

超微型全石英光纤 Fizeau 腔水下激波压力传感器

王俊杰^{1*}, 刘劲¹, 傅正义^{2**}, 褚程雷¹, 杨明红¹

¹武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

²武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 介绍了一种制作在光纤端头的超微型 Fizeau 腔水下激波压力传感器,给出了传感器的基本理论和制作工艺;采用被动零差解调技术对该光纤 Fizeau 腔在冲击压力波作用下的瞬态速变干涉相位进行解调;采用活塞式压力计和聚焦式电磁冲击波源进行静态和动态定标实验。在 0~60 MPa 压力量程范围内,系统的定标结果如下:满量程时的线性度、重复性、回程误差和基本误差分别为 3.26%、0.01153%、0.07% 和 3.407%,动态响应时间小于 0.75 μs 。

关键词 传感器; 光纤压力传感器; 光纤 Fizeau 腔; 高频响动态压力; 超微型压力探针

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0212010

Miniature Underwater Shock Wave Pressure Sensor Based on All-Silica Optical Fiber Fizeau Cavity

Wang Junjie^{1*}, Liu Jing¹, Fu Zhengyi^{2**}, Chu Chenglei¹, Yang Minghong¹

¹State Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

²State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract A miniature underwater shock wave pressure sensor based on optical fiber Fizeau cavity is described. The basic theory and fabrication process of this sensor are given. This transient interference phase of the Fizeau cavity acted by shock pressure wave is demodulated by using passive homodyne demodulation technique. A static calibration test and a dynamic calibration test are conducted using a piston-type pressure calibration machine and a focusing-type electro-magnetic shock wave source. The results indicate that the linearity, repeatability, hysteresis, and intrinsic error of the sensor within the full pressure range of 0-60 MPa are 3.26%, 0.01153%, 0.07%, and 3.407%, respectively. The dynamic response time is less than 0.75 μs .

Key words sensors; optical fiber pressure sensor; optical fiber Fizeau cavity; high frequency response dynamic pressure; miniature pressure probe

OCIS codes 120.2230; 120.5475; 120.4640; 120.3930

1 引 言

针对水下冲击波压力测试,目前主要使用压电陶瓷(PZT 或 LiNbO_3)和压电聚合物(PVDF)2 种传感器。它们共同的缺点是无法在高离子辐射环境下正常工作^[1],因此,目前基于水下电爆炸等离子冲击波力学效应的应用和研究,比如对大电流电子加速器自激励水开关等离子体产生冲击波力学效应的

测量和评估^[2],迫切需要一种能在强电磁干扰环境下工作的水下动态压力传感器。光纤具有抗电磁干扰的特性,因此基于光纤技术的水下激波压力传感器是解决水下测试电爆炸或水下强激光爆炸等离子冲击波的首要选择^[3-5]。

光纤法布里-珀罗(F-P)腔传感器具有引导段去敏、点式 F-P 探头易于实现高频响和高空间分辨率测量的特性,是实现水下冲击波测量的最佳方案。

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-09-26; 录用日期: 2018-11-08

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFB0405501)、武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室重点开放基金(2016-KF-3)

* E-mail: wangjj@whut.edu.cn; ** E-mail: zyfu@whut.edu.cn

特别是基于真空沉积工艺在光纤端头制作的以聚合物薄膜为腔体的外本征 F-P 腔,是基于光纤 F-P 腔进行水下高强度聚焦超声(HIFU)测量的研究热点^[6-9]。然而,目前基于真空沉积工艺制备的聚合物薄膜 F-P 腔的耐受性较差,而由物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)工艺在光纤端头制备的薄膜很容易在冲击应力波和空化效应的侵蚀下失效,甚至脱落,因此,基于该工艺制备的聚合物薄膜的 F-P 腔只能进行低强度冲击波测试,最大测量压力不超过 12 MPa,无法满足高幅值动态压力测试的需求。

平面圆形薄板结构是压力传感器最常用的探测结构。当基于超微型平面圆形薄板结构构成的光纤 F-P 腔的 2 个端面反射率较低,以及腔长远大于光纤芯直径时,干涉输出主要取决于 2 个反射端面的第一阶反射光,这与索菲干涉仪极为相似,可称为外本征光纤 Fizeau 腔^[10]。采用不同工艺制作的光纤 Fizeau 腔,其尺寸和性能有很大差异。目前,在引导端头制作 Fizeau 腔(或低精度 F-P 腔)压力传感器的主要工艺有微加工技术和热键合方法,但这 2 种方法都存在不足。

文献[11-14]报道了基于微机电系统(MEMS)微加工^[10-11]、深紫外激光微加工、CO₂激光热熔工艺^[14]等微加工技术,在引导光纤端头制作 Fizeau 腔压力传感器的方法。基于上述工艺制作的 Fizeau 腔用于水下冲击波特种测量时,基于深紫外激光微加工圆形腔^[12]形成的 Fizeau 腔的敏感聚合物薄膜在冲击应力波和空化的作用下,很容易脱落、失效;基于 MEMS 微加工和 CO₂激光器热熔工艺形成的 Fizeau 腔,其自身直径很难达到 125 μm。

文献[15-18]报道了利用热键合的方法将商用 Si 基片表面厚度为 1~3 μm 的氧化物薄膜固定在由焊接多模光纤纤芯腐蚀或由焊接空心石英玻璃毛细管直接形成的微腔表面,形成了直径为 125 μm 的 F-P 腔压力传感器。考虑到压力敏感氧化物薄膜厚度是由 Si 晶片氧化工艺决定的,厚度仅为 1~3 μm,传感器灵敏度太高,不适合用于高冲击压力下的测量,加之氧化物薄膜与石英 F-P 腔腔体的键合温度较低,Si 晶片表面氧化传感薄膜和光纤端头微腔连接的可靠性不高,因此不予采用。

本研究将外径为 125 μm 的空心石英玻璃毛细管直接熔接在切割好的引导光纤端面,经过精密切割,形成 Fizeau 腔的腔体,再在腔体端面熔接直径为 125 μm 的单模光纤(SMF),切割、研磨后形成 Fizeau 腔压力敏感薄膜,经氢氟酸(HF)腐蚀、毛化

后去除压力敏感膜片外表面的反射光,制成直径为 125 μm、全封闭的全石英 Fizeau 腔。该 Fizeau 腔的体积极小,不仅具有极高的空间分辨率和时域高频特性,还具有极高的抗冲击、抗侵彻、耐腐蚀性能。原因如下:1)传感器直径小至 125 μm,直径越小,耐受性越高;2)采用高温电弧将由 SMF 制成的压力敏感薄膜与空心石英玻璃毛细管熔为一体,这种高温熔接工艺决定了压力敏感薄膜在冲击波侵蚀下不会轻易脱落、失效,从而提高了其耐受性。

本文首先分析该 Fizeau 腔的原理,从理论上说明这种压力传感器的可行性;然后给出部分重要参数的计算公式,用于评估传感器的优劣;同时,介绍三波长相位解调系统,将该系统与传感器相结合进行实验,并考察由该工艺制作的超微型全石英光纤 Fizeau 腔水下激波压力传感器的特性。

2 基本原理

2.1 全石英光纤 Fizeau 腔的基本原理

图 1 所示为全石英光纤 Fizeau 腔及其作为动态压力传感器的力学分析,其中 R_{radius} 为薄板的半径。将引导光纤端面反射光 I_1 作为参考光束,压力敏感薄板内表面的反射光 I_2 作为传感光束,从而形成外本征 Fizeau 腔压力传感器。它基于压力敏感薄膜在冲击波作用下产生振动,进而调制传感光束 I_2 与参考光束 I_1 之间的干涉相位,从而感知外界动态压力。由于压力敏感薄板为石英玻璃,在压力敏感薄板外表面会形成反射光 I_3 ,因此,其反向探测干涉输出为

$$I(\lambda) = R_1 + R_2 + R_3 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) - 2\sqrt{R_2 R_3} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + 2\sqrt{R_1 R_3} \cos\left[\frac{4\pi(L + nd)}{\lambda}\right], \quad (1)$$

式中: λ 为干涉激励光源的中心波长; L 为 Fizeau 腔

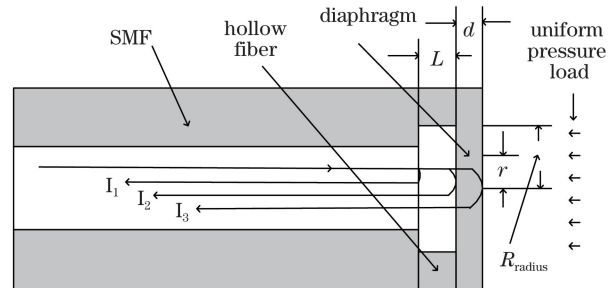


图 1 全石英光纤 Fizeau 腔及其力学分析

Fig. 1 All-silica fiber Fizeau cavity and its mechanical analysis

的腔长; d 为平面薄板的厚度; n 为石英材料的光学折射率; R_1 、 R_2 和 R_3 分别为反射光束 I_1 、 I_2 和 I_3 对应的光强反射率。

当压力敏感薄板研磨变薄时, 反射光 I_3 为实时测量压力敏感薄板厚度提供了有用的信息; 在压力敏感薄板厚度基本确定的情况下, 通过 HF 腐蚀、毛化尽可能减弱甚至消除反射光 I_3 , 以形成全封闭 Fizeau 腔。此时, 其反向探测干涉输出近似为

$$I(\lambda) \approx R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \quad (2)$$

$$\begin{cases} M = \frac{R_{\text{radius}}^2}{3} \\ N_c(r) = \int_0^{R_{\text{radius}}} \left\{ r[Y(r)]^2 + \frac{1}{r} [X(r)]^2 + 2\mu_F X(r)Y(r) \right\} dr \\ X(r) = \left[1 - \left(\frac{r}{R_{\text{radius}}} \right)^2 \right] \frac{r}{R_{\text{radius}}^2} \\ Y(r) = \left[1 - 3 \left(\frac{r}{R_{\text{radius}}} \right)^3 \right] \frac{1}{R_{\text{radius}}^2} \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 动态频率响应特性分析

设 ρ_0 为水介质密度, 并且令 $\alpha = 1/3$, 则水介质在石英平面薄板上的等效共振质量为

$$m_e = 2\sqrt{\alpha^3} \rho_0 R_{\text{radius}}^3 \quad (6)$$

令

$$K = \pi \rho_F d \left(\frac{R_{\text{radius}}^2}{10} \right) \quad (7)$$

式中: d 为平面薄板的厚度; R_{radius} 为平面薄板的半径。则石英敏感薄板的谐振角频率^[16]为

$$\omega = \sqrt{\frac{96\pi D N_c(r)}{6K + 3m_e}} \quad (8)$$

对于单自由度二阶谐振系统而言, 当允许误差为 1% 时, 有效带宽为谐振频率点的 1/10; 当允许误差为 4% 时, 有效带宽为谐振频率点的 1/5^[20]。

2.2.3 上升时间分析

对于二阶谐振系统, 设其阻尼系数为 ξ , 则其上升时间^[21]为

$$t_r = \frac{0.5 + 2.3\xi}{\omega} \quad (9)$$

2.3 Fizeau 腔长与干涉条纹对比度的关系

对于非本征型光纤 Fizeau 腔, 考虑到腔内的光发散损耗, 归一化干涉输出和腔长的关系^[22]为

$$I(L) = \frac{R \left[1 + K(L)^2 - 2K(L) \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right]}{1 + [RK(L)]^2 - 2K(L) \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)} \quad (10)$$

2.2 Fizeau 腔作为动态压力传感器的基本理论

2.2.1 静态灵敏度分析

设形成 Fizeau 腔石英薄板的密度、弹性模量、泊松比分别为 ρ_F 、 E_F 、 μ_F , 薄板的柱面抗挠度^[19]为

$$D = \frac{E_F d^3}{12(1 - \mu_F^2)} \quad (3)$$

则该 Fizeau 腔的干涉相位灵敏度^[19]为

$$S = \frac{4\pi M \times 10^9}{\lambda D N_c(r)} \quad (4)$$

其中,

式中: $K(L)$ 为非本征 Fizeau 腔的损耗系数^[22], 满足

$$\begin{cases} K(L) = \sqrt{1 - \exp\left[-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(L)}\right]} \\ \omega(L) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{L\lambda}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \end{cases} \quad (11)$$

其中 ω_0 和 $\omega(L)$ 分别为引导光纤和 Fizeau 腔体中传播光的模场半径, 且 $\omega_0 = 5.25 \mu\text{m}$ 。当 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时, 对于低精度非本征光纤 Fizeau 腔, 取 $R = 0.02$, 利用 MATLAB 软件中的 envelope 函数, 分别获得 (10) 式中反向探测归一化干涉输出曲线^[19]上、下包络 $I_{\max}(L)$ 和 $I_{\min}(L)$ 。

根据干涉条纹对比度的定义

$$V(L) = \frac{I_{\max}(L) - I_{\min}(L)}{I_{\max}(L) + I_{\min}(L)} \quad (12)$$

可以给出干涉条纹对比度与腔长的关系, 如图 2 所示。由图 2 可知, 当腔长为 $0 \sim 50 \mu\text{m}$ 时, 干涉条纹对比度都大于 0.9, 这为腔长的选择提供了依据。

3 实 验

3.1 全石英 Fizeau 腔制作关键参数的实时测试方法

(1) 式给出了 Fizeau 腔的反向探测干涉输出, 在 Fizeau 腔制作过程中实时测试其 5 个关键参数是非常必要的。因此, 在介绍该 Fizeau 腔制作过程前, 首先介绍制作过程中每一步关键参数的实时测

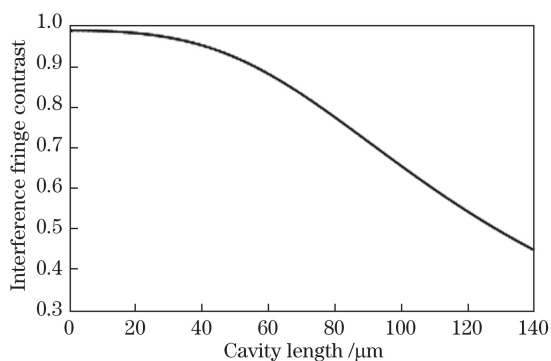


图 2 干涉条纹对比度随腔长的变化曲线
Fig. 2 Variation curve of interference fringe contrast with cavity length

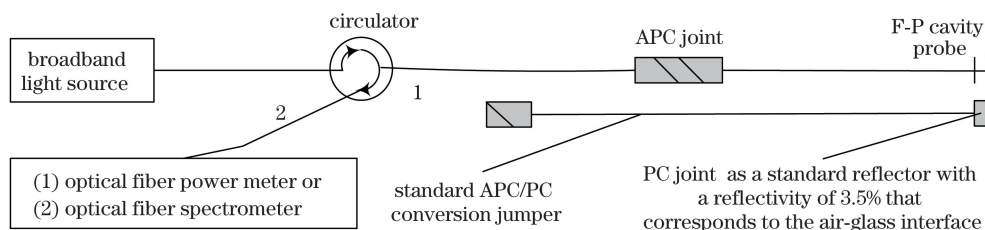


图 3 Fizeau 腔反射传输函数及其关键参数测试方法

Fig. 3 Testing method of Fizeau cavity transfer function in reflection and its key parameters

标准跳线接入。同样,利用光谱仪测取光纤 Fizeau 腔的反向探测光功率密度与扫描波长之间的关系曲线 $R_{F-P}(\lambda)$ 。

3) 以标准跳线测得的光功率谱密度作为基准值,沿扫描波长逐点对 Fizeau 腔光功率密度的测试值按照(13)式进行归一化处理,即可得到 Fizeau 腔反向探测输出传输函数曲线:

$$I_{F-P}(\lambda) = \frac{R_{F-P}(\lambda)}{R_{3.5\%}(\lambda)} \times 3.5\% \quad (13)$$

值得说明的是,对于 Fizeau 腔参考反射面,利用光纤功率计代替光纤光谱仪,该归一化输出为恒定值,即 Fizeau 腔参考反射面的反射率。

4) 采用标准 Fizeau 腔反向探测输出(2)式或采用级联双 Fizeau 腔干涉输出(1)式,对上述数据进行曲线拟合,即可得到该 Fizeau 腔的各种特性:光学腔长 L , 3 个端面反射率 R_1, R_2, R_3 , 压力膜片厚度 d 。

3.2 全石英 Fizeau 腔及激波压力探针的制作过程

Fizeau 腔的制作过程如图 4 所示。Fizeau 腔的制作步骤如下:

1) 利用光纤熔接机将切割好的引导 SMF 与石英玻璃毛细管(外径为 $125 \mu\text{m}$, 内径为 $75 \mu\text{m}$)焊接到一起,如图 4(a)所示。特种焊接参数如下:放电强度为 45 mA , 放电时间为 250 ms , 预熔时间为 80 ms , 光纤推进距离为 $15 \mu\text{m}$, 初始端面间隙为

试方法。图 3 所示为关键参数的实时测试方法。

关键参数的测试步骤如下:

1) 将标准斜角紧密接触/紧密接触(APC/PC)转换跳线的 APC 接头用法兰盘接入环形器端口 1。基于该转换跳线 PC 接头的非涅耳反射效应,利用光谱仪扫描即可获得反射率为 3.5% 的标准具接入时,系统反向探测光功率密度和扫描波长之间的关系曲线 $R_{3.5\%}(\lambda)$, 它包含了宽带光源光谱密度、环形器各光学性能指标随波长变化起伏的特性,以及各连接头的损耗。将它作为光纤 Fizeau 腔反射率归一化处理的参考基准。

2) 将一端为 APC 接头的 Fizeau 腔代替 APC/PC

$20 \mu\text{m}$ 。这样可以保证熔接后的接点不仅可靠而且端面反射率尽可能高,焊接后空心石英玻璃毛细管不变形,内径仍为 $75 \mu\text{m}$ 。

2) 将焊接在引导 SMF 上的石英玻璃毛细管在显微镜下精密切割出适宜的长度($25 \sim 50 \mu\text{m}$),如图 4(b)所示,然后在石英毛细管的另一端焊接端面已切割好的第 2 根 SMF,如图 4(c)所示;这样就制成了光纤 Fizeau 腔。

3) 如步骤 2)所示,在显微镜下将第 2 根 SMF 尽量切短,如图 4(d)所示。

4) 使用专用裸光纤研磨机将切短的 SMF 研磨成厚度为 $5 \sim 23 \mu\text{m}$ 的石英膜片,如图 4(e)所示,所用的研磨纸颗粒粒径为 $5 \mu\text{m}$ 。该 Fizeau 腔在最终研磨后的关键参数如下: $L = 25.08 \mu\text{m}$, $R_1 = 0.0305$, $R_2 = 0.018$, $R_3 = 0.00604$, $d = 10.328 \mu\text{m}$ 。反向探测归一化实验数据和拟合曲线如图 5(a)所示。

5) 使用体积分数为 40% 的 HF 对石英膜片进行腐蚀、毛化,去除石英膜片外表面的反射光,如图 4(f)所示。腐蚀 1 min 后,该 Fizeau 腔关键参数的测试值如下: $L = 24.29 \mu\text{m}$, $R_1 = 0.0295$, $R_2 = 0.0183$, $R_3 = 0.00012$, $d = 8.817 \mu\text{m}$ 。实验数据和拟合曲线如图 5(b)所示。由于敏感薄板外表面的光反射率 R_3 已减小至 0.00012,近似形成了封闭式光纤 Fizeau 腔,因此反向探测干涉输出函数可近似用

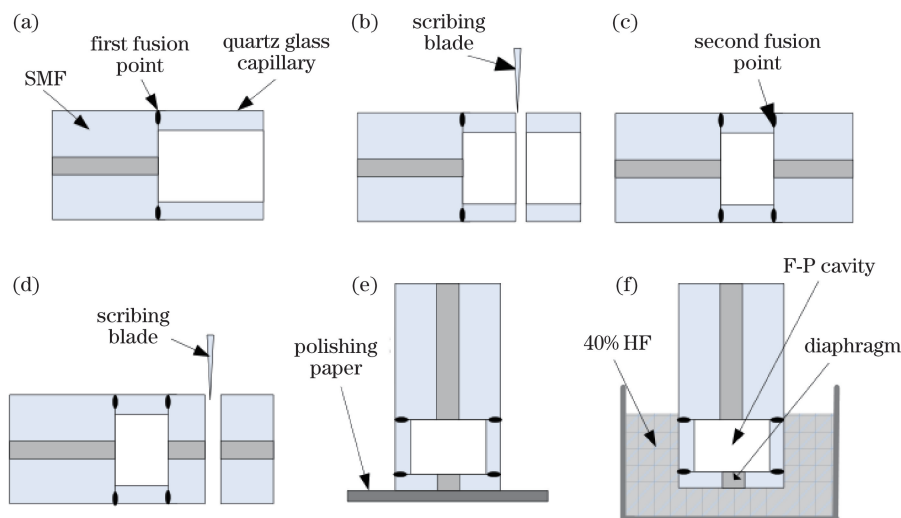


图 4 传感器制作流程。(a) SMF 与石英玻璃毛细管的焊接;(b)石英玻璃毛细管的切割;(c) SMF 的焊接;(d) SMF 的切割;(e) SMF 的研磨;(f) HF 腐蚀 SMF

Fig. 4 Fabrication procedure for pressure sensor. (a) Welding of SMF and quartz glass capillary; (b) slicing of quartz glass capillary; (c) welding of SMF; (d) slicing of SMF; (e) polishing of SMF; (f) corrosion of SMF by using HF

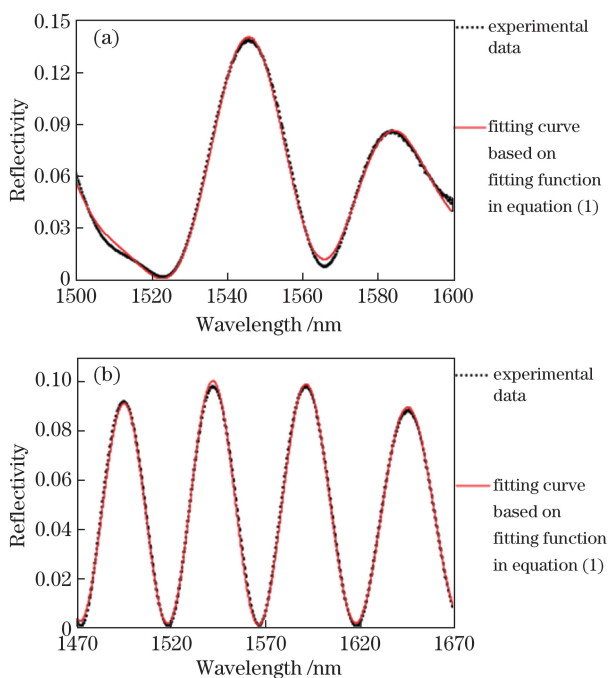


图 5 Fizeau 腔的反向探测传输函数。

(a) HF 腐蚀前;(b) HF 腐蚀后

Fig. 5 Inverse detection transfer function of Fizeau cavity.

(a) Before HF acid corrosion; (b) after HF acid corrosion

(2)式表示。此外,腐蚀速率约为 $1.5 \mu\text{m}/\text{min}$,膜片厚度在腐蚀 1 min 后减薄 $1.5 \mu\text{m}$ 。

6) 实验中制作的 Fizeau 腔如图 6(a)所示,采用不锈钢毛细管封装成水下激波压力探针,如图 6(b)所示,这样便于采用三波长激励进行瞬态速变相位高速线性解调。

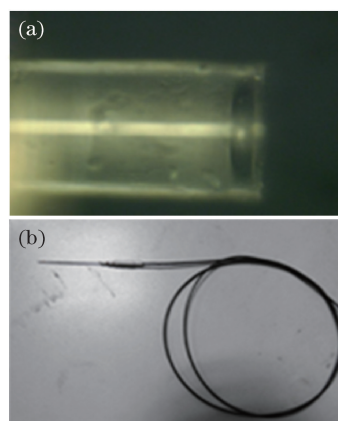


图 6 (a) Fizeau 腔($\times 500$);(b)激波压力探头

Fig. 6 (a) Fizeau cavity($\times 500$);

(b) shock wave pressure probe

3.3 相位解调系统

采用三波长光源激励、任意相位间隔、被动零差干涉相位解调技术对采集到的数据进行变相位高速线性解调^[23]。该相位解调技术可以克服传感器引导段光纤受到诸如弯曲等干扰后引起的功率起伏对解调输出的影响,从而实现用 3 个不同波长的窄调谐范围分布式反馈激光器(DFB 激光器)对腔长接近的 Fizeau 腔传感阵列进行空分多路复用。

解调原理如图 7 所示。3 个具有不同中心波长($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)的 DFB 激光器输出光通过 3×3 耦合器合并在一起,再通过光纤环形器与传感 Fizeau 腔相连。 3×3 耦合器输出端口允许多个 Fizeau 腔通过空分多路复用同时工作。Fizeau 腔各波长反向探测传感信号通过通道间隔为 200 GHz 的解波分复用

器分离开来,并进入自制的高速光电探测器,输出电压接入 NI-PCI5105 型八通道、12 位同步高速数据采集系统,采样频率为 60 MHz。

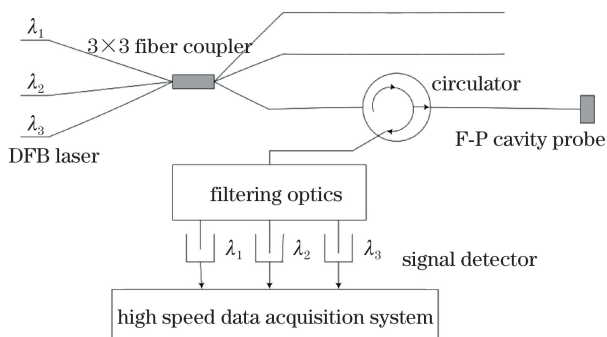


图 7 基于 Fizeau 腔的相位高速解调系统
Fig. 7 Phase high-speed demodulation system based on Fizeau cavity

3.3.1 激励光源波长的选择

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,相位解调系统的性能又取决于 3 个激励光源中心波长的选择和光电探测器带宽的设置。3 个激励光源中心波长的选择应尽量保证各激励波长所获取的传输函数之间的相位间隔在 $0 \sim 2\pi$ 内等间隔均匀分布,这样,采用 3 个波长对应的干涉输出合成真实干涉相位时,才可以最大程度地抑制系统加性和乘性共模干扰噪声^[23]。本实验中 3 个激光器的中心波长分别为 $\lambda_1 = 1532.0 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1548.52 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 1565.5 \text{ nm}$ 。腔长 $L = 24.29 \mu\text{m}$,三波长相位间隔分别为 $\delta_1 = 4\pi L [(1/\lambda_1) - (1/\lambda_2)] = 0.68\pi$ 和 $\delta_2 = 4\pi L [(1/\lambda_2) - (1/\lambda_3)] = 0.68\pi$ 。

3.3.2 光电探测器的选择

光电探测器带宽设计首先必须满足测试系统对响应时间的要求,原因是响应时间是冲击波这种动压测试系统最重要的指标。由于脉冲功率装置(PTS)水开关要求系统的响应时间小于 $1 \mu\text{s}$,因此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 $0.72 \mu\text{s}$ ^[10]。

3.4 静态压力标定

静态标定是动态定标的前提和基础。静态压力标定的具体步骤如下:

1) 设计并制作光纤 Fizeau 腔激波压力探针静压实验密封承载夹具,利用活塞式压力标定机对光纤 Fizeau 腔进行静压加载实验,记录各压力检定点对应 3 个激励光源的干涉输出电压,并进行光强归一化处理,按三波长光源激励、固定相位间隔被动零差相位解调算法进行计算,求出对应的干涉相位。

2) 按照国家计量检定规程 JJG 860—1994《压力传感器(静态)检定规程》对 Fizeau 腔激波压力探针及其相位解调系统进行检定,即可得到激波压力探针及其解调系统的静态特性。

当高速光电探测器的响应时间为 $0.72 \mu\text{s}$ 时,在 $0 \sim 60 \text{ MPa}$ 压力量程范围内,水下激波压力探针满量程时的线性度、重复性、回程误差和基本误差分别为 3.26% 、 0.01153% 、 0.07% 和 3.407% 。静态压力定标实验数据以及相应的拟合直线如图 8 所示,测试灵敏度为 0.0597 rad/MPa ,拟合相关系数的平方 R^2 为 0.9975 。

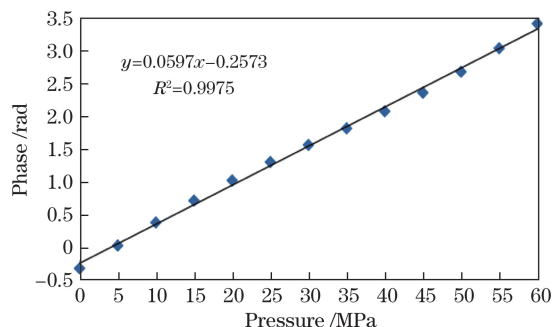


图 8 Fizeau 腔压力探针的静态定标实验数据
Fig. 8 Static pressure calibrated data for Fizeau cavity probe

当 $R_{\text{radius}} = 37.5 \mu\text{m}$, $d = 8.817 \mu\text{m}$, $\mu_F = 0.17$, $E_F = 79 \text{ GPa}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时,根据(3)式可知,理论灵敏度为 0.0605 rad/MPa ,与实验结果基本相符。

3.5 动态定标实验

将聚焦式电磁冲击波源^[24]产生的准 δ 函数压力激波脉冲作为激励源,测定所研制的传感器的动态频率响应特性。该电磁冲击波源产生激波压力脉冲的特征如下:上升时间为 $0.163 \mu\text{s}$,半高脉宽持续时间为 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{s}$,最高峰值压力为 60 MPa 。通过该激波压力脉冲激励,即可对所研制的水下激波压力传感器进行简易的动态标定。具体步骤如下:

1) 通过微调机构将待标定的光纤 Fizeau 腔激波压力探针置于电磁冲击波源的激波压力聚焦区正中央处。

2) 触发电磁冲击波源开关,在聚焦区域产生冲击波来激励待标定的光纤 Fizeau 腔激波压力探针,并通过外触发记录方式记录该光纤 Fizeau 腔激波压力探针在电磁冲击波源激波压力作用下,三波长光源激励瞬态速变相位干涉输出信号。值得注意的是,在外触发开始记录 $140 \mu\text{s}$ 后的数据才是冲击波对压力探针作用的有效数据。

3) 对三路三波长光源激励瞬态速变相位干涉输出信号进行功率归一化处理,按三波长光源激励、

确定性相位间隔被动零差相位解调算法进行计算,合成为一个与激波压力相似的电压信号。

4) 对获取的瞬态速变压力信号进行分析,从时域上直接测取激波压力脉冲的上升沿时间,得到冲击波压力测试系统(包括探针和解调2个部分)的响应时间。

定义输出由满量程的10%上升到满量程的90%所需要的时间为上升时间。图9所示为动态标定实验数据。由图9(a)可知,满量程输出10%的坐标为(0.134383 ms, 0.272775509 rad),对应满量程输出90%的坐标为(0.135117 ms, 0.771253455 rad),上升时间为0.734 μs 。由图9(b)可知,满量程输出10%的坐标为(0.134417 ms, 0.152401499 rad),对应满量程输出90%的坐标为(0.13515 ms, 0.778285296 rad),上升时间为0.733 μs 。说明该水下激波压力测试系统的响应时间小于0.75 μs ,满足PTS水开关等离子体产生冲击波的测试需求。该响应时间是由Fizeau腔探针谐振带宽、高速光电探测器和高速数据记录仪共同决定的。当 $R_{\text{radius}} = 37.5 \mu\text{m}$, $d = 8.817 \mu\text{m}$, $\mu_F = 0.17$, $E_F = 79 \text{ GPa}$ 时,根据(7)式和(8)式可知,所研制的光纤Fizeau腔的理论谐振频率为17.268 MHz,上升时间为0.1355 μs 。可见,系统响应时间实际上是由探测器的带宽决定的。

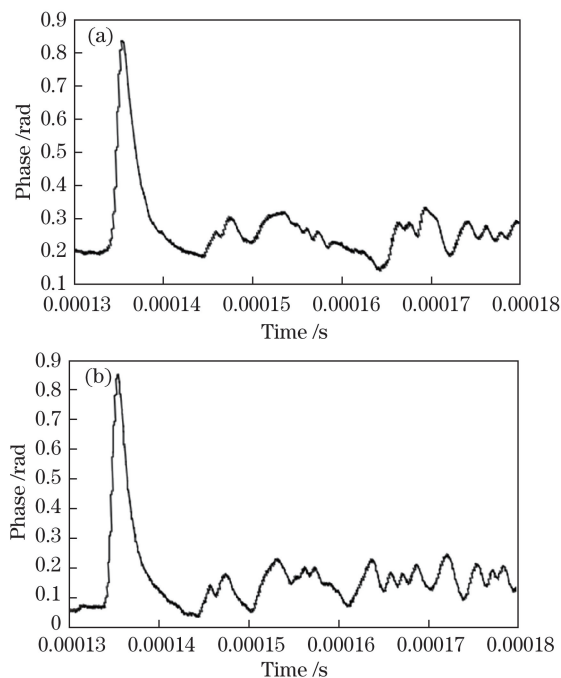


图9 (a)第一发与(b)第二发动态标定实验数据
Fig. 9 (a) The first and (b) the second dynamic calibrated experimental data

3.6 国家某专项工程 PTS 水开关实测

对大电流电子束加速器自击穿水介质开关进行能量脉冲压缩时,有小部分能量以等离子体冲击波超压的形式转化为声能,经常损坏实验装置。为了保证自击穿水介质开关可靠地工作,需要准确测量冲击波脉冲特征,为该科学装置的机械强度设计提供依据。选择光纤传感器对等离子体产生的冲击波进行测试,原因在于等离子这种强电磁干扰介质拒绝传统压电水听器正常工作,而且初始放电电弧极有可能直接将压电传感器击穿、烧坏。

光纤 Fizeau 腔激波压力探针指标为:灵敏度 0.059 rad/MPa,响应时间小于 0.8 μs 。传感器采用机械固定的方式,使传感器正对水开关爆源。引导光纤用金属波纹管加固保护,并用热缩管热固化进行防水处理,Fizeau 腔解调器和高速数采系统放置于专用的电磁屏蔽室内。数据的记录方式为 PTS 实验装置同步外触发。

图 10(a)、(b)、(c)所示分别为 Laser 0、Laser 1、Laser 2 这 3 个激光光源对应的干涉输出电压 CH0、CH1、CH2,图 10(d)所示为基于三波长解调最终合成的冲击波压力脉冲信号。值得注意的是,虽然 Fizeau 腔解调器和高速数采系统放在专用的电磁屏蔽室内,但它与整个 PTS 装置是共地的,因此在外触发 390 μs 后电爆炸瞬间,通过地线耦合的电磁干扰仍然存在。幸运的是,三波长解调方法对理想的加性和乘性共模噪声具有很强的抑制能力^[23],在采用三波长干涉输出电压合成干涉相位的过程中,该共模干扰已基本自动对消。

4 结 论

介绍了一种在光纤端头制作外径仅为 125 μm 、全石英、反射输出接近理想正弦双光束干涉输出的全封闭光纤 Fizeau 腔,并利用三波长光源激励、任意确定性相位间隔、被动零差解调技术来实现高频响动态压力测试。通过压力敏感薄膜厚度控制技术可以适应不同量程的动态压力的测量。在 0~60 MPa 的压力量程范围内,当光电探测器的响应时间为 0.72 μs 时,该动态压力传感系统满量程时的线性度、重复性、回程误差和基本误差分别为 3.26%、0.01153%、0.07% 和 3.407%,动态响应时间小于 0.75 μs 。给出了该系统成功测取 PTS 水开关等离子体产生冲击波的实验数据,同时验证了该三波长解调技术对系统加性和乘性共模噪声具有理想的抑制能力。

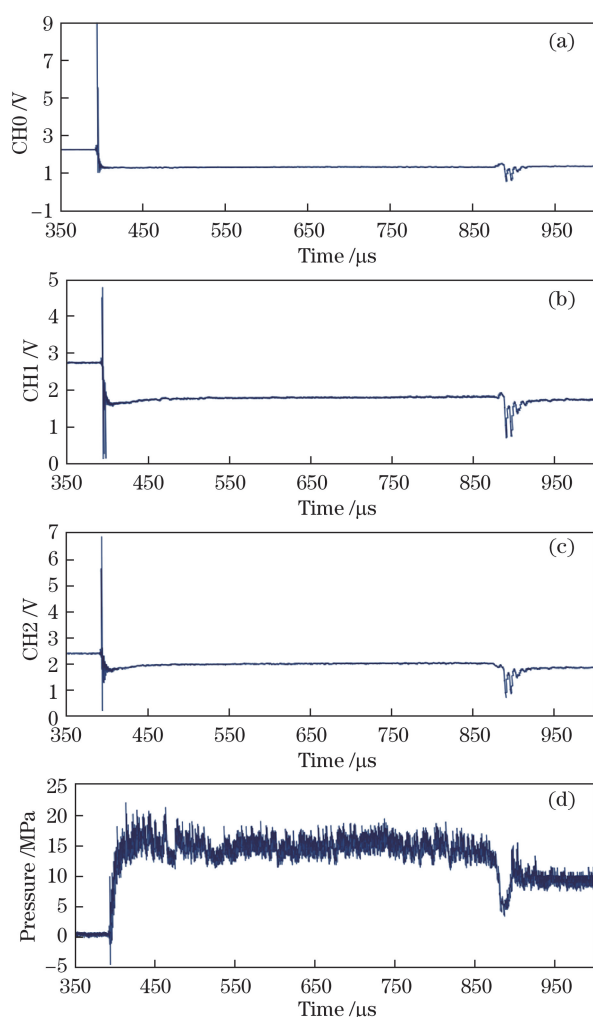


图 10 PTS 水开关实测数据。(a) Laser 0 对应的原始输出电压;(b) Laser 1 对应的原始输出电压;(c) Laser 2 对应的原始输出电压;(d)基于三波长激光干涉输出合成的冲击波压力曲线

Fig. 10 Measured data of PTS water switch. (a) Original output voltage corresponding to Laser 0; (b) original output voltage corresponding to Laser 1; (c) original output voltage corresponding to Laser 2; (d) shock wave pressure curve synthesized by three-wavelength laser interference output

针对高频响动态压力测试,在某些传统压电、压阻传感器不能使用的场合,诸如强电磁干扰、极端高温环境、远距离遥测和要求传感器极其微小的场合,该传感器具有潜在的应用前景。轻武器枪膛打微孔射击枪膛膛压的测试要求传感器最大直径仅为 1 mm,而且对瞬态高温不敏感,该传感器具有一定的不可替代性。该全石英 Fizeau 腔压力传感器不仅尺寸微小,而且符合国际标准 ISO 10993《生物适应性标准》,可通过柔性、微创封装结构直接插入动物头颅、动物血管或其他有机生物组织内进行压力

监测,因此在生物医学领域也有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Beard P C, Mills T N. Extrinsic optical-fiber ultrasound sensor using a thin polymer film as a low-finesse Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(4): 663-675.
- [2] Vandevender J P. The resistive phase of a high-voltage water spark[J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(5): 2616-2620.
- [3] Chen W M, Lei X H, Zhang W, *et al.* Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010. 陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328010.
- [4] 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. 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.
- [5] Song P, Jin Z G, Li A, *et al.* Refractive index measurement of liquid based on open fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204007. 宋鹏, 荆振国, 李昂, 等. 基于光纤开放式法布里-珀罗干涉仪的液体折射率测量[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204007.
- [6] Beard P C, Mills T N. Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer film interferometer[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(9): 801-803.
- [7] Beard P C, Hurrell A M, Mills T N. Characterization of a polymer film optical fiber hydrophone for use in the range 1 to 20 MHz: a comparison with PVDF needle and membrane hydrophones [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2000, 47(1): 256-264.
- [8] Morris P, Hurrell A, Shaw A, *et al.* A Fabry-Pérot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(6): 3611-3622.
- [9] Wang J J, Wang M, Xu J, *et al.* Underwater blast wave pressure sensor based on polymer film fiber Fabry-Perot cavity[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6494-6502.
- [10] 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.

- [11] 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(6): 1337-1342.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Xu J C, Pickrell G, Wang X W, *et al.* A novel temperature-insensitive optical fiber pressure sensor for harsh environments[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(4): 870-872.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Wang W H, Wu N, Tian Y, *et al.* Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9006-9014.
- [18] 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.
- [19] Wang J J, Jiang D S, Xie G M, *et al.* Research of the planar optical fiber Bragg grating hydrophone probe[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(4): 343-348.
王俊杰, 姜德生, 谢官模, 等. 一种平面型光纤光栅水听器探头技术的研究 [J]. *声学学报*, 2007, 32(4): 343-348.
- [20] Damion P. Means of dynamic calibration for pressure transducers[J]. *Metrologia*, 1994, 30(6): 743-746.
- [21] Fan S C, Zhou H M. Signal and testing technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002: 352.
樊尚春, 周浩敏. 信号与测试技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 352.
- [22] Jiang S J, Zeng B, Wang H Z, *et al.* A study on the theoretical model of white-light interfered EFPI optical fiber strain sensor[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2005, 18(1): 165-170.
江绍基, 曾斌, 汪河洲, 等. 白光干涉型 EFPI 光纤应变传感器理论模型的研究 [J]. *传感技术学报*, 2005, 18(1): 165-170.
- [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]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 144(3): 130-133.
- [24] Reichenberger H. Lithotripter systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 76(9): 1236-1246.