光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024042901

基于 FBG 的高温压力传感器设计与校准

张白莉[1*]，高震森[2,3]，郭红英[1]

（1. 忻州师范学院 电子系，山西 忻州 034000；2. 广东工业大学 信息工程学院，广州 510006；
3. 通感融合光子技术教育部重点实验室，广州 510006）

摘　要： 针对弹药热安全检测中压力检测的需求，设计了一种基于光纤光栅的高温压力传感器。通过深入研究传感构型的弹性形变对光纤光栅输出信号波长的影响和作用机制，设计了传感器封装模型结构，并对其内部参数进行了优化设计。应用有限元建立了传感器封装结构的三维立体模型，通过对模型施加 10 MPa 载荷，实现了模型的受压仿真，仿真结果验证了传感器压力转换结构设计的合理性。同时以薄板小挠度变形理论为基础，计算出传感器的理论压力灵敏度，设计了传感器的温度补偿方式，进行了不同温度环境下的压力校准实验，得出了传感器在不同温度的压力灵敏度变化趋势，证明了该传感器在 100～450 ℃环境压力测量以及温度补偿方法的有效性。

关键词： 光纤光栅；高温压力传感器；结构设计；弹性膜片；温度补偿

中图分类号： TN253；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0562－07

Design and Experimental Test of High Temperature Pressure Sensor Based on FBG

ZHANG Baili[1], GAO Zhensen[2,3], GUO Hongying[1]

(1. Department of Electronics, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, CHN;
2. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, CHN; 3. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Communication and Sensing, Ministry of Education, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: In this paper, a kind of high temperature pressure sensor based on fiber grating (FBG) is designed to meet the demand of pressure detection. Through analysis and comparison, suitable packaging materials and grating coating layers were selected, structural parameters were designed, and a three-dimensional model of the sensor packaging structure was established by finite element method (Ansys Workbench). The simulation of the model was realized by applying load. The simulation results verify the rationality of the design of the pressure transfer structure of the sensor. At the same time, based on the small deflection deformation theory of thin plate, the pressure sensitivity of the sensor is calculated, the temperature compensation method of the sensor is designed, the pressure and temperature calibration experiments are carried out, the pressure sensitivity of the sensor at different temperatures is analyzed, and the effectiveness of the sensor pressure measurement and temperature compensation method at 100～450 ℃ is proved.

Key words: fiber grating; high temperature pressure sensor; structure design; elastic diaphragm; temperature compensation

收稿日期：2024－04－29.

基金项目：国家自然科学基金项目(62375055)；山西省高等学校教学改革创新项目(J2021573)；山西省忻州市科技局项目(20220507).

* **通信作者：**张白莉

0 引言

高温压力检测在石油化工、电力工业、航天探索、汽车制造、材料科学、地质勘探等领域存在大量需求[1-3]。常见的压电传感器由于其电学工作原理和材料特性的局限性，无法在长期高压、高温、化学腐蚀强、电磁干扰等恶劣环境下持续精确测量[4-5]。光纤光栅(FBG)传感技术在高电压、强电磁干扰、易燃易爆的工作环境仍然能保证正常工作[6-8]，适应性强，易于组网，加以不同的封装后能对温度、应变、位移、压力、深度等物理量远距离监测，同时兼具稳定性好、精度高、信号传输距离远等优点，得到了广泛应用[9-11]。

近年来不少研究者为提高光栅传感器的检测性能，提出了很多关于结构原理仿真、制造工艺等的改进、优化方案。2020 年美国橡树岭国家实验室的 Lukens 等对光纤传感器添加一定的封装设计后，用于测量稳态波形和宽带瞬态的波形，实现了对电网的有效监测[7]。2021 年西安交通大学王雅纯等[12]提出一种光纤光栅触觉力传感器，可安装于假手指尖，实现触觉力检测。2022 年，华北电力大学华子明等[13]设计了一种基于光纤光栅的薄壁圆筒式传感器，对压敏光栅和温补光栅进行不同材料的封装，实现了液体温度与压力的同时精准检测。同年，潘越等[14]提出了一种悬臂梁截面可变结构的光栅压力传感器，通过有限元仿真验证了传感器结构的合理性，能够满足煤矿巷道监测所需。2023 年南京理工大学杜翠翠等[15]提出了一种金属封装的光栅应变传感器。应用理论分析了设计结构的合理性并进行了有限元仿真验证，同时对影响平均应变传递率的因素与实验结果进行对比，误差结果在 0.15%～0.25%以内。

在高温环境下的光纤光栅传感器性能指标不断提高。2019 年，西北大学 Su 等[16]在传感器中设置热光系数和弹光系数相异的两种 FBG 光栅，在 800 ℃下 0～1 000 με 应变范围内，灵敏度可达到 3.251 2 pm/με。2020 年，葡萄牙的 Viveiros 等[17]采用飞秒激光刻写 FBG 且可支持两种独立光纤模式(LP0,1 和 LP1,1)的光栅传感技术，实现了 300 ℃的应变监测，温度灵敏度达到 12 pm/℃，在 0～522 με 的应变范围内，应变灵敏度达到 1.44 pm/℃。2022 年，西北大学 Tian 等[18]设计并制作了一种高温应变传感器，该传感器能够将温度和应变单独检测出来，经标定实验验证，传感器在 100～1 000 ℃工作温度以内，线性度良好。

这些研究在高温检测方面取得了有效成果。本文通过深入研究高温环境对传感结构的形变和对光纤光栅输出特性的影响，以及相互关联关系等问题，设计了工作温度在 100～450 ℃、压力检测范围为 0～10 MPa 的高温压力传感器，来满足对弹药热安定性检测、弹内压力检测等的适用温度、压力检测范围和检测精度要求。

1 光纤光栅传感原理

FBG 应用强光干涉条纹照射纤芯，使得光纤被照射处的折射率产生周期性变化，从而影响光纤中光信号的传输路径[19]。当宽带光信号进入光纤并到达光栅处时，部分特殊波长的信号将被反射，而其余的光不受影响，继续沿光纤传输，如图 1 所示，因此，光纤布拉格光栅就具有过滤光波的功能。光栅处发生反射的光波满足：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，n_{eff} 是光栅处的有效折射率，也是光纤经过强光照射改变后的折射率；Λ 是干涉条纹的之间的距离，又称为光栅栅距。FBG 的有效折射率和光栅栅距是能够直接影响 FBG 波长偏移的参数[20]，应变和温度具有改变这两个因素的效果，因此是光栅能够直接检测的参数。

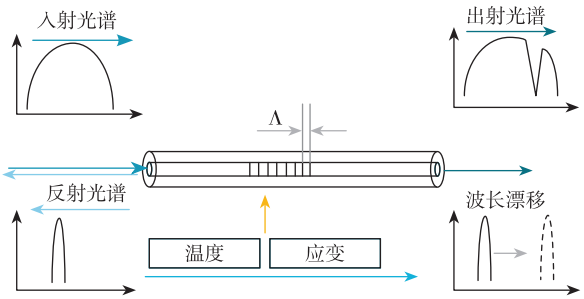


图 1 光纤光栅传感原理

当光栅的环境温度发生变化时，受热光作用的影响，Λ 会发生变化。由于受热敏效应作用，n_{eff} 相应地也出现变化，产生波长变化。当环境温度起伏较小时，光栅波长变化为：

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \alpha_T \Delta T \tag{2}$$

式中，α_T 为光栅的温度灵敏度。当温度大范围变化，式(2)不再适用，其关系更接近于：

$$\Delta\lambda = A\Delta T^2 + B\Delta T + C \tag{3}$$

当布拉格光栅受外力作用产生形变就会引起光

栅周期的变化。相应地，因为光栅弹光效应的作用，光栅的有效折射率也会随材料的形变而改变，导致反射波长偏移[21]。光栅中心波长偏移与光栅处发生的应变成正比，为：

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon \varepsilon \tag{4}$$

光栅只能直接检测温度和应变。对于其他参数，如压力、速度、位移等，则需要对传感器进行封装，通过不同的封装结构将待检测参数的变化转换为光栅的应变，得出待测参数与光栅波长之间的对应关系。

2　传感器结构设计

本文设计的高温压力传感器要求满足以下两点：1）能够工作于 450 ℃以内的环境中；2）测压量程为 10 MPa。光栅的机械特性不适合直接进行压力检测，其对压力极不敏感且刚性较差。因此，应用光栅实现压力检测，必须加以合理的封装。封装的作用主要有以下三点：1）铠装作用，通过添加金属外壳，达到光栅在高压下不被损坏的目的；2）将外部压力转换为光栅应变，并且尽可能增加传感器压力灵敏度；3）解决温度补偿问题[22]，针对光栅温度与其他参数交叉敏感的问题，选取热膨胀系数小、弹性系数高的材料 316 不锈钢，加以合理的封装结构以及数据处理方法。

2.1　压力与光栅应变转换机构的设计

传感器的封装结构应能够将外部压力转换为 FBG 的应变，将外部压力转换为光栅的拉伸或压缩。为了实现这一目标，传感器的压力膜片内部对称且垂直传感器外壳底面布置两个固定柱，来固定压力光栅的两端。当压力施加到压力膜片上时，会引起压力膜片向下的微变形。这种变形会带动两个固定柱产生相反方向的变形，从而拉动光栅，使光栅产生应变。

为了进一步验证设计结构的合理性和有效性，应用 Ansys Workbench 对设计的封装结构进行仿真。将 10 MPa 压力沿垂直模型表面方向，施加到模型的所有外表面，模型内部变形在位移分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出，两个固定柱变形量最大且方向相反。光栅设置在两个固定柱之间，可以获得更为理想的压力灵敏度。因此，压力与光栅应变转换机构设计合理。

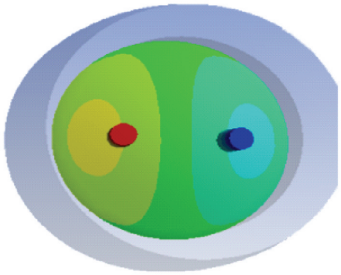


图 2　模型内部变形分布图

2.2　温度补偿光栅的设置结构设计

温度补偿光栅设置需要满足以下原则：1）光栅位置应尽可能接近压力光栅，让两个光栅所处环境温度相同；2）应尽可能不受传感器外壳受力形变的影响；3）温度补偿光栅应具有较高的温度检测精度。遵循以上三点原则，在传感器内部下底面的中心设置一个固定柱，在固定柱上方焊接一个热膨胀系数较高的黄铜毛细管。对设计结构进行有限元仿真如图 3 所示。

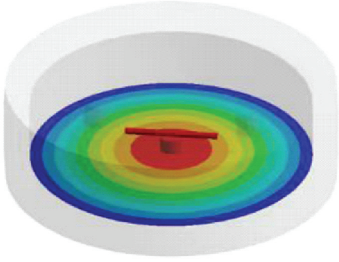


图 3　温度补偿光栅设置示意图

通过有限元仿真可以看出当毛细管在传感器外壳加载 10 MPa 压力时，毛细管颜色一致，没有相对变形不会拉动温度补偿光栅，且位置处于压力敏感光栅正下方，保证了温度对两个光栅的影响一致。将温度补偿光栅封装在毛细管内，可以使温补光栅获得较高的温度灵敏度，从而满足了温度补偿光栅的所有设置原则。

2.3　参数设计

传感器的内部结构图如图 4 所示，主要由压力膜片、固定柱、压敏光栅、温补光栅以及黄铜毛细管组成。为保证光栅在高温环境下能够正常工作，光栅选用镀金光栅；固定柱与受压膜片以及整个外壳属于同种材料（316 不锈钢），这样可有效减少应力集中或应力不均现象，提高检测精度。传感器内部布置了两个光栅，固定在上侧两个固定柱之间的是压敏光栅 FBG1，可以将外部压力转换为 FBG1 上产生的应变，同时传感器环境温度变化也会影响压

敏光栅 FBG1 的输出信号。另一个光栅 FBG2 是温度补偿光栅，传感器外壳受压的变形对 FBG2 不产生形变，因此其输出仅受温度影响，可以用于检测环境温度。两个光栅布置位置接近，受温度影响相同，因此可以通过 FBG2 的输出信号获得温度变化对 FBG1 产生的影响。

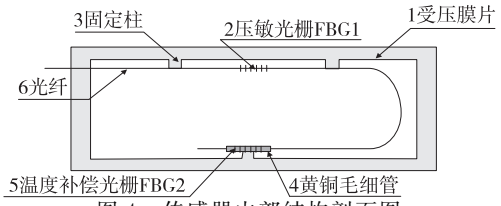


图 4 传感器内部结构剖面图

图 4 中，传感器封装由压敏光栅 FBG1、温度补偿光栅 FBG2、三个固定柱（ABC）和用于封装温补光栅的黄铜毛细管组成。压敏光栅 FBG1 和温度补偿光栅 FBG2 采用级联的方式连接。在三个固定柱中，传感器上侧的两个固定柱用于固定压敏光栅，当受到外部压力就会转换为光栅处的应变。下侧的固定柱与黄铜毛细管焊接在一起设置于传感器中心。当外力作用于传感器时，毛细管只会上下整体移动，没有左右变形。该结构既保证了两光栅处于同一温度场，又显著提高了温度补偿光栅的温度检测精度。另外，这种结构可以防止传感器受到外力时温度补偿光栅产生应变，提高测压光栅的温度补偿效果。

(1)受压膜片的厚度设计

传感器的受压变形与弹性力学薄板挠度弯曲理论相符，该理论的描述微分方程为：

$$D\left(\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}\rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\rho}\right)\left(\frac{\mathrm{d}^2\omega}{\mathrm{d}\rho^2}+\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\rho}\right)=P \tag{5}$$

式中，D 为传感器模型的弯曲刚度，P 为加载到传感器的压力，ω 为传感器中心受压的挠度变形，ρ 为承压膜片上任意点到中心的距离，求解方程(5)，根据边界条件可得：

$$\omega=\frac{3PR^4(1-\mu^2)}{16Eh^3}\left(1-\frac{\rho^2}{4R^2}\right) \tag{6}$$

式中，E 为传感器模型材料的弹性模量，μ 为泊松比，h 为传感器的高度，R 为传感器的半径。当 $\rho=0$ 时，传感器变形挠度取得最大值 $\omega_{\max}=\frac{3PR^4(1-\mu^2)}{16Eh^3}$；确保 $\omega\leqslant\frac{h}{80}$ 是传感器工作于小挠度范围的条件。传感器外壳材料选用的是 316 不锈钢，弹性模量 E 为 164 GPa，泊松比 μ 为 0.3，传感器半径为 90 mm，量程选取 10 MPa，通过计算可得压力膜片厚度为 8 mm。

(2)温度补偿的实现方法

应变、温度对光栅波长的影响是彼此独立、线性叠加的，FBG1 的波长变化可用公式(7)表示：

$$\Delta\lambda_1=K_P\Delta P+A_1\Delta T_1^2+B_1\Delta T_1+C_1 \tag{7}$$

式中，K_P 为 FBG1 的压敏系数，单位为 nm/MPa；A_1，B_1 及 C_1 为 FBG1 的温度敏感系数；ΔT 为温度变化；ΔP 为被测压力。温度补偿光栅 FBG2 仅受温度的影响。在本文所设置的测试环境下，波长变化可由式(8)表示：

$$\Delta\lambda_2=A_2\Delta T_2^2+B_2\Delta T_2+C_2 \tag{8}$$

通过温度标定实验分别计算出两个光栅的温度敏感系数 A_2，B_2 和 C_2。实验温度可由式(8)计算。由于两个光纤光栅处于同一温度场，即 $\Delta T_1=\Delta T_2$。

将检测到的温度补偿光栅的波长代入式(8)中，计算出温度 ΔT_1 的值。然后将此温度下光栅传感器的压力灵敏度 K_P 代入式(9)就能得到待检测的压力：

$$P=\frac{\Delta\lambda_1-(A_1\Delta T^2+B_1\Delta T+C_1)}{K_P} \tag{9}$$

2.4 传感器压力灵敏度的测试

当传感器模型承受压力时，压力膜片的简化图如图 5 所示。

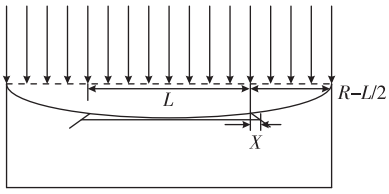


图 5 压力膜片受压变形示意图

图 5 中，L 为压敏光栅两个固定柱之间的距离，R 为光栅传感器的半径。给膜片施加压力载荷后，膜片发生内凹变形，则固定柱顶端所处位置的挠度为：$\omega'=\frac{\omega}{R}\left(R-\frac{L}{2}\right)$。通过计算，固定柱底端 X 轴方向的变形 x 为：

$$x=m\,\mathrm{Sin}\left(\tan^{-1}\frac{\omega}{R}\right) \tag{10}$$

光栅的应变 $\varepsilon=\frac{2x}{L}$，光栅的波长变化为：

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B=(1-P_e)\varepsilon=(1-P_e)\frac{2x}{L}=\frac{3(1-P_e)mPR^3(1-\mu^2)}{8Eh^3L} \tag{11}$$

传感器的灵敏度为：

$$k=\frac{3(1-P_e)mR^3(1-\mu^2)}{8Eh^3L} \tag{12}$$

将 316 不锈钢封装材料的参数弹性模量 E=164 GPa、泊松比 μ=0.3，传感器半径 R=90 mm、高度 h=35 mm，固定柱的高度 m=8 mm，固定柱间距离 L=32 mm，光纤的有效弹光系数 P_e=0.22 等相关数值，代入式(12)中可得 k=60.564 4 pm/MPa。

3　实验校准

为了验证传感器的压力检测能力，对传感器进行了室温以及高温环境下的加压、降压实验，验证了传感器的高温测压能力，得出了不同温度下的压力灵敏度。

3.1　室温压力校准实验

为了得到室温下压力校准数据，降低温度波动对传感器压力检测数据的影响，在山西省计量院压力研究所恒温实验室完成了恒温环境下的油压标定实验。将 FBG 压力传感器样机通过专用夹具与 BHY-160B 活塞压力计相接，如图 6 所示。

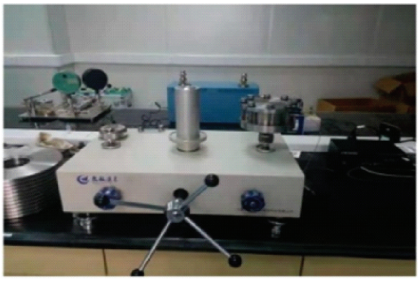


图 6　传感器压力校准实物照片

通过计算机观察传感器在加压和减压过程中输出信号的变化。加压过程从 0 MPa 开始，以步长为 0.2 MPa 逐渐升至 10 MPa。降压过程从 10 MPa 开始，仍以 0.2 MPa 为步长，直到降至 0 MPa。将一次升压、降压视为一个循环，连续测试三次循环，记录每个压力点的光栅输出信号。取每个压力点的平均输出值作为该点的测量值。根据压力传感器检定规程进行分析，得到光栅波长、压力之间的关系，如图 7 所示。

所测数据表明，本文设计的光纤光栅高温压力传感器在压力检测中具有良好的线性度，取得了良好的实验结果，传感器的压力灵敏度为 60.93 pm/MPa，符合理论计算。由于式(8)中光纤光栅的有效弹光系数材料等参数代入的是普通光纤参数，与传感器中设置的镀金光栅有出入，造成实验数据与理论值的较小差异。传感器的相关指标重复性为 0.045%FS，返回误差为 0.735%FS，线性误差为 0.013 87%FS，精度为±0.326%FS。

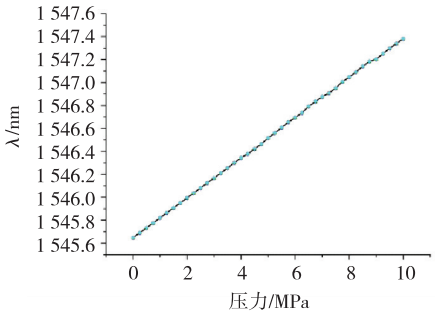


图 7　室温压力检测

3.2　高温压力校准

材料的弹性模量在环境温度升高超过 200 ℃后会呈现出下降趋势，而热膨胀系数随温度升高则呈现上升趋势，这些参数的变化会使传感器的压力灵敏度随着温度的升高而增加。

为了研究 FBG 高温压力传感器在 100～450 ℃温度变化过程中压力灵敏度的变化趋势，从而分析传感器在不同温度的压力特性，对传感器样机进行了高温环境不同温度下的压力实验。将制作的传感器样机放入密闭容器(密闭容器与传感器是由同种材料制成，同时保证密闭容器壁厚大于传感器膜片厚度)，再将密闭容器放入恒温箱中，密闭容器通过金属管与恒温箱外部的气压泵连接。压力标定实验的实验装置的连接方式如图 8 所示。

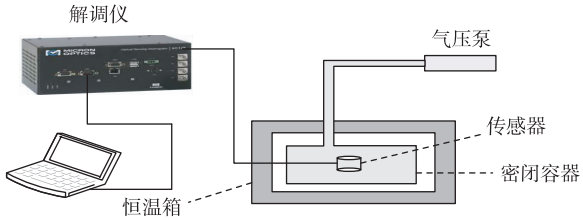


图 8　压力校准实验示意图

同时，在恒温箱内放置高精度热电偶温度测试仪(YET-610T)，对恒温箱的温度进行校准。将恒温箱初始温度设定为 100 ℃，步长为 25 ℃，逐步升温至 450 ℃。为了保证压力标定过程，输出信号无温度影响，在每个温度点保温 3 小时后，每隔 20 秒记录压敏光栅和温补光栅的输出波长，记录 5 次以后对记录的数据进行对比，确定输出波长无明显变化趋势后(若存在上升趋势则继续保温 30 分钟)，通过气压泵对传感器加压，从 0 MPa 开始，按照 0.5 MPa 的

步长逐步升高到 10 MPa，再依旧以 0.5 MPa 的步长降至 0 MPa，记录每一次压敏光栅的输出波长数据。重复循环做 3 次，实验结果取平均值，如图 9 所示。再根据每个温度点的实验数据计算该温度下 FBG 压力传感器的压力灵敏度，结果如图 10 所示。

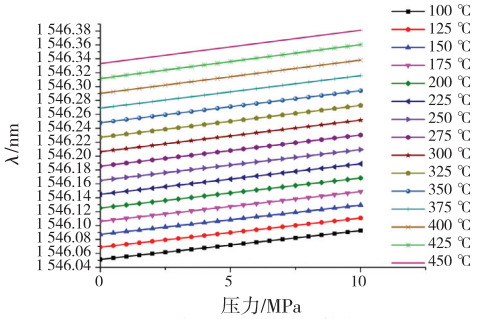


图 9 高温压力测试数据

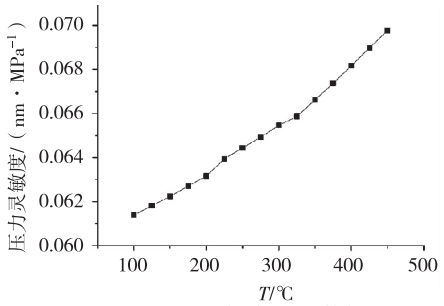


图 10 压力灵敏度测试数据

由图 10 可知，在不同温度的压力标定实验中，传感器样机的压力灵敏度随温度变化呈非线性变化趋势。

4 结论

本研究设计了一种耐高温光纤光栅压力传感器，并建立了其温度补偿方法，得出了以下结论：

(1)压力和温度标定实验表明，基于 FBG 的压力传感器具有良好的线性度，室温下压力灵敏度为 60.05 pm/MPa(10 MPa)；

(2)提出了温度补偿方法，选用二次函数描述高温环境下光栅波长与温度之间的对应关系，提高了温度测量和温度补偿的精度；

(3)压力标定实验验证了在 100～450 ℃高温下的压力测量精度，并得出了不同温度下的压力灵敏度，传感器在 100 ℃时压力灵敏度为 61.383 pm/MPa，450 ℃时压力灵敏度为 69.765 pm/MPa，压力灵敏度随温度变化呈非线性变化趋势。

参考文献：

[1] 杨杭洲，刘 鑫，南朋玉，等. 光纤高温应变传感器研究进展(特邀)[J]. 光子学报，2022，51(10)：1006002.
Yang Hangzhou，Liu Xin，Nan Pengyu，et al. Progress in research of optical fiber high temperature and strain sensor (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica，2022，51(10)：1006002.

[2] Li T，Tan Y，Zhou Z，et al. A non-contact FBG vibration sensor with double differential temperature compensation[J]. Opt. Rev.，2016，23(1)：26-32.

[3] Ko P-L，Chuang K-C，Ma C-C. A fiber Bragg grating-based thin-film sensor for measuring dynamic water pressure[J]. IEEE Sens. J.，2018，18(18)：7383-7391.

[4] Shen J，Li T，Zhu H，et al. Sensing properties of fused silica single-mode optical fibers based on PPP-BOTDA in high-temperature fields[J]. Sensors (Switzerland)，2019，19(22)：5021.

[5] Guo H，Chen J，Tian Z，et al. A high temperature solid pressure sensor based on fiber Bragg grating[J]. Symmetry，2021，13(11)：13112098.

[6] Patil S S，Shaligram A D. Retro reflective fiber optic displacement sensor for performance optimization using Taguchi method[J]. J. Sens. Technol.，2020，10(1)：1-13.

[7] Lukens J M，Lagakos N，Kaybulkin V，et al. Intensity-modulated fiber-optic voltage sensors for power distribution systems[J]. IEEE Photonics Technol. Lett.，2020，1(15)：1-7.

[8] Sweeney D C，Schrell A M，Petrie C M. Pressure-driven fiber-optic sensor for online corrosion monitoring[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas.，2021，70：1-10.

[9] Njegovec M，Donlagic D. A fiber-optic gas sensor and method for the measurement of refractive index dispersion in NIR[J]. Sensors，2020，20(13)：3717.

[10] Luo M，Wang Q. A reflective optical fiber SPR sensor with surface modified hemoglobin for dissolved oxygen detection [J]. AEJ-Alexandria Eng. J.，2021，60(4)：4115-4120.

[11] Shao T，Wu J，Zhang Y，et al. Highly sensitive conformal pressure sensing coatings based on thermally expandable microspheres[J]. Adv. Mater. Technol.，2020，5(5)：2000032.

[12] 王雅纯，张小栋，陆竹风，等. 用于假手指尖的光纤光栅触觉力传感器研究[J]. 仪器仪表学报，2021，42(9)：124-130.
Wang Yachun，Zhang Xiaodong，Lu Zhufeng，et al. Research on the tactile force sensor of prosthetic hand finger based on fiber Bragg grating[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2021，42(9)：124-130.

[13] 华子明，李永倩，王少康，等. 光纤光栅液体双参量传感器增敏设计[J]. 激光技术，2022，46(3)：337-343.
Hua Ziming，Li Yongqian，Wang Shaokang，et al. Sensitization design of liquid dual parameter sensor based on fiber grating[J]. Laser Technology，2022，46(3)：337-343.

[14] 潘 越，宋佳佳，王智冲，等. 变截面悬臂梁式光纤布拉格光栅压力传感器设计研究[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(1)：150-159.

Pan Yue, Song Jiajia, Wang Zhichong, et al. Design and research on variable cross-section cantilever fiber Bragg grating pressure sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 150-159.

[15] 杜翠翠，孔德仁，徐春冬. 金属封装式 FBG 传感器设计及应变传递试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2023，50(4)：9-20.

Du Cuicui, Kong Deren, Xu Chundong. Design of metallic packaged fiber Bragg grating sensor and its strain transfer experiment[J]. J. of Hunan University: Natural Sciences, 2023, 50(4): 9-20.

[16] Su D, Qiao X, Chen F, et al. Compact dual fiber Bragg gratings for simultaneous strain and high-temperature measurement[J]. IEEE Sens. J., 2019, 19(14): 5660-5664.

[17] Viveiros D, Amorim V A, Maia J M, et al. Femtosecond laser direct written off-axis fiber Bragg gratings for sensing applications[J]. Opt. Laser Technol., 2020, 128: 106227.

[18] Tian Q, Xin G, Lim K S, et al. Optical fiber sensor with double tubes for accurate strain and temperature measurement under high temperature up to 1 000 ℃[J]. IEEE Sens. J., 2022, 22(12): 11710-11716.

[19] 于璐瑶，赵　强，杜大伟，等. 膜片式带温补结构的光纤光栅压力传感器[J]. 光子学报，2022，51(3)：0306007.

Yu Luyao, Zhao Qiang, Du Dawei, et al. Diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0306007.

[20] Zamyatin A A, Makovetskii A A, Shilov I P, et al. Study of the optical parameters of a silica-polymeric optical fiber with a reflective coating made of a thermoplastic fluoropolymer[J]. Ind. Lab. Diagnostics Mater., 2020, 86(7): 27-32.

[21] 龙俊求，江　浪，肖　春，等. 大规模分布式光纤水听拖曳阵列及其湖试性能测试[J]. 光学学报，2024，44(1)：0106019.

Long Junqiu, Jiang Lang, Xiao Chun, et al. Large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array and lake trial performance test[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106019.

[22] 王昊祥，冯　艳，潘睿智，等. 光纤光栅波电转换的人机仿生跟随[J]. 光学精密工程，2023，31(23)：3414-3425.

Wang Haoxiang, Feng Yan, Pan Ruizhi, et al. Bionic tracing of human and robotic arm based on FBG's wavelength-electric conversion[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(23): 3414-3425.

作者简介：

张白莉(1977—)，女，山西省原平市人，副教授，硕士，主要研究方向为光纤光栅传感技术。