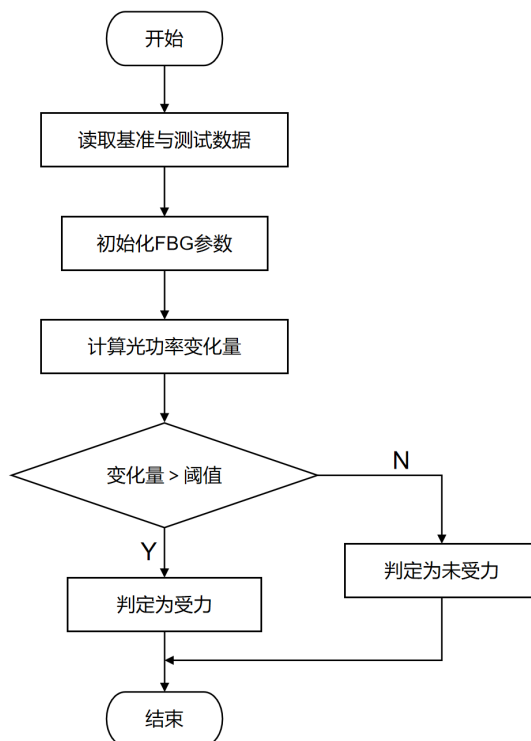


Figure 6. Flowchart for automatic identification of FBG stress state
图 6. FBG 受力状态自动判别流程图

程序采用 Java 语言在 IntelliJ IDEA 环境中实现, 以便于未来与基于 Java 架构的现有工业监控平台集成。运行结果如表 1 所示, 实测光功率差值超过设定阈值, 程序判定为受力。该结果与实际施加横向压力的操作情况一致, 验证了基于阈值判别的自动化识别方法的准确性与可靠性。

Table 1. Results of the grating force identification program
表 1. 光栅受力识别程序运行结果

中心波长/nm	未受力光功率/dBm	受力光功率/dBm	差值/dBm	状态
1533.68	-20.243	-18.459	1.784	受力

与传统基于波长漂移量的精确测量方法相比, 本方法成本更低、响应更快, 但仅能输出受力和未受力两种状态, 无法提供连续应力值。

4. 总结

本文系统研究了 UV 胶封装 FBG 的横向受力传感特性, 并采用基于光功率变化量阈值判别的受力识别方法, 构建了 FBG 横向受力实验系统, 开发了基于 Java 的自动化数据处理程序。实验结果表明, 在 5 kg 横向载荷作用下, FBG 中心波长处的光功率变化量为 1.784 dBm, 超过预设的 1 dBm 判别阈值。系统能够准确判别 FBG 的受力状态, 识别结果与实际受力情况一致, 验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Alhussein, A.N.D., Qaid, M.R.T.M., Agliullin, T., Valeev, B., Morozov, O. and Sakhabutdinov, A. (2025) Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies. *Sensors*, **25**, Article 2289. <https://doi.org/10.3390/s25072289>
- [2] Zhao, X., Wei, C., Zeng, L., Sun, L., Li, Z., Chen, H., *et al.* (2024) Research Progress in Fiber Bragg Grating-Based Ocean Temperature and Depth Sensors. *Sensors*, **25**, Article 183. <https://doi.org/10.3390/s25010183>
- [3] Ngoi, B.K.A., Paul, J., Zhao, L.P. and Fang, Z.P. (2004) Enhanced Lateral Pressure Tuning of Fiber Bragg Gratings by Polymer Packaging. *Optics Communications*, **242**, 425-430. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.08.032>
- [4] 吴飞, 李立新, 李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. 中国激光, 2006(4): 472-476.
- [5] 李晓红, 戴恩光. 聚合物封装 FBG 侧向压力敏感机理的研究[J]. 红外与激光工程, 2006(S5): 209-212.
- [6] Huang, H. and Liang, T. (2008) The Fabrication and Analysis of Lateral Pressure Fiber Sensor Based on Fiber Bragg Grating. *Microwave and Optical Technology Letters*, **50**, 2535-2537. <https://doi.org/10.1002/mop.23761>
- [7] Liu, W. (2013) Fiber Sensors Based on Fiber Gratings. 2013 *6th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, Hsinchu, 6-9 July 2013, 118-119. <https://doi.org/10.1109/icaait.2013.6621525>
- [8] Sun, Y., Yang, G., Cao, F., Chen, C. and Liu, K. (2019) Study on Spectral Characteristics of Polarization Maintaining Fiber Bragg Grating under Lateral Pressure. *Third International Conference on Photonics and Optical Engineering*, Xi'an, 5-8 December 2018, 1105208. <https://doi.org/10.1117/12.2520258>
- [9] 王彦, 秦楠, 刘吉虹, 等. 基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 93-98.
- [10] 张燕君, 高海川, 张龙图, 等. 毛细铜管封装的内嵌式镀金光纤布拉格光栅温度和应力传感器[J]. 光电工程, 2021, 48(3): 59-69.
- [11] 季春波, 廖帮全, 高鹏, 等. 单根光纤布拉格光栅横向受力自动判断研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(2): 163-168.
- [12] Zhang, Y., Bao, W., Zhu, X., Jiang, S., Yang, P. and Wu, G. (2023) Research on Lateral Pressure Sensing Based on Sagnac Ring Cascaded FBG. *Optical Fiber Technology*, **80**, Article ID: 103423. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103423>
- [13] Abeywardena, C.L., Zhang, Q., Korposh, S., Morgan, S.P., Bull, S. and Correia, R. (2024) Highly Sensitive Optical Fibre Bragg Grating Contact Pressure Sensor Embedded in a Polymer Layer: Modelling and Experimental Validation. *Results in Optics*, **14**, Article ID: 100604. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2024.100604>
- [14] 沈志辉, 徐一鸣, 陆观. 基于新型工业树脂的 FBG 柔性传感器[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 903-911.
- [15] 聂鹏程, 余先伦, 刘嘉伟, 等. 切趾函数光纤布拉格光栅的光谱特性研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(4): 114-118.
- [16] Xiong, J., Zhang, W., Song, Y., Wen, K., Zhou, Y., Chen, G., *et al.* (2023) Spectral Splitting Sensing Using Optical Fiber Bragg Grating for Spacecraft Lateral Stress Health Monitoring. *Applied Sciences*, **13**, Article 4161. <https://doi.org/10.3390/app13074161>