中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

光纤端头Fizeau腔超快压力传感器及其在高功率激光诱导等离子体冲击波测试中的应用

王俊杰 朱亚凯 贺达 姚磊磊 张普

Ultrafast pressure sensor based on optical fiber tip fizeau cavity and its application in testing of high-power laser-induced plasma shock waves

WANG Jun-jie, ZHU Ya-Kai, HE Da, YAO Lei-lei, ZHANG Pu

引用本文:
王俊杰, 朱亚凯, 贺达, 姚磊磊, 张普. 光纤端头Fizeau腔超快压力传感器及其在高功率激光诱导等离子体冲击波测试中的应用[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0095
WANG Jun-jie, ZHU Ya-Kai, HE Da, YAO Lei-lei, ZHANG Pu. Ultrafast pressure sensor based on optical fiber tip fizeau cavity and its application in testing of high-power laser-induced plasma shock waves[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0095

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026-0095

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于冲击波测量的硅MEMS光纤法珀压力传感器

Fiber-optic Fabry Perot pressure sensor for shock wave measurements based on silicon MEMS

中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 452 https://doi.org/10.37188/CO.2025-0010

用于高压测量的MEMS硅-玻光纤FP压力传感器

MEMS silicon-glass fiber-optic FP pressure sensor for high-pressure measurements

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 771 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0224

具有温度补偿的金属膜片式光纤法珀压力传感器

Metal-sensitive diaphragm fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with temperature compensation

中国光学（中英文）. 2025, 18(5): 1255 https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0021

基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器

A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance-based photonic quasi-crystal fiber

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 174 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0006

基于铰链杠杆结构光纤光栅温度压力传感器

Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor based on hinge lever structure

中国光学（中英文）. 2025, 18(1): 63 https://doi.org/10.37188/CO.2024-0090

5.2 W高重频257 nm深紫外皮秒激光器

High repetition frequency 257 nm deep ultraviolet picosecond laser with 5.2 W output power

中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1318 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0026

文章编号　2097-1842(xxxx)x-0001-11

光纤端头 Fizeau 腔超快压力传感器及其在高功率激光诱导等离子体冲击波测试中的应用

王俊杰*, 朱亚凯, 贺　达, 姚磊磊, 张　普
（武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 武汉 430070）

摘要: 针对 351 nm 深紫外强激光诱导不锈钢金属产生等离子体冲击波动力学特性的研究中, 迫切需要一种响应时间小于 50 ns 的超快动态压力传感器。为此本文阐述了一种制作在光纤端头基于 Fizeau 腔的超微型超快空气激波压力传感器。采用活塞式压力计和空气激波管, 对该激波压力测试系统进行了静态和动态定标实验。当高速光电探测器的响应时间为 8 nS、谐振频率点为 20 MHz 时, 在 2.4 MPa 压力量程范围内, 空气激波压力传感系统的定标结果为: 线性度 1.09% FS、重复性 1.046% FS、回程误差 1.117% FS、基本误差 3.253% FS, 动态响应时间小于 50 nS。实测实验, 该传感系统完美测取到 351 nm 深紫外强激光诱导不锈钢产生等离子体冲击压力波。据我所知, 这是第一次利用冲击波压力传感器测取到高功率激光诱导不锈钢金属产生的超快等离子体冲击压力波。最后, 指出该超快动态压力传感器潜在的应用方向。

关　键　词: 光纤端头 Fizeau 腔; 高频响超快动态压力; 冲击波压力传感器; 深紫外激光诱导不锈钢金属; 等离子体冲击波
中图分类号: TH741　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.3724/CO.2026-0095　　**CSTR:** 32171.14.CO.2026-0095

Ultrafast pressure sensor based on optical fiber tip fizeau cavity and its application in testing of high-power laser-induced plasma shock waves

WANG Jun-jie*, ZHU Ya-Kai, HE Da, YAO Lei-lei, ZHANG Pu
(*National Engineering Research Center for Optical Fiber Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: wangjj@whut.edu.cn*

Abstract: In the study of the dynamic characteristics of plasma shock waves generated by the 351 nm deep-ultraviolet high-intensity laser acting on stainless steel metal, there is an urgent need for an ultra-fast dynamic pressure sensor with a response time of less than 50 nS. To this end, this paper describes an ultra-miniature ultra-fast air shock wave pressure sensor based on a Fizeau cavity fabricated on the end face of an optical fiber. A static calibration test and a dynamic calibration test are conducted using a piston-type pressure calibration machine and an air shock tube. When the response time of the high-speed photodetector is 8 nS and

收稿日期: 2026-05-27; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: xxx
xxx

the resonant frequency point is 20 MHz, the calibration results indicate that the repeatability, hysteresis, non-linearity, and the overall measurement accuracy of the sensor within the full pressure range of 2.4 MPa are 1.117%, 1.046%, 1.09%, and 3.253%, respectively. and dynamic response time is less than 50 nS. In actual experiments, the sensing system successfully captures the plasma shock pressure wave produced on stainless steel upon irradiation by a 351 nm deep-ultraviolet high-intensity laser. To the author's knowledge, It is the first time to utilize a shock wave pressure sensor to capture the ultrafast plasma shock pressure wave generated by high-power laser-induced stainless steel metal. Finally, the potential application directions of this ultrafast dynamic pressure sensor is pointed out.

Key words: optical fiber tip Fizeau cavity; high-frequency response ultra-fast dynamic pressure; shock wave pressure sensor; stainless steel irradiated by deep-ultraviolet laser; plasma shock wave

1 引 言

在 351 nm 深紫外强激光和不锈钢金属相互作用的科学研究中，紫外脉冲激光上升时间为 1 ns、持续时间为 1 ns、下降时间为 1.5 ns，不锈钢金属吸收该瞬态深紫外激光脉冲能量产生等离子体冲击波的上升时间接近 50 ns。传统机电类压阻[1-2]和压电[3-4]冲击波压力传感器的响应上升时间最快一般小于 1 μs，由于响应速度不足，是无法测取该上升时间为 50 ns 的冲击波压力脉冲。此外，强电磁干扰介质等离子体膨胀冲击波近场测试时，这种强电磁干扰介质也拒绝传统压电和压阻传感器在此正常工作。

所以，目前基于 351 nm 强激光诱导不锈钢金属等离子体冲击波力学效应的各项研究和应用中，迫切需要研制一种能在强电磁干扰环境下工作的超快动态压力传感器。光纤本质抗电磁干扰，光纤 F-P 腔传感器具有引导段去敏、点式 F-P 探头具有易于实现高频响和高空间分辨率压力测量能力[5]，是实现上述强激光诱导不锈钢金属产生等离子体冲击波近场测试最合适的选择方案。

平面圆形薄板结构是压力传感器最常用的探测结构，基于超微型平面圆形薄板结构构成的光纤 F-P 腔，也称为外本征光纤 Fizeau 腔[6]。基于制作材料和工艺不同，光纤 Fizeau 腔的尺寸效应和性能也有很大差异。

文献[7]将一根端面切割好的单模光纤插入光纤插芯，同时，将一铜薄膜粘贴在光纤插芯端面。这样，在插入光纤端面和铜薄膜之间就形成 Fizeau 腔，利用该腔对动态压力进行测试实验。实验结果表明：在满量程动态压力为 100 kPa 前提下，传感器上升时间可达 3 μs；文献[8-9]，在硅表面氧化形成 1 μm 厚的二氧化硅薄膜，然后，在硅晶片上采用反应离子刻蚀形成直径为 75 μm 和 125 μm 的台阶孔，将端面切割好的光纤插入该台阶孔，并用环氧树脂胶固定。这样就制作形成敏感薄膜有效直径为 75 μm、敏感薄膜厚度为 1 μm 的 Fizeau 腔压力传感器。该传感器的峰值压力为 8 kPa，上升时间为 4 μs。文献[10]，采用同样的结构，只是在硅表面形成氮化硅薄膜作为压力敏感薄膜，压力测试范围为 0.1 MPa ~ 1 MPa，上升时间可达 3 μs。所有这种结构和工艺的 Fizeau 腔，都是将压力敏感薄膜生长在硅基地材料制作的外部支撑结构上。由于硅晶元切割时工艺限制，其尺寸大小在 2 ~ 3 mm 之间，所以，该结构的传感器体积笨重，探测空间分辨率受限。此外，将引导段光纤固定在该硅基底材料制作的支撑结构时，必须使用环氧树脂胶水。由于环氧树脂胶为一种有机化合物，其老化、蠕变和失效可能会影响传感器的稳定性。

文献[11-14]报道了通过高温氧化在硅晶片表面形成二氧化硅薄膜。然后，在晶圆上制作圆形开窗图案，接着，通过硅深反应离子刻蚀（RIE）工艺将圆形开窗图案中的硅衬底刻蚀掉，这样就制作成了圆形开窗图案硅衬底作为框架支撑的二氧化硅薄膜。然后，将光纤端头 Fizeau 腔体穿过内径为 125 μm陶瓷插芯，用微调架缓慢推进顶在该带框架支撑 SiO_2 薄膜上，同时，用丙烷热源加热。这样，带框架支撑的 SiO_2 薄膜就键合在光纤端头 Fizeau 腔体上。最后，反向外拉光纤 Fizeau 腔引导段光纤，让光纤端头 Fizeau 腔反向穿过内径

为 125 μm陶瓷插芯。这样, 光纤端头 Fizeau 腔体上的 SiO_2 薄膜就被陶瓷插芯切除掉。最终, 厚度为 1 μm ~ 3 μm厚 SiO_2 薄膜成功键合在光纤 F-P 腔体端头, 成功做成了外径仅 125 μm光纤端头 Fizeau 腔压力传感器。实验表明: 传感器呈现出优异的线性度和迟滞特性。其中: 文献[11-12] 研究结果表明: 该传感器的谐振频率分别为 4.11 MHz 和 4.12 MHz, 上升响应时间分别可达 200 ns 和 120 ns; 文献[13-14] 研究结果表明: 该传感器在 (0 kpa ~ 140 kpa)的量程范围内, 上升响应时间小于 2 μs。

文献[15] 报道了基于深紫外激光微加工技术直接在 125 μm 引导光纤端头刻蚀制作光纤 Fizeau 腔腔体, 然后, 再用紫外固化胶将已镀全反射铝膜的聚碳酸酯薄膜粘接在 Fizeau 腔体上。这样, 制作成功了聚碳酸酯薄膜作为动态压力感知薄膜的光纤 Fizeau 腔动态压力传感器。该传感器直径仅 125 μm, 在峰值为 300 kpa 压力作用下, 其响应时间可达 3 μs。

文献[16] 报道了采用微机电加工方法批量化制作传感器敏感单元, 再结合激光热熔技术进行传感器集成, 从而制备出一致性高、无胶化封装光纤 F-P 腔冲击波压力传感器, 但是完成 MEMS 工艺流程后, 将整片晶圆切割分成边长为 4 mm 的正方形敏感单元, 所以, 该结构传感器的尺寸效应还是比较大、探测空间分辨率受限, 该传感器的上升时间为 8.5 μs。

文献[17-18] 提出了一种有别于传统光纤压力测量的新方法, 仅限于获取冲击波反射峰值超压, 而不能获得冲击波压力随时间变化的波形。该方法利用冲击波压力与薄膜加速度之间的正比例关系进行测量。压力敏感薄膜和光纤, 形成了光学 F-P 腔结构; 根据 F-P 腔干涉原理, 获得薄膜在压力作用下的位移, 进而获得加速度, 并根据牛顿第二定律得到冲击波峰值压力值。该光纤压力传感器具有结构简单、成本低廉、和无须标定的优点, 但是测量关注的时间尺度必须在微秒量级以上。

文献[19] 报道了在 125 μm 标准通讯光纤上刻写长度仅为 100 μm 和 1 mm 的两种 FBG, 将之嵌入陶瓷插芯, 对由高压气体驱动聚碳酸酯冲击器产生高压(320 MPa ~ 700 MPa)冲击波测量的实例。两种传感 FBG 的一侧和陶瓷插芯端面齐平安装, 去感测没有稀疏波、原始状态未受到任何破坏的冲击波(其应力状态预计在数百纳秒内保持恒定)。长度为 100 μm 和 1 mm 的两种 FBG 传感 FBG 反射光谱的 FWHM 分别为 5 nm 和 0.8 nm, 其分布重心先通过阵列 DWDM 解波分复用器分解, 再由 200 MHz 的 InGaAs 探测器直接探测, 最后通过数据合成直接得到。结论: 100 μm 长的光纤 FBG 比 1 mm 长的 FBG 更适合对局域化、高空间梯度分布(几十微米)的超快冲击波进行测量, 其响应时间可高达 20 ns。不仅可以测量目标表面, 而且可以目标内部冲击应力波。超短 FBG 具有非常宽的反射谱, 可以采用价格相对低廉的光谱窗口法进行反射光谱重心高速高精度测量。

本研究将在外径为 125 μm 的单模光纤端头用微电弧熔接外径为 125 μm、内径为 75 μm 的石英玻璃毛细管作为 F-P 腔腔体; 接着用同样的方法, 再在 F-P 腔体上熔接外径为 125 μm 无芯石英光纤作为压力敏感薄膜。这样, 就制作成了外径为 125 μm 光纤端头全石英 Fizeau 腔压力敏感器件[20-21]。利用该方法制作的 Fizeau 腔压力器件, 已成功测取了快开阀产生的空气冲击波压力、医用聚焦式电磁冲击波源产生的水下激波压力脉冲[19] 以及 PTS 自激励水开关(水下电爆炸)强电磁干扰介质等离子体产生的冲击波压力[21]。

该 Fizeau 腔体积微小至极致(外径仅 125 μm, 压力敏感薄板有效直径仅 60 μm、厚度在 1 ~ 5 μm 之间)。微小的尺寸效应成就了传感器具有极高的谐振频率, 对应着频域超宽的响应带宽和时域超快的响应速度, 所以, 基于光纤端头 Fizeau 腔结构的动态压力传感器相对于传统压电、压阻冲击波传感器(响应时间一般在 1 μs 左右)具有更宽响应带宽和更快的响应速度。

此外, 该传感器也具有极高的抗冲击侵彻腐蚀性能。这是因为: ① 传感器正真小致 125 微米, 越小耐受性越高; ②该 Fizeau 腔器件是由单模光纤、空芯石英玻璃毛细管和无芯石英光纤三种同质材料采用高温电弧熔为一体, 这种制作工艺决定着传感器具有很高的机械耐受性。

2　理论分析

2.1　全石英光纤 Fizeau 腔基本原理

图 1 给出全石英光纤 Fizeau 腔压力传感器原理示意图及其力学分析简图。它有三部分组

成：引导段单模光纤、空心石英玻璃毛细管形成的 F-P 腔腔体以及通过研磨和 HF 腐蚀厚度可精确控制的 SiO_2 薄板。传感器直径和标准单模光纤完全一样，仅 125 μm。当入射光照射该 F-P 腔时，单模光纤和 F-P 腔腔体界面以及 F-P 腔腔体和 SiO_2 薄板界面，将产生两束反射光（I_1 和 I_2），并在探测器上干涉，形成干涉条纹。SiO_2 薄板中心变形挠度和外界压力是线性比例关系，因此，反射干涉条纹将根据外界压力的变化而移动。这样，通过查询干涉条纹的移动，就可以实现对外界压力的检测。该光纤 Fizeau 腔器件制作方法，见文献[20]。

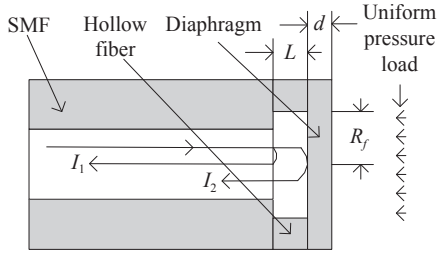


图 1 全石英光纤 Fizeau 腔及其力学分析简图

Fig. 1 Schematic diagram of the all-silica fiber Fizeau cavity and its mechanical analysis

2.2 传感器封装

所研制的光纤端头 Fizeau 腔，见图 2(a)；传感器封装过程及实物，见图 (2.b)。

第一步：将外径为 1.25 mm、内径为 130 μm 的 LC 陶瓷插芯插入不锈钢陶瓷插芯安装基座中。插入时，间隙滴 353ND 环氧树脂胶；插入后，加热 353ND 胶，使之固化，将二者粘结在一起。

第二步：将如图 2(a) 所示的带尾纤光纤端头 Fizeau 腔器件侧面粘 353ND 胶水，插入 LC 陶瓷插芯中，保证 Fizeau 腔器件端面和陶瓷插芯端面起平前提下，加热、使 353ND 胶固化，将传感光纤端头 Fizaeu 腔器件固定在 LC 陶瓷插芯中，并保证其端面齐平。

第三步：将外径为 0.9 mm 的光纤松套管套着 Fizeau 腔器件的引导段光纤，从安装基座后面插入陶瓷插芯安装基座，同样，用 353ND 胶水，加热、固化，将保护松套管和传感 Fizeau 腔器件以及安装基座固定为一个整体。

第四步：将上述传感组件通过螺纹拧紧，并加胶密封固定在传感器延伸管上。

这样，就封装成传感器前端外径为 1.25 mm 的锥形空气冲击波压力探针，如图 2(b)所示。值得注意的是：传感器封装陶瓷插芯直径为 1.25 mm，前面锥形截面最小直径为 0.6 mm，所以，传感器实际直径远远大于光纤直径 125 μm。

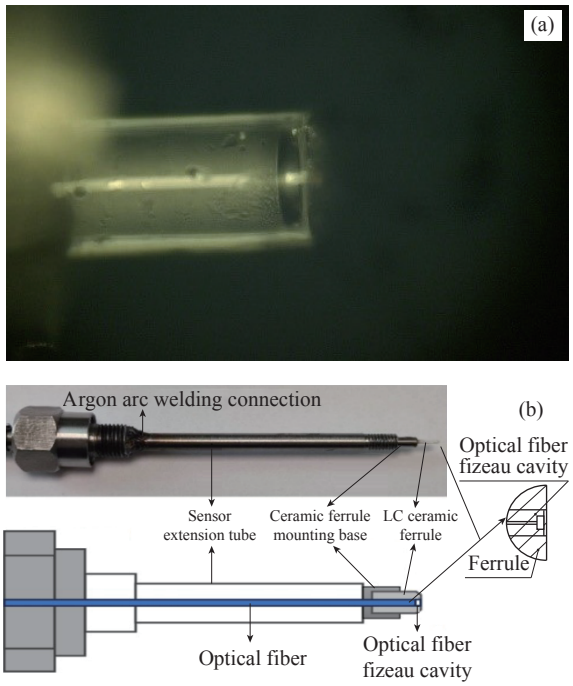


图 2 传感器实物图.(a)Fizeau 腔光学显微镜照片（x500）；(b) 空气冲击波压力封装探头

Fig. 2 Physical photo of the sensor . (a) Optical microscope photo(x500) for the Fizeau cavity; (b) Packaged air shock-wave pressure probe

2.3 传感器指标

根据文献[21]，传感器灵敏度、谐振频率和上升时间是由 SiO_2 薄板的有效半径 R_f、薄板的厚度 d 决定的。下面，直接给出的理论分析结果。

2.3.1 该 Fizeau 腔的干涉相位灵敏度

$$S = \frac{3\pi \cdot R_f^4 \cdot \left(1-\mu_f^2\right)}{4\lambda \cdot E_f \cdot d^3} \quad , \qquad (1)$$

其中，E_f、μ_f 分别为石英薄板的弹性模量和为泊松比；λ 干涉 DFB 激光器输出波长。

2.3.2 谐振频率特性分析

该平面薄板的基频谐振角频率

$$\omega_n \approx 2\pi \cdot \frac{0.47 \cdot d}{R_f^2} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{\rho_f\left(1-\mu_f^2\right)}} \quad , \qquad (2)$$

其中，ρ_f 为石英薄板的密度。对于单自由度二阶

谐振系统而言,当允许误差为 10% 时, 有效带宽为谐振频率点的 1/3[22]。

2.3.3　上升时间分析

对于二阶谐振系统, 假设其阻尼系数为ξ_n, 定义响应输出由满量程的 10% 上升到满量程的 90% 所需要的时间为系统响应上升时间。其表达式自己推导为:

$$t_{r(10\sim90\%)}=\frac{\pi-arctg\left(\frac{\sqrt{1-\xi_n^2}}{\xi_n}\right)}{\omega_n\sqrt{1-\xi_n^2}}\times0.8\quad.\qquad(3)$$

2.4　相位解调系统

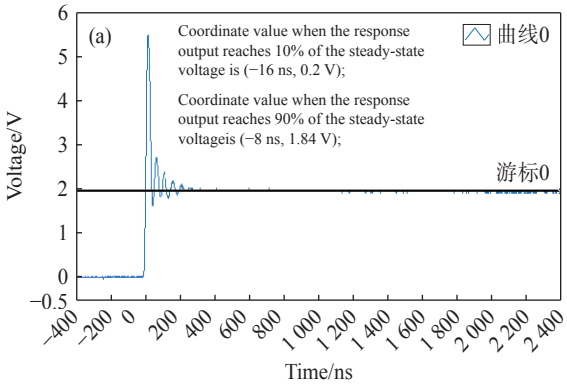
整个传感系统的性能是由光纤端头 Fizeau 腔传感探针和相位解调系统的性能共同决定的。本文信号调理器将采用三波长光源激励、任意确定性相位间隔、被动零差干涉相位解调技术, 见文献[22] 。

2.4.1　激励光源波长的选择

相位解调系统的静态性能是由 F-P 腔腔长和三个激励光源中心波长的共同决定。本实验 F-P 腔腔长 $L=24.29(\mu m)$。为此, 三个激光器中心波长分别选择为 $\lambda_1=1\,528.799\,6(nm)$、$\lambda_2=1\,544.400\,2(nm)$和 $\lambda_3=1\,560.600\,1(nm)$, 三波长相位间隔分别为$\varsigma_1=4\pi L((1/\lambda_1)-(1/\lambda_2))=0.68\pi$和$\varsigma_2=4\pi L((1/\lambda_2)-(1/\lambda_3))=0.68\pi$。这样, 采用三个波长激光对应干涉输出合成真实干涉相位时, 就可以最大程度抑制系统加性和乘法共模干扰噪声[21-22] 。

2.4.2　光电探测器的选择

相位解调器的动态性能取决于光电探测器的带宽和响应速度。本实验采用自制的基于差动结构的高速探测器, 其实测响应时间为 8 nS, 具体测试数据见图 3(a); 探测器谐振频率点为 20 MHz, 具体测试数据见图 3(b)。



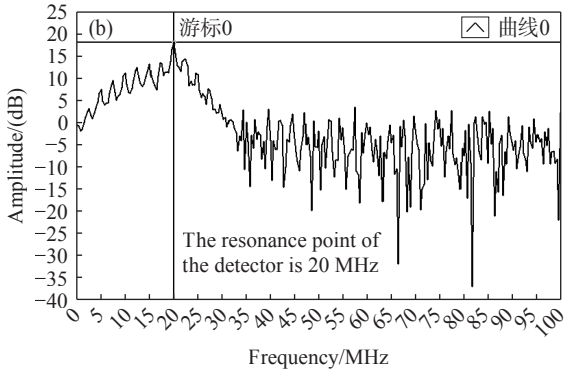


图 3　探测器性能测试数据.(a)时域响应上升时间测试曲线;(b)频域谐振带宽测试曲线

Fig. 3　Detector performance test data. (a)Time-domain response rise time test curve;(b) Frequency domain resonance bandwidth test curve

2.4.3　高速数据存储记录仪

三波长干涉输出电压接入 SDS5104X 四通道、12 位的数字存储示波器, 采样频率为 500 MHz。

3　实　验

3.1　静态压力标定

静态标定是动态定标的前提和基础。按照压力传感器静态检定规程(JJG 860-94)[24], 用活塞式油压定标机对 Fizeau 腔激波压力探针及其相位解调系统进行检定, 即可得到整个传感系统的静态特性。

当高速光电探测器的响应时间为 8 nS 时, 在 2.4 MPa 压力量程范围内, 传感系统的线性度、重复性、回程误差和基本误差分别为 1.09% FS、1.046% FS、1.117% FS 和 3.253% FS, 静态压力定标实验数据及相应的拟合直线, 如图 4 所示, 其静态灵敏度为 2.0962 rad/MPa。

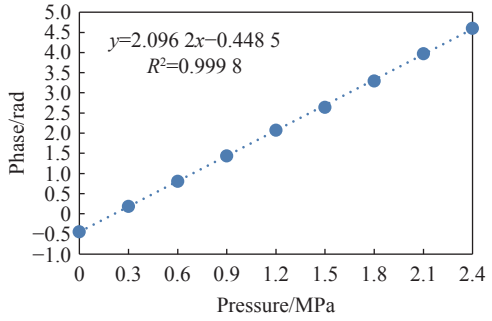


图 4　Fizeau 腔压力探针静态定标实验数据

Fig. 4　Static pressure calibrated data for the Fizeau cavity probe

在 500 倍光学显微镜下，光纤 Fizeau 腔端面照片，见图 5。该 Fizeau 腔平面薄板的实测有效直径是 58.33 μm。

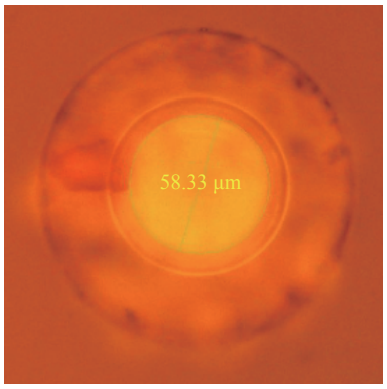


图 5 光纤 Fizeau 腔端面照片

Fig. 5 Photograph of the optical fiber Fizeau cavity end face

平面薄板 SiO_2 材料的泊松比和弹性模量分别为 $\mu_f = 0.17, E_f = 79\ GPa$，光波波长 $\lambda = 1\,550\ nm$。假设平面薄板厚度为 $h = 1.92\ \mu m$，带入公式(1)可推测，其理论灵敏度为 2.095 83(rad/MPa)。这样，实验和理论灵敏度才基本相符。由此逆向推断：该压力敏感薄板厚度为 1.92 μm。

3.2 动态标定实验

对已进行过静态定标实验的传感器(静标数据,见图 4)进行激波管动态定标实验[25]。

激波管动态压力定标采用激波管产生的阶跃压力对压力传感器的动态响应性能进行检定。激波管产生阶跃压力的特征：上升时间≤10 nS，平台压力持续时间：2 000 μS，激波平台峰值压力是由膜片材料特性和厚度决定的，为 0.80 MPa 左右。

将待定标的传感器安装在激波管底部，且保证传感器端面和激波管底部端面齐平。通过激波管产生的阶跃压力激励传感器，对传感器输出信号特征进行分析，即可完成所研制空气冲击波压力传感器的动态标定。传感器在激波管阶跃压力激励下的输出信号曲线，见图 6。

由图 6(a) 可以得到：该激波管的平台峰值压力为 0.813 756 MPa。

由图 6(b) 和图 6(c) 可以得到：激波管动态定标响应输出上升压力达到平台峰值压力 10% 和 90% 的坐标点分别为：(−20 ns, 0.108 82 MPa)和(30 ns, 0.737 775 MPa)。可见：该传感器的上升时间为 50nS。

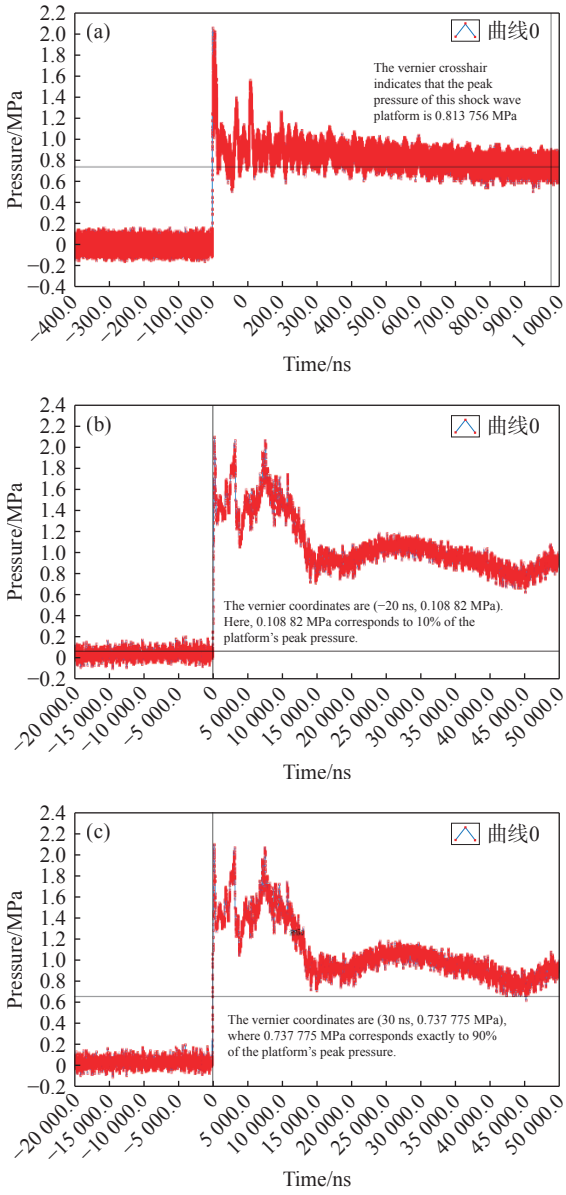


图 6 激波管动态定标实验测定传感器响应时间实验曲线。(a) 激波管峰值压力测定实验曲线；(b) ,(c) 激波管响应输出分别达到平台峰值压力 10% 和 90% 的坐标点测试曲线；

Fig. 6 Shock tube dynamic calibration experiment curve for determining sensor response time. (a) Shock tube peak pressure measurement experiment curve; (b),(c) Test curve of the coordinate point where the shock tube response output reaches 10% and 90% of the plateau peak pressure, respectively.

该传感器 Fizeau 腔的几何尺寸参数为：直径 d=58.33 μm,厚度 h=1.92 μm。根据公式(2)，在空气中，其理论谐振频率为 6.201 01 MHz，假设该 Fizeau 腔薄板振动的阻尼系数为 $\xi_n = 0.3$，根据公

式(3), 其理论上升时间为 40.368 4 nS。可见, 实验实测数据与理论估算数据基本相符。

上述激波管动态定标实验数据表明: 该空气激波压力测试系统的响应时间达到 50 nS, 满足我们强激光诱导不锈钢金属等离子体冲击波的测试需求。该响应时间是由该 Fizeau 腔传感器谐振带宽、高速光电探测器响应时间和高速数据记录仪采样频率三者共同决定的。当 Fizeau 腔平面薄板特征参数: $2R_f = 58.33\ \mu m, h = 1.92\ \mu m, \mu_f = 0.17$, $E_f = 79\ GPa$, 根据公式(2)和(3)可知, 所研制光纤 Fizeau 腔的理论谐振频率为 6.201 01 MHz, 上升时间为 40.368 4 nS, 而探测器上升时间仅为 8 nS。可见, 系统响应时间实际上是由光纤端头 Fizeau 腔的谐振特性决定的。

由于该 Fizeau 腔压力敏感薄板有效直径是由原始材料几何尺寸(石英玻璃毛细管内径 75 μm)和制作工艺 (熔接机微电弧将石英玻璃毛细管和实心光纤熔接在一起) 决定的。在熔接过程中, 石英玻璃毛细管内径由于会发生不可避免的塌缩而缩小, 一般小于为 60 μm。压力敏感薄板厚度是由研磨机精密研磨以及 HF 腐蚀共同决定的。敏感薄板越薄, 其灵敏度越高、测试量程越小、谐振频率越低、响应时间越慢; 反之, 敏感薄板越厚, 其灵敏度越低、测试量程越大、谐振频率越高、响应时间越快。

由于后续用于深紫外激光诱导不锈钢金属产生等离子体冲击波实测实验传感器的灵敏度分别为 1.399 1 rad/MPa(见图 7)和 0.265 3 rad/MPa (见图 9)都小于该定标传感器, 可以推断得到: 其响应时间全部≤50ns。

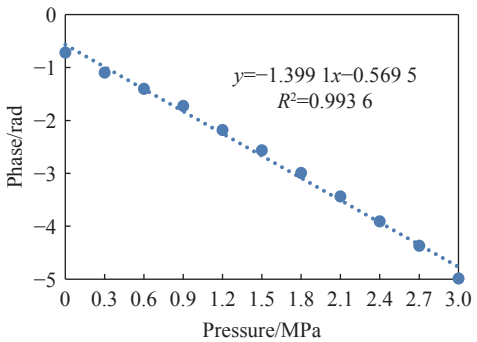


图 7　高灵敏度、低量程实测传感器静态定标曲线

Fig. 7　Static calibration curve of high-sensitivity, low-range measured sensor

3.3　深紫外激光诱导不锈钢金属产生等离子体冲击波实测实验

利用深紫外 351 nm 脉冲激光对不锈钢、特种合金、半导体化合物等超硬材料进行加工时, 有一部分能量是以等离子体冲击波超压的形式转化为声能。为研究该冲击波的力学效应, 需要准确测量该冲击波脉冲特征。

先用低量程传感器, 对深紫外激光诱导不锈钢金属产生的低压等离子体冲击波进行测试。传感器静态定标实验数据, 见图 7, 低压等离子体冲击波测试数据, 见图 8。

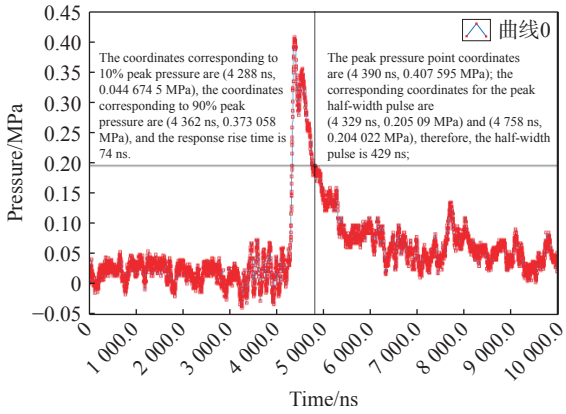


图 8　深紫外激光诱导不锈钢金属产生低压等离子体冲击波实测曲线

Fig. 8　Measured curve of low-pressure plasma shock waves generated on stainless steel induced by deep-ultraviolet laser

图 8 测试曲线的数据分析和结果:

① 峰值压力 10% 对应的坐标点(4288 ns, 0.044 674 5 MPa),峰值压力 90% 对应的坐标点(4 362 ns, 0.373 058 MPa), 所以, 响应上升时间为 74 ns; ② 峰值压力点坐标(4 390 ns, 0.407 595 MPa), 峰值半高脉宽对应坐标点(4 329 ns, 0.205 09 MPa)和(4 758 ns, 0.204 022 MPa), 所以, 半高脉宽为 429 ns。

接着, 用中量程传感器, 对深紫外激光诱导不锈钢金属产生的中压等离子体冲击波进行测试。传感器静态定标实验数据, 见图 9, 中压等离子体冲击波测试数据, 见图 10(a)、10(b) 和 10(c)。

图 10(a)测试曲线的数据分析和结果:

① 峰值压力 10% 对应的坐标点(2 416 ns, 0.868 121 MPa),峰值压力 90% 对应的坐标点(2 486 ns, 7.470 55 MPa), 所以, 响应上升时间为 70 ns;

② 峰值压力点坐标（2526 ns, 8.35422 MPa), 峰值半高脉宽对应坐标点（2456 ns, 4.13364 MPa）和（2984 s, 4.13362 MPa), 因此, 半高脉宽为 528 ns。

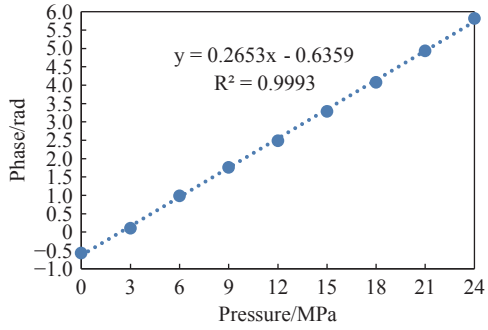
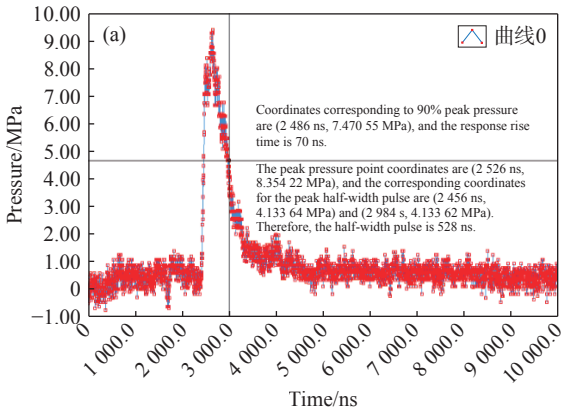


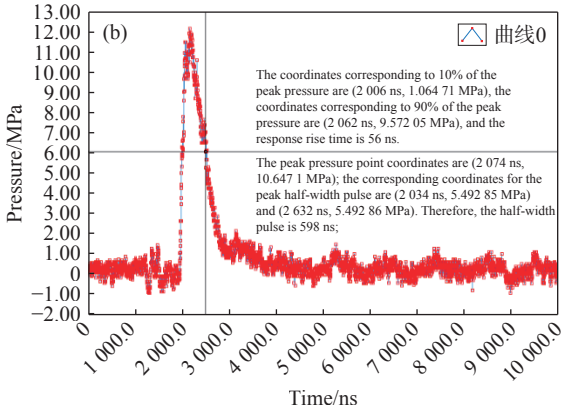
图 9 中量程实测传感器静态定标曲线

Fig. 9 Static calibration curve of medium-range measured sensor

图 10(b)测试曲线的数据分析和结果:

① 峰值压力 10% 对应的坐标点（2006 ns, 1.06471 MPa), 峰值压力 90% 对应的坐标点(2062 ns, 9.57205 MPa), 因此, 响应上升时间为 56 ns; ② 峰值压力点坐标（2074 ns, 10.6471 MPa); 峰值半高脉宽对应坐标点（2034 ns, 5.49285 MPa）和（2632 ns, 5.49286 MPa), 因此, 半高脉宽为 598 ns。





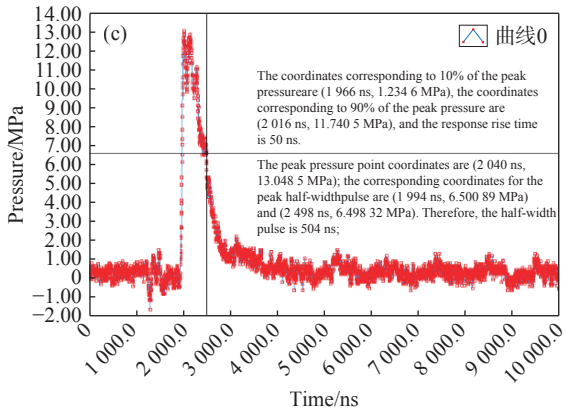


图 10 深紫外激光诱导不锈钢金属产生的中压等离子体冲击波实测曲线。(a)、(b) 和 (c) 为不同能量激励下的三发数据

Fig. 10 Measured curve of medium-pressure plasma shock waves generated on stainless steel induced by deep-ultraviolet laser. (a),(b) and (c) are three sets of data under different energy excitations.

图 10(c)测试曲线的数据分析和结果:

① 峰值压力 10% 对应的坐标点（1966 ns, 1.2346 MPa), 峰值压力 90% 对应的坐标点（2016 ns, 11.7405 MPa), 响应上升时间为 50 ns; ② 峰值压力点坐标（2040 ns, 13.0485 MPa); 峰值半高脉宽对应坐标点（1994 ns, 6.500 89 MPa）和（2498 ns, 6.498 32 MPa), 因此, 半高脉宽为 504 ns。

综合上述实测数据分析结果: 图 8、图 10(a)、10(b) 及 10(c) 所示实测冲击波上升时间依次为 74 ns、70 ns、56 ns 和 50 ns, 半高脉宽分别为 429 ns、528 ns、598 ns 和 504 ns。由于所采用光纤端头 Fizeau 腔冲击波压力测试系统响应时间均小于 50 ns, 所以, 上述测试数据的上升时间就是由实际冲击波的上升时间, 半高脉宽也是实际冲击波的半高脉宽。测试结果是准确、可信的。

4 结 论

本文介绍了一种制作在光纤端头、外径仅 125 μm、全石英光纤 Fizeau 腔冲击波压力传感器, 并配以“三波长、被动零差干涉相位高速解调技术”来进行超快动态压力测试。压力敏感薄板有效直径一般为 60 μm左右, 压力敏感薄板厚度在 1 ~ 5 μm之间, 通过调整 Fizeau 腔压力敏感 SiO_2 薄板厚度, 就可以制作出灵敏度不同的动态压力传感器, 以适应不同量程压力的测试。由于

光纤端头 Fizeau 腔特殊的制作工艺, 决定了传感器微小的尺寸效应; 微小的尺寸效应成就了传感器具有极高的谐振频率(对应着超宽的响应带宽)和(超快的响应速度), 所以, 基于光纤端头 Fizeau 腔封装的动态压力传感器相对于传统压电、压阻冲击波传感器具有更高响应带宽和更快的响应速度。该传感器一般是用在传统压电、压阻传感器由于响应时间不足, 而无法对科学研究中特殊超快压力脉冲测量的场合。

除了本文阐述的超快深紫外强激光诱导不锈钢金属产生等离子体冲击波近场特种测试之外, 传统小药量爆炸近场冲击波测试也可能有需要, 因为小药量爆炸冲击波峰值压力衰减速度快, 要求传感器响应带宽。再者, 爆炸近场存着强电磁干扰, 拒绝传统压电、压阻传感器正常工作。

此外, 发挥光纤传感“既感又传”, 可以实现远距离遥测的优势, 传统化学爆炸领域, 数据记录仪要求离爆源较远的时候(大于 80 米), 也有可能用到。

本文介绍了基于光纤端头 Fizeau 腔结构、响应时间小于 50 nS 的超快冲击波压力传感器。由于光纤端头 Fizeau 腔特殊的制作材料和制作工艺, 决定了传感器具有极其微小的尺寸效应(压力敏感薄板有效直径一般为 60 μm 左右, 压力敏感薄板厚度在 1 ~ 5 μm 之间); 极其微小的尺寸效应成就了传感器具有极高的谐振频率(对应着超宽的响应带宽)和(超快的响应速度), 所以, 基于光纤端头 Fizeau 腔结构的动态压力传感器相对于传统压电、压阻冲击波传感器(响应时间一般在 1 μs 左右)具有更高响应带宽和更快的响应时间。

本文已实验验证了基于光纤端头 Fizeau 腔结构的冲击波压力传感器, 其响应时间小于 50 nS, 远快于目前压电、压阻传感器的响应速度(其最快响应速度仅 1 μs)。

该传感器一般是用在科学研究中, 传统压电、压阻传感器由于响应时间不足, 而无法对科学研究中特殊超快压力脉冲测量的场合。此外, 光纤传感器本质抗电磁干扰, 爆炸近场存着强电磁干扰, 拒绝传统压电、压阻传感器正常工作以及发挥光纤传感“既感又传”, 可以实现远距离遥测的优势, 传统化学爆炸领域, 数据记录仪要求离爆源较远的时候(大于 80 米), 也有可能用到。

参考文献:

[1] Endevco®. Piezoresistive pressure transducer: 8530C-100[R]. Endevco®. **(查阅网上资料, 未找到对应的出版地及年份信息, 请确认补充)**.

[2] Endevco®. Piezoresistive pressure transducer: model 8530BM37-2000[R]. Endevco®. **(查阅网上资料, 未找到对应的出版地及年份信息, 请确认补充)**.

[3] PCB Piezotronics. High frequency ICP® pressure sensor: model 113B27[R]. Walden Avenue Depew: PCB Piezotronics. **(查阅网上资料, 未找到对应的年份信息, 请确认补充)**.

[4] PCB Piezotronics. High frequency ICP® pressure sensor: model 113B22[R]. Walden Avenue Depew: PCB Piezotronics. **(查阅网上资料, 未找到对应的年份信息, 请确认补充)**.

[5] 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.
LIAO Y B, YUAN L B, TIAN Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001. (in Chinese).

[6] RAO Y J, JACKSON D A, JONES R, *et al*.. Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(9): 1685-1695.

[7] MACPHERSON W N, GANDER M J, BARTON J S, *et al*.. Blast-pressure measurement with a high-bandwidth fibre optic pressure sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(2): 95-102.

[8] WATSON S, MACPHERSON W N, BARTON J S, *et al*.. Investigation of shock waves in explosive blasts using fibre optic pressure sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17: 1337-1342.

[9] GANDER M J, MACPHERSON W N, BARTON J S, *et al*.. Embedded micromachined fiber-optic Fabry-Perot pressure sensors in aerodynamics applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 102-107.

[10] PARKES W, DJAKOV V, BARTON J S, *et al*.. Design and fabrication of dielectric diaphragm pressure sensors for applications to shock wave measurement in air[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(7):

1334-1342.

[11] ZOU X T, WU N, TIAN Y, *et al*.. Rapid miniature fiber optic pressure sensors for blast wave measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(2): 134-139.

[12] WU N, ZOU X T, TIAN Y, *et al*.. An ultra-fast fiber optic pressure sensor for blast event measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(5): 055102.

[13] WU N, WANG W H, TIAN Y, *et al*.. Low-cost rapid miniature optical pressure sensors for blast wave measurements[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10797-10804.

[14] WANG W H, WU N, TIAN Y, *et al*.. Optical pressure/acoustic sensor with precise Fabry-Perot cavity length control using angle polished fiber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16613-16618.

[15] WATSON S, GANDER M J, MACPHERSON W N, *et al*.. Laser-machined fibers as Fabry-Perot pressure sensors[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5590-5596.

[16] 殷建雄, 王军, 王昊星, 等. 用于冲击波测量的硅 MEMS 光纤法珀压力传感器[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 452-459.
YIN J X, WANG J, WANG H X, *et al*.. Fiber-optic Fabry Perot pressure sensor for shock wave measurements based on silicon MEMS[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 452-459. (in Chinese).

[17] 王昭, 吴祖堂, 温广瑞, 等. 一种薄膜式的光纤压力传感技术[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 064101.
WANG ZH, WU Z T, WEN G R, *et al*.. A fiber optic pressure sensing technology based on thin diaphragm structure[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 064101. (in Chinese).

[18] WANG ZH, WEN G R, WU Z T, *et al*.. Fiber optic method for obtaining the peak reflected pressure of shock waves[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15199-15210.

[19] ZILBERMAN S, BERKOVIC G, FEDOTOV-GEFEN A, *et al*.. Shock wave diagnostics with an ultra-short optical fiber probe[J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(8): 085903.

[20] CHU CH L, WANG J J, QIU J Y. Miniature high-frequency response, high- pressure -range dynamic pressure sensor based on all-silica optical fiber Fabry-perot cavity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(12): 13296-13304.

[21] 王俊杰, 刘劲, 傅正义, 等. 超微型全石英光纤 Fizeau 腔水下激波压力传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212010.
WANG J J, LIU J, FU ZH Y, *et al*.. Miniature underwater shock wave pressure sensor based on all-silica optical fiber Fizeau cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212010. (in Chinese).

[22] 王洪业. 传感器工程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997: 148.
WANG H Y. *Transducer engineering*[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1997: 148. (in Chinese).

[23] MACPHERSON W N, KIDD S R, BARTON J S, *et al*.. Phase demodulation in optical fibre Fabry-Perot sensors with inexact phase steps[J]. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 1997, 144(3): 130-133.

[24] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 860-2015 压力传感器 (静态) 检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. JJG 860-2015 Pressure transducer (static)[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2015. (in Chinese).

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 624-2005 动态压力传感器检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJG 624-2005 Verification regulation of dynamic pressure transducers[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2006. (in Chinese).

作者简介：

Wang JunJie (1996—), male, native of Dai County, Shanxi Province, corresponding author received his Ph.D. in Mechanical and Electronic Engineering from Beijing Institute of Technology in 2001. He is currently a professor at the National Engineering Research Center for Fiber Optic Sensing Technology and Networks of Wuhan University of Technology. His main research interests are: High-frequency response fiber optic F-P cavity pressure sensors and their applications in military dynamic testing technology. E-mail: wjj-whut@foxmail.com

王俊杰(1971—), 男, 山西代县人, 通信作者, 2001 年于北京理工大学获得机械电子工程专业博士学位, 现为武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心教授, 主要研究方向为: 高频响光纤 F-P 腔压力传感器及其在军工动态测试技术中的应用。E-mail: wjj-whut@foxmail.com