

光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展

李自亮 廖常锐 刘申 王义平

Research progress of in-fiber Fabry-Perot interferometric temperature and pressure sensors

Li Zi-Liang Liao Chang-Rui Liu Shen Wang Yi-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 070708 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070708

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070708>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究

Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing

物理学报.2017, 66(7): 070702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070702>

基于光纤微结构加工和敏感材料物理融合的光纤传感技术

Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films

物理学报.2017, 66(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070703>

单模光纤中用声波导布里渊散射同时测量温度和应变

Simultaneous measurement on strain and temperature via guided acoustic-wave Brillouin scattering in single mode fibers

物理学报.2016, 65(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.240702>

基于椭圆腔共振的石英增强光声光谱理论研究

Theoretical research on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy base on the resonance in an elliptical cavity

物理学报.2016, 65(19): 190701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.190701>

一种采用双换能器和摆式结构的宽频振动能量采集器

A broadband vibration energy harvester using double transducers and pendulum-type structures

物理学报.2016, 65(13): 130701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130701>

专题: 光纤传感

光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展*

李自亮 廖常锐 刘申 王义平†

(深圳大学光电工程学院, 光电子器件与系统教育部重点实验室, 深圳 518060)

(2017年1月19日收到; 2017年2月24日收到修改稿)

光纤法布里-珀罗干涉温度和压力传感器具有灵敏度高、制作简单、成本低、体积小和抗电磁干扰能力强等优点, 已被广泛应用于军事和民用领域. 在某些环境恶劣, 如具有强电磁干扰和腐蚀性, 或提供给传感器的安装空间非常有限的特殊工业领域, 微型光纤温度和压力传感器发挥着重要的作用, 国内外诸多高校、科研院所都在对其进行研究. 本文综述了光纤法布里-珀罗干涉仪的基本原理、制备技术、及其压力和温度传感应用的研究进展. 详细介绍了湿法化学腐蚀制备法、电弧放电制备法、飞秒激光制备法、聚合物辅助制备法等常见光纤法布里-珀罗腔传感器的制作工艺, 分析了不同制作工艺的优缺点; 详细介绍了光纤法布里-珀罗干涉仪在温度传感、压力传感和温压一体传感领域的应用; 最后对光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感器的发展进行了总结和展望.

关键词: 光纤传感器, 法布里-珀罗干涉仪, 温度传感器, 压力传感器

PACS: 07.07.Df, 87.85.fk, 88.10.gk, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.66.070708

1 引言

光纤传感技术的发展始于20世纪70年代, 是光电技术发展最活跃的分支之一^[1-3]. 近十余年, 随着半导体光电技术、光纤通信技术以及计算机技术等相关技术的进步, 光纤传感技术迅速发展. 光纤传感器具备独特的优势, 比如抗电磁场干扰、绝缘性高、灵敏度好等诸多优点. 典型的传感器件包括光纤陀螺仪、光纤水听器、光纤电流传感器、光纤压力传感器及光纤温度传感器, 适于在医疗、航空航天、桥梁建筑、高温油井和国防等领域应用^[4-7]. 比如, 在医学领域, 利用光纤压力传感器在手术过程中对动脉和静脉的血压、颅内压、心内压等的实时监测.^[4] 其中光纤压力传感器已经产品化, 比如美国强生Codman有创颅内压监测仪以及加拿大FISO光纤压力传感器公司等^[8,9].

自从1988年Lee和Taylor^[10]首次成功制备了本征型法布里-珀罗干涉 (intrinsic Fabry-Perot interferometric, IFPI) 光纤传感器和1991年Murphy等^[11]首次成功制备了非本征型法布里-珀罗干涉 (extrinsic Fabry-Perot interferometric, EFPI) 光纤传感器以来, 光纤法布里-珀罗型传感器逐渐成为光纤传感器家族中的重要成员. 目前, 常见的F-P腔光纤温度和压力传感器的制备方法包括: 湿法化学腐蚀制备法^[12-15]、电弧放电制备法^[16-18], 飞秒激光制备法^[19-21]、聚合物辅助制备法^[22-24]等. 2005年, Donlagic和Cibula^[12]提出了基于膜片设计的全光纤法布里-珀罗(F-P)腔压力传感器结构, 利用氢氟酸腐蚀膜片, 使膜片尽可能薄, 并通过压力容器装置进行实时监测, 以便得到设计的灵敏度. 2011年, Ma等^[16]利用电弧放电的方式在光纤端面制作出微米厚度的空气腔制作完成的压力传感器的压力灵敏度高达约315 mp/MPa, 具有较

* 国家自然科学基金(批准号: 61635007, 61425007, 61377090, 61575128)、广东省自然科学基金(批准号: 2014A030308007, 2014B050504010, 2015B010105007, 2015A030313541)、深圳市科技创新委员会项目(批准号: GJHZ2015031309375575, JCYJ20160520163134575, JCYJ20160427104925452)和珠江学者项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ypwang@szu.edu.cn

好的高温 (600 °C) 稳定性. 2007 年, Wei 等 [20] 利用飞秒激光制备了微型法布里-珀罗干涉仪 (micro Fabry Perot interferometer, MFPI), 其测试温度高达 1100 °C. 此外, Hill 等 [22] 利用 SU-8 复合材料研制的压力传感器在微电子机械系统 (micro electro mechanical systems, MEMS) 中得到了广泛应用.

本文综述了光纤法布里-珀罗干涉仪的基本原理、制备技术及其压力和温度传感应用的研究进展; 详细介绍了湿法化学腐蚀制备法、电弧放电制备法、飞秒激光制备法、聚合物辅助制备法等常见光纤法布里-珀罗腔传感器的制作工艺, 分析了不同制作工艺的优缺点; 详细介绍了光纤法布里-珀罗干涉仪在温度传感、压力传感和温压一体传感领域的应用; 最后对光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感器的发展进行了总结和展望.

2 光纤 F-P 干涉原理

光纤 F-P 干涉传感器是基于多光束干涉而成的传感机理. 随着 18 世纪末多光束干涉仪的发明而发展, 从一开始研究体积较大的 F-P 干涉仪, 到 20 世纪 80 年代左右出现了体积较小的 F-P 干涉仪, 从此 F-P 干涉仪被逐步地应用于各种传感领域, 也出现了各种结构的 F-P 腔传感器 [25].

一束光以一定角度入射至一对平行板中, 会发生多次反射和折射, 这些相同频率的光会发生干涉, 形成多光束干涉. 干涉过程如图 1 所示, 光从折射率为 n_0 的物质中, 以角度为 θ_1 的入射角进入距离为 d 、中间物质折射率为 n 的平行板中, 光在板内的折射角为 θ_2 , 在板内经过多次反射和折射, 其中任意两束光程差相同的同频光会发生干涉 [26]. 相邻两束光的光程差为

$$\Delta = 2nd \cos \theta_2, \quad (1)$$

对应的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} nd \cos \theta_2. \quad (2)$$

在理想情况下, 平行板对光无吸收, 即透射光 T 和反射光 R 满足

$$R + T = 1. \quad (3)$$

这时, 反射光强为

$$I_r = \frac{F \sin^2(\delta/2)}{1 + F \sin^2(\delta/2)} I_i; \quad (4)$$

同理, 透射光强为

$$I_t = E_t E_t^* = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)}; \quad (5)$$

且反射光强、透射光强满足

$$I_r + I_t = 1. \quad (6)$$

(4) 式和 (5) 式就是干涉强度分布公式, 即艾里公式.

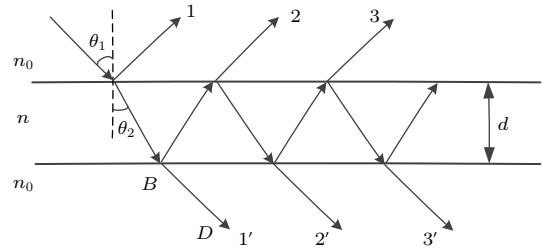


图 1 多光束干涉原理图

Fig. 1. Multi-beam interference principle.

2.1 光纤 F-P 压力传感器干涉原理

一种典型的光纤 F-P 腔压力传感器的基本结构如图 2 所示, 将两根光纤的端面作为反射面, 使两光纤端面严格平行、同轴, 与中空光纤形成一个腔长为 l 的密封光纤 F-P 腔. 当传感探头受到外界均匀分布的压力时, 其腔体轴向变形表达式为

$$\Delta l = \frac{\Delta P l r_o^2}{E (r_o^2 - r_i^2)} (1 - 2\mu), \quad (7)$$

式中: ΔP 为腔体内外压强差; l 是腔体长度; r_i, r_o 分别为腔体内外半径; E 为腔体材料的杨氏模量; μ 为泊松比. 当腔体长度 l 一定时, 其变形量与所受的压强成正比, 而腔体长度的变化影响到光纤内入射光与反射光的光程差, 利用光电探测器等即可实现对光信号的解调, 最终实现对压力的传感.

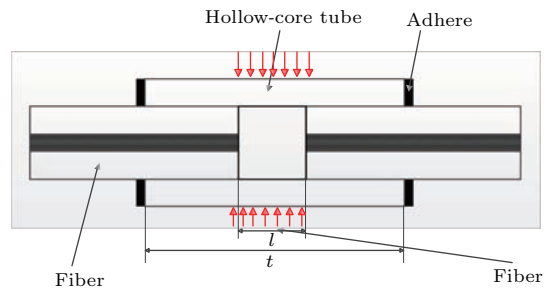


图 2 光纤 F-P 腔压力传感器结构示意图

Fig. 2. Schematic diagram of fiber F-P cavity pressure sensor.

另一种光纤 F-P 腔压力传感器的基本结构如图 3 所示, 由于二氧化硅/空气界面的反射率低

(< 3.5%), 高阶 F-P 干涉可以忽略不计^[17]. 则输出的光强度可以表示为

$$\begin{aligned}
 I &= |E|^2 \\
 &= \left| E_1 - E_2 \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{air}} d\right) \right. \\
 &\quad \left. + E_3 \exp\left[\frac{4\pi}{\lambda} (n_{\text{silica}} t + n_{\text{air}} d)\right] \right|^2 \\
 &= E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 - 2E_1 E_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{air}} d\right) \\
 &\quad - 2E_2 E_3 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{silica}} d\right) \\
 &\quad + 2E_1 E_3 \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (n_{\text{silica}} t + n_{\text{air}} d)\right]^2 \\
 &\approx E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 \\
 &\quad - 2(E_1 E_2 - E_1 E_3) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{air}} d\right) \\
 &\quad - 2E_2 E_3 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{silica}} t\right) \quad (\text{if } t \rightarrow 0), \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中, E_1 , E_2 , 和 E_3 是三束反射波的振幅; d 表示腔长; t 是薄膜厚度; λ 是光波长; n_{air} 和 n_{silica} 分别是空气和 SiO_2 的折射率.

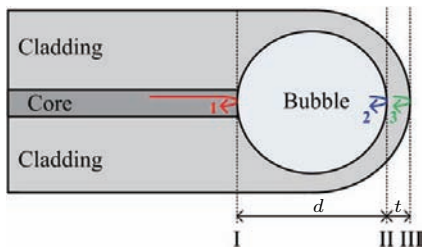


图3 光纤 FPI 空气腔示意图^[17]

Fig. 3. Schematic diagram of the fiber-tip FPI^[17].

2.2 光纤 F-P 温度传感器干涉原理

燕山大学毕卫红教授所设计的 F-P 光纤温度传感器的基本结构如图 4 所示^[27]. 光纤温度传感是依据把被测的温度转换为光纤 F-P 干涉长度 L 的变化来测量分析的原理进行设计的. 根据应力应变与温度的关系, 对于直角笛卡尔坐标 (x, y, z) 由被测物体的温度变化引起的应变分量为^[28]

$$X_{xx} = X_{yy} = X_{zz} = kT, \quad (9)$$

$$X_{xy} = X_{yz} = X_{zx} = 0, \quad (10)$$

式中, k 为物体的热膨胀系数; X_{ij} ($i, j = x, y, z$) 表示被测物体在 i, j 方向上的应变分量. 若只考虑光

纤温度传感器的轴向应变 $X_{zz} = \Delta L/L$ ^[29], 则有

$$\Delta L/L = kL. \quad (11)$$

将两根端面镀膜的多模光纤插入到空芯光纤中, 形成 F-P 干涉腔. 其中入射光纤用胶固定, 调节反射光纤直到有合适的腔长值后, 用胶固定. 从入射光纤进入的光经过端面 M2 后一部分透射, 一部分反射形成第 1 束反射光; 透射光经 F-P 腔射到反射光纤的端面 M2 上, 被 M1 反射. 光再经 M2 返回到入射光纤, 与第 1 束反射光形成干涉光. 由于 F-P 干涉仪的腔长与温度载荷有一定关系, 当温度发生变化时, 使 F-P 腔长发生改变, 从而改变输出光的强度, 利用光电探测器即可实现对光信号的解调, 从而实现温度的传感.

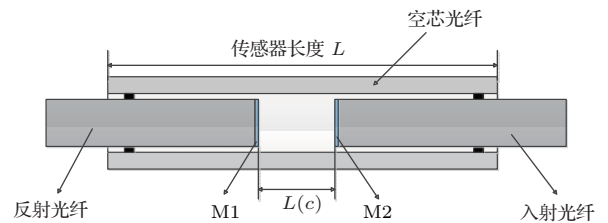


图4 光纤 F-P 温度传感器

Fig. 4. F-P fiber temperature sensor.

3 光纤 F-P 腔传感器制备技术

国内外诸多科研机构对光纤 F-P 腔温度和压力传感器进行了广泛的研究, 形成了多种多样的制备方法. 基于制备方法、传感器材料的不同, 也已经研制出多种类型的光纤 F-P 腔温度和压力传感器. 不同的制备方法各有优势, 且通过不同制备方法得到的光纤 F-P 腔传感器的光学特性也各不相同, 以下对常见的光纤 F-P 腔传感器的制备方法进行简单描述.

3.1 湿法化学腐蚀制备法

湿法化学腐蚀是出现较早也是较常见的光纤 F-P 腔传感器的制备方法, 它是使用液态腐蚀剂有目的性的移除材料, SiO_2 的湿法化学腐蚀几乎都用添加或不加氟化氨 (NH_4F) 的含水氢氟酸来腐蚀^[30,31]. 湿法化学腐蚀在光纤传感主要是用于光纤 F-P 压力传感器硅膜片的制备. 湿法化学腐蚀工序需要考虑有效的腐蚀剂、腐蚀选择性、腐蚀速率等影响因素.

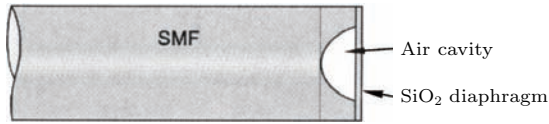


图5 二氧化硅膜片压力传感器 [12]

Fig. 5. Pressure sensor with a SiO₂ diaphragm [12].

2005年, Donlagic和Cibula [12]提出了基于膜片设计的全光纤F-P腔压力传感器, 其结构如图5所示. 它的工作机理是采用对压力敏感的SiO₂膜片作为光学反射平面, 当膜片随着压力的变化产生位移时, F-P腔腔长也相应地随之发生变化.

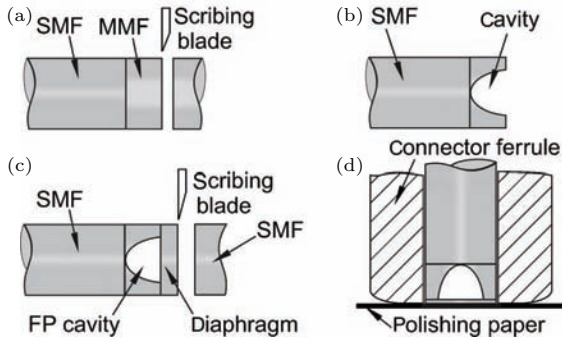


图6 压力传感器制备流程 [12]

Fig. 6. Fabrication procedure for the pressure sensor [12].

这种压力传感器制备流程如图6所示. 将外径相同的单模光纤和多模光纤熔接在一起, 然后切割多模光纤至40 μm, 对多模光纤的另一个端面进行刻蚀, 刻蚀完成后, 与另一单模光纤熔接. 熔接后, 先利用比长仪切割单模光纤, 使其厚度不大于20 μm; 完成传感器主体部分的加工后, 将光纤插

入金属套, 分别用3, 0.5 μm 砂纸对膜片进行研磨, 直至膜片厚度为3—5 μm. 最后再利用氢氟酸腐蚀膜片, 使膜片尽可能薄. 在进行膜片刻蚀时使用如图7所示的压力容器装置进行实时监测, 以便得到设计的灵敏度. 腔内刻蚀控制和打磨SiO₂膜片的控制是此类传感器制作的难点.

2006年, Zhu等 [13]提出了一种高温压力传感器, 其制备流程如图7所示. 熔接纤芯直径为62.5 μm的渐变折射率光纤(纤芯掺Ge包层不掺杂)和纤芯直径为105 μm的阶跃折射率光纤(纤芯不掺杂包层掺F). 然后切割纤芯直径为105 μm的阶跃折射率光纤, 切割完成后与另一单模光纤熔接, 再切割纤芯直径为62.5 μm的渐变折射率光纤, 然后利用氢氟酸腐蚀, 待渐变折射率光纤的纤芯腐蚀完全后, 与如图8(a)所示步骤制备好的样品熔接, 然后重复图8(b)的步骤.

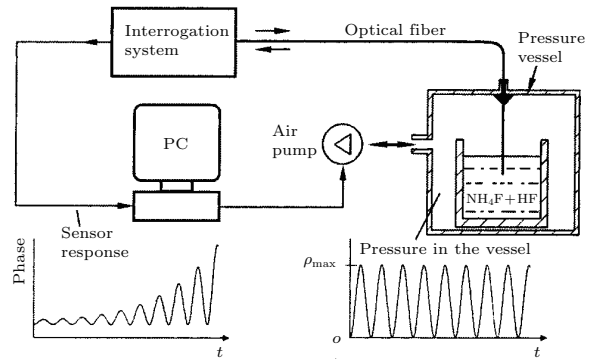


图7 膜片厚度控制系统 [12]

Fig. 7. System for tuning pressure sensors [12].

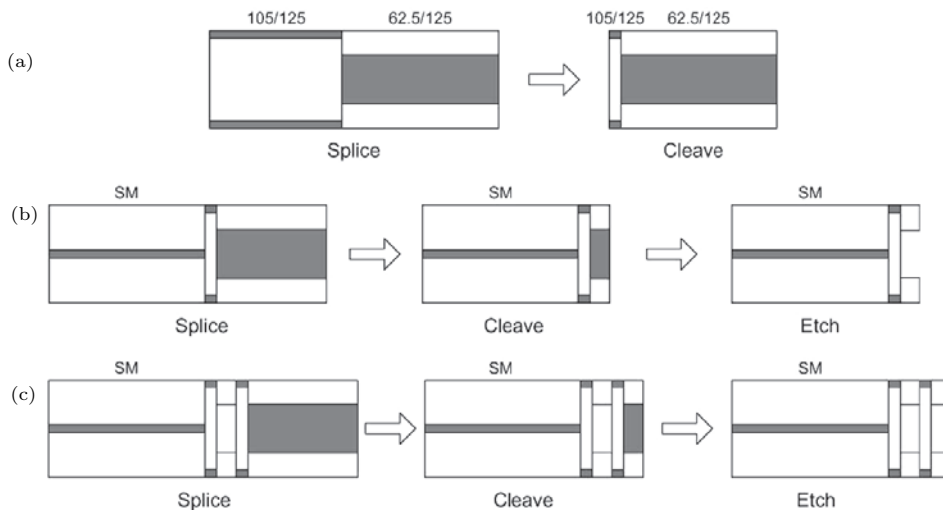


图8 高温压力传感器的制备流程 [13]

Fig. 8. Fabrication procedure for the high temperature pressure sensor [13].

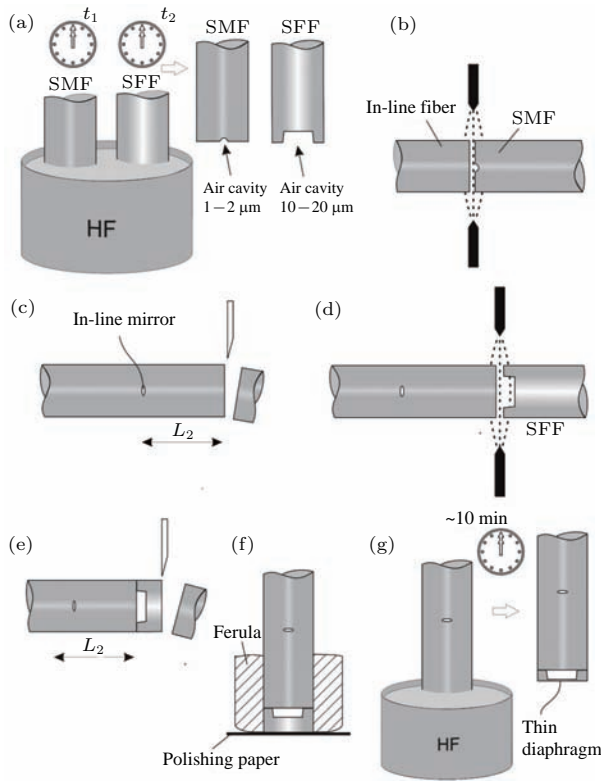


图9 温压一体传感器的制备流程 [14]
 Fig. 9. Fabrication procedure for temperature and pressure sensor [14]

2012年, Pevec 和 Donlagic [14] 提出了一种适用于压力和温度同时测量的 F-P 干涉仪. 通过制备腔长各不相同的 F-P 腔来实现对温度和压力的同时测量. 其制备流程如图 9 所示, 将切平的单模光纤和传感光纤 (sensor-forming fiber, SFF) 置于氢氟酸溶液中, 腐蚀时间分别为 t_1 和 t_2 , 然后将单模光纤腐蚀端与另一单模光纤熔接, 未被腐蚀的一端切平后与 SFF 的腐蚀端熔接, 再通过精密切割、抛模、HF 酸腐蚀形成对压力敏感的 SiO_2 膜片.

制备完成的 F-P 干涉仪如图 10 所示. 第一个 F-P 腔位于光纤端面的短空气腔, 该空气腔采用 SiO_2 膜片来实现对压力的响应. 第二个 F-P 腔基于光纤中光的传输对折射率的依赖特性来实现传感器的温度测量功能. 通过分辨两个谐振腔的光谱信号来实现对所施加压力和温度的准确测定.

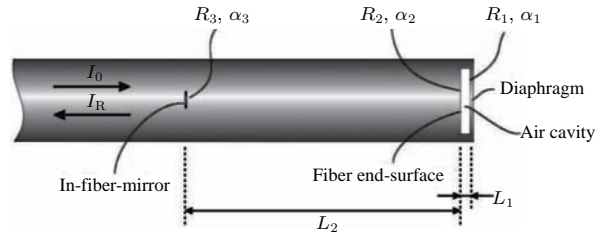


图 10 FP 干涉仪结构示意图 [14]
 Fig. 10. Schematic diagram of F-P interferometer [14].

2015年, Poeggel 等 [15] 提出了一种类似上述结构的光纤压力和温度传感器 (optical fiber pressure and temperature sensor, OPFTS), 其结构示意图如图 11 所示. 制备工艺包括: 将光纤布拉格光栅 (FBG) 用内外径为 $130 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 的玻璃管封装; 封装完成后, 再与直径为 $200 \mu\text{m}$ 的多模光纤熔接, 精密切割至 $20 \mu\text{m}$ 左右, 再用 $0.3 \mu\text{m}$ 砂纸进行研磨, 直至膜片厚度为 $6\text{--}10 \mu\text{m}$. 然后再用氢氟酸腐蚀厚度至 $2 \mu\text{m}$. 压力和温度的测量是通过内置的 FBG 和端面 F-P 腔来实现的.

通过湿法化学腐蚀来制备 F-P 腔干涉仪, 是近年来比较常见的制备方法. 该方法无需激光曝光, 无需光纤具有光敏性, 制作成本低, 简单易行. 可直接使用氢氟酸等腐蚀剂有目的地移除材料, 但腐蚀效果难以控制, 要求对腐蚀速率精确的控制.

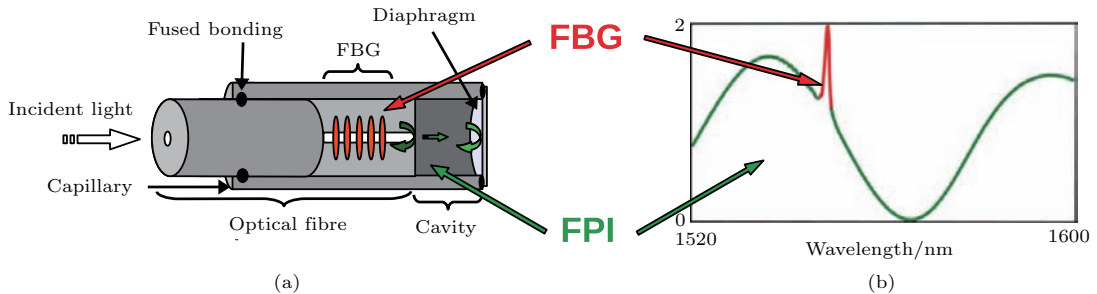


图 11 (a) 基于内置 FBG 的 OFPTS 的结构示意图; (b) OFPTS 的光谱图: FBG 的波峰与 FPI 干涉光谱的重叠位置 [15]

Fig. 11. (a) Schematic diagram of OFPTS based on a SMF with internal FBG; (b) OFPTS spectrum: illustrating the super position of the FBG peak and the broadband FPI spectrum [15].

3.2 电弧放电制备法

电弧放电制备光纤 F-P 腔温度或压力传感器是一种实验装置简单、可控性好的制备方法, 并且可自由调节放电电流和放电时间, 通过重复放电来实现对薄膜厚度的控制. 这种方法不足之处是电弧放电区域较大, 放电位置不够精确, 限制了空气腔的制备, 并且电极容易氧化影响放电强度的稳定性 [32].

2011 年, Ma 等 [16] 利用电弧放电的方式在光纤端面制备出微米厚度的空气腔, 气压灵敏度为 315 pm/MPa. 其制备流程如图 12 (a)–(c) 所示, 将内外径为 75 μm 和 126 μm 的玻璃管与普通单模光纤熔接, 然后切割玻璃管至 50 μm 左右; 另一端连接到装有氮气的气压室, 随着玻璃管内部持续增压, 玻璃管壁可以减小到只有几微米的厚度, 但管壁不至于破裂; 最后通过控制电弧放电参数使管线端面形成气泡腔结构. 氮气压力的控制和电弧放电参数的控制是此类传感器制作的难点.

2014 年, Liao 等 [17] 提出了一种亚微米厚度薄膜的新型 F-P 干涉仪. 通过改进优化的放电技术在光纤端面制备亚微米级厚度的全硅薄膜. 这种亚微米厚度薄膜的新型 F-P 干涉仪制备流程如图 13 所示, 将两单模光纤的端面热熔成弧面, 通过调节电弧放电参数来控制弧面尺寸; 在弧面上涂抹液体,

然后设置参数熔接, 由于放电过程中液体汽化使熔接点形成一个空气腔; 设置马达参数对空气腔施加适当轴向应力进行拉伸, 在拉伸过程放电, 使该气泡分成两个; 制备完成后, 重复放电使空气腔的厚度尽可能变薄. 在放电过程中, 通过光谱仪实时监测 FPI 的反射光谱, 从而达到监测该空气腔壁厚度的目的.

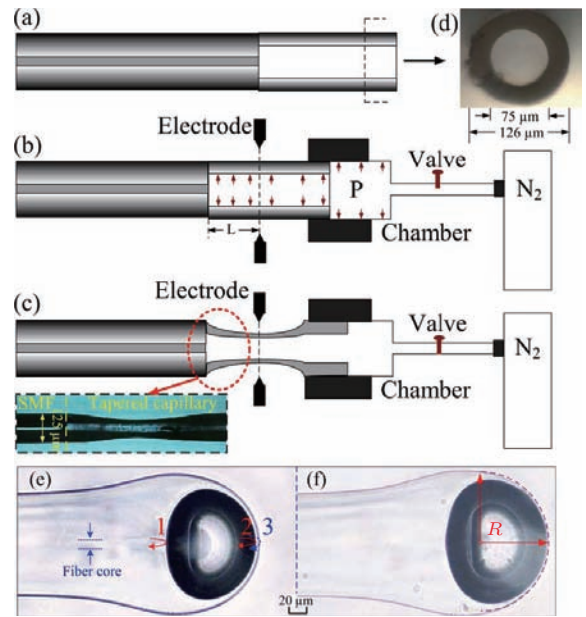


图 12 微腔传感器的制备工艺示意图 [16]

Fig. 12. Schematic diagram of the micro-cavity sensor [16].

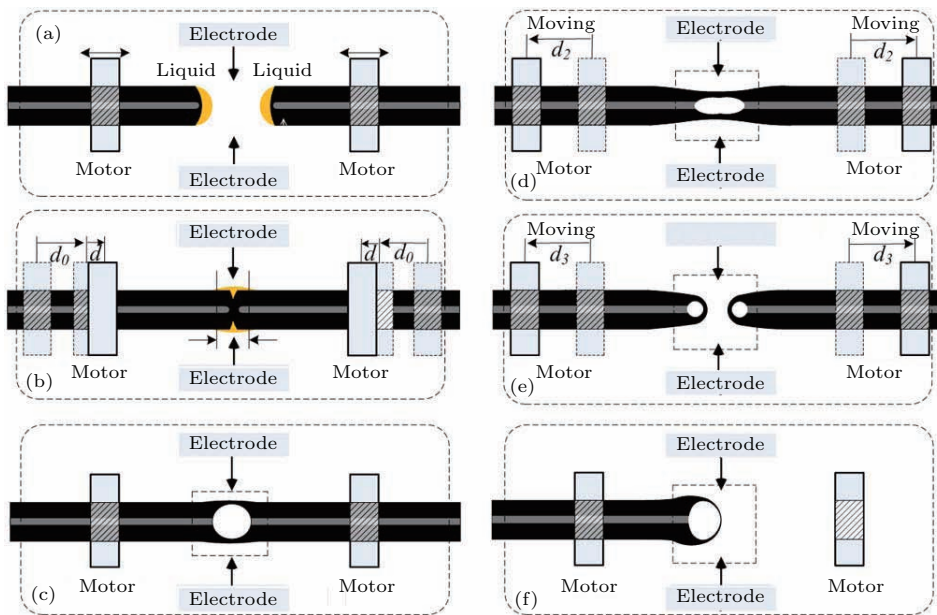


图 13 浸油电弧放电加工过程示意图 [17]

Fig. 13. Schematic diagram of the fabrication process of using electrical arc discharge assisted with oil coating in advance [17].

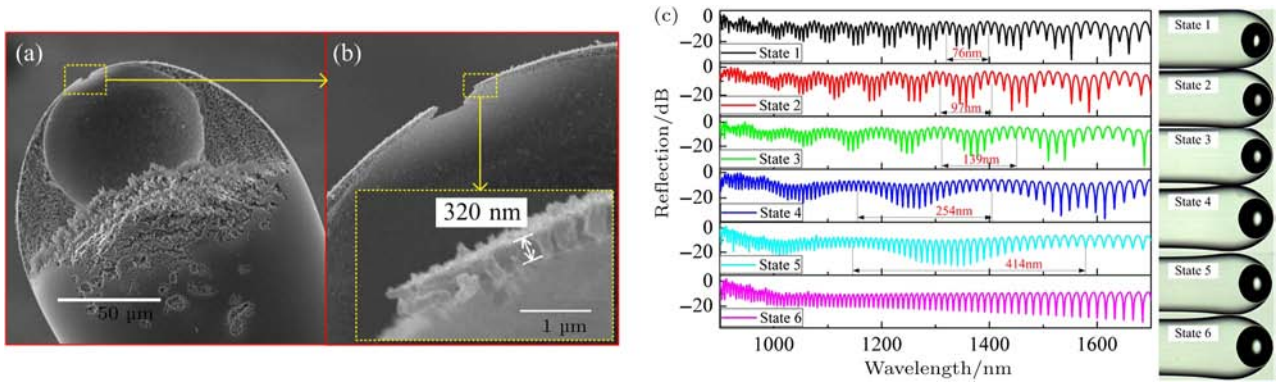


图 14 (a), (b) 空气泡的扫描电镜图像; (c) 不同薄膜厚度下气泡的显微图像和相应的反射光谱图 [17]
 Fig. 14. (a), (b) SEM image of the air bubble; (c) reflection spectra and optical microscope images of the fiber-tip FPI pressure sensor at different states of the diaphragm thinning process [17].

图 14(a) 是空气腔的扫描电子显微镜 (sanning electron microscope, SEM) 图像, 气泡内表面非常光滑有助于增加薄膜的反射率. 图 14(b) 是其放大图像, 薄膜厚度 320 nm. 图 14(c) 是不同薄膜厚度下的反射光谱图和显微图片.

2015年, Liu等 [18] 提出了一种基于光纤中独特的矩形气泡的应变传感器, 制备工艺如图 15(a)–(f) 所示. 将两单模光纤的端面热熔成弧面, 通过调节热熔参数控制弧面尺寸; 在弧面上涂抹液体, 设置熔接参数进行熔接, 在电弧放电过程中, 由于电弧放电引起的高温 and 空气热膨胀使得气泡壁熔化, 并且由于预施加的轴向拉伸应力, 从

而在熔接点形成一个矩形的气泡.

制备四个结构参数不同的样品 S1, S2, S3, S4. 如图 16 所示, 其中样品 S1 和 S3 所示的是椭圆形气泡, 腔长分别为 88 μm 和 62 μm; 样品 S2, S4 表示矩形气泡的显微图像, 腔长分别为 85 μm 和 61 μm. 图 16(a) 和图 16(b) 为两组椭圆形气泡腔和矩形腔的显微图像, 图 16(c) 和图 16(d) 为分别对应的气泡样品的反射光谱. 在 1550 nm 处测定相应的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 分别为 13.9, 14.1, 19.36 和 19.94 nm. 通过公式 $FSR = \lambda^2 / (2nL)$ 计算出四个样品的空腔长度 L 分别为 85.2, 86.4, 62 和 60.2 μm, 与实测值大致符合.

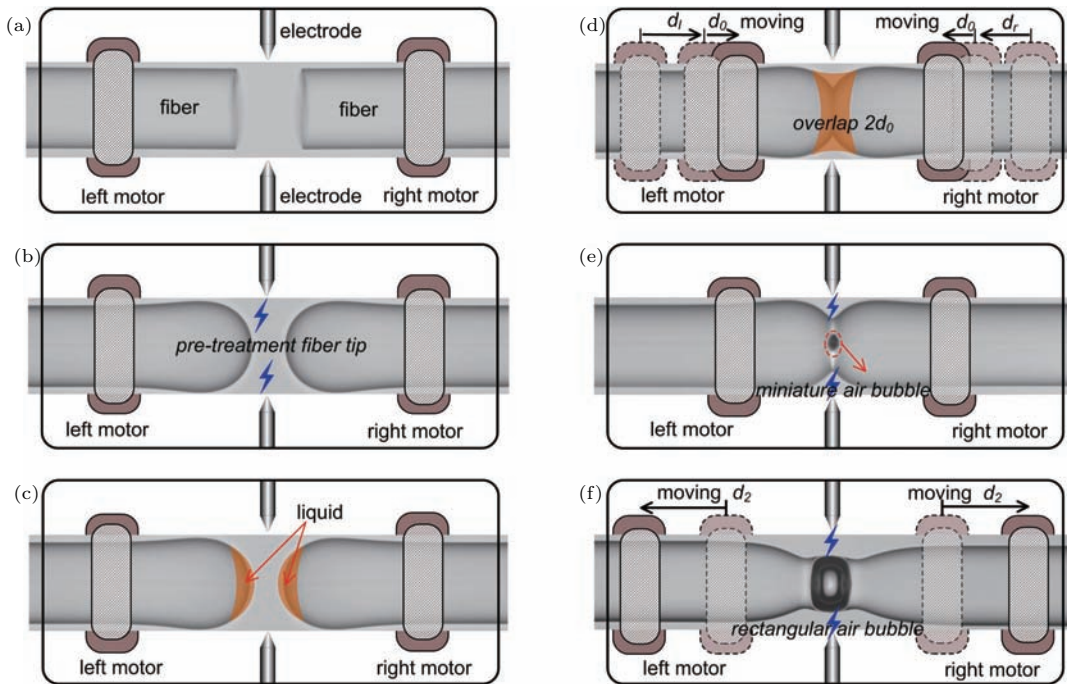


图 15 基于矩形气泡 FPI 的制备流程示意图 [18]

Fig. 15. Schematic diagrams of fabrication process of in-fiber FPI based on an air bubble [18].

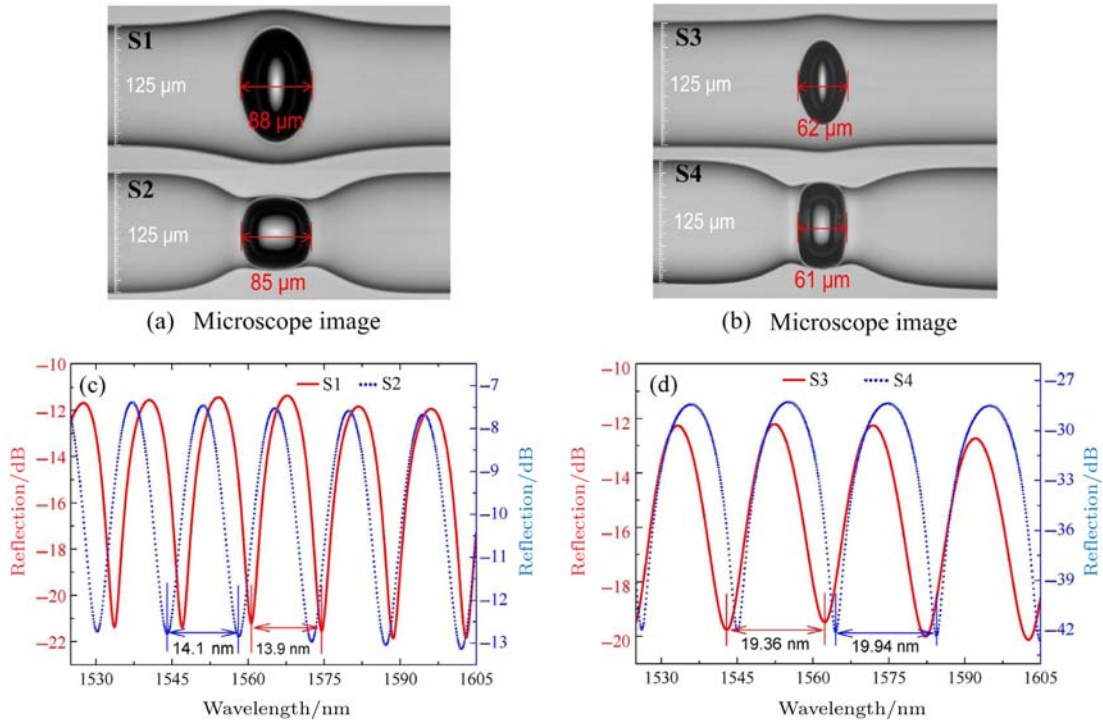


图 16 (a), (b) 四种气泡样品的显微图像; (c), (d) 样品对应的反射光谱 [18].

Fig. 16. (a), (b) Microscope images of four in-fiber air bubble samples; (c), (d) the corresponding reflection spectra of the air cavity-based FPI samples [18].

3.3 飞秒激光制备法

激光微加工技术为研究新型光纤传感器等提供了新的技术手段. 利用激光加工的光纤 F-P 干涉传感器典型的结构如图 17 所示. 先利用激光对单模光纤端面刻蚀, 再对刻蚀端面进行覆膜形成 F-P 腔体.

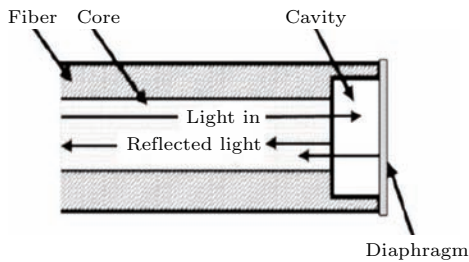


图 17 激光加工微型压力传感器 [33]

Fig. 17. Laser processing miniature pressure sensor [33].

飞秒激光微加工实验装置如图 18 所示, 实验采用脉宽 50 fs、波长 800 nm (基频) 或波长 266 nm (三倍频)、重复频率 1 kHz 的飞秒激光系统, 飞秒激光通过高数值孔径的激光加工物镜聚焦在光纤样品上, 光纤样品通过两个 V 形槽夹具固定在高精度的三维电移平台上 (最小步进 10 nm, 重复定位精度 ± 70 nm), 移动平台按照所设计的光栅周期值移动. 激光脉冲能量通过调节半波片和偏振片

进行控制, 激光曝光时间通过一个电子快门精密控制, 置于加工物镜上方的 CCD 用于加工时的在线观察和影像记录.

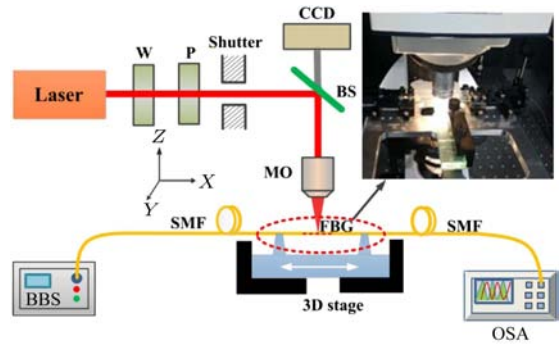


图 18 飞秒激光微加工实验装置示意图 [6].

Fig. 18. Schematic diagram of femtosecond laser micromachining [6].

2007 年, Rao 等 [19] 利用飞秒激光分别在 SMF 和光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 制备出 MFPIS, 其结构和相应干涉光谱如图 19 所示. 这种 MFPIS 的制备工艺包括: 首先将 SMF 或者 PCF 固定在位移平台, 然后控制位移平台移动速度为 $300 \mu\text{m/s}$, 飞秒激光的单次曝光面积是 $80 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 重复几次这个过程直到满足设计要求.

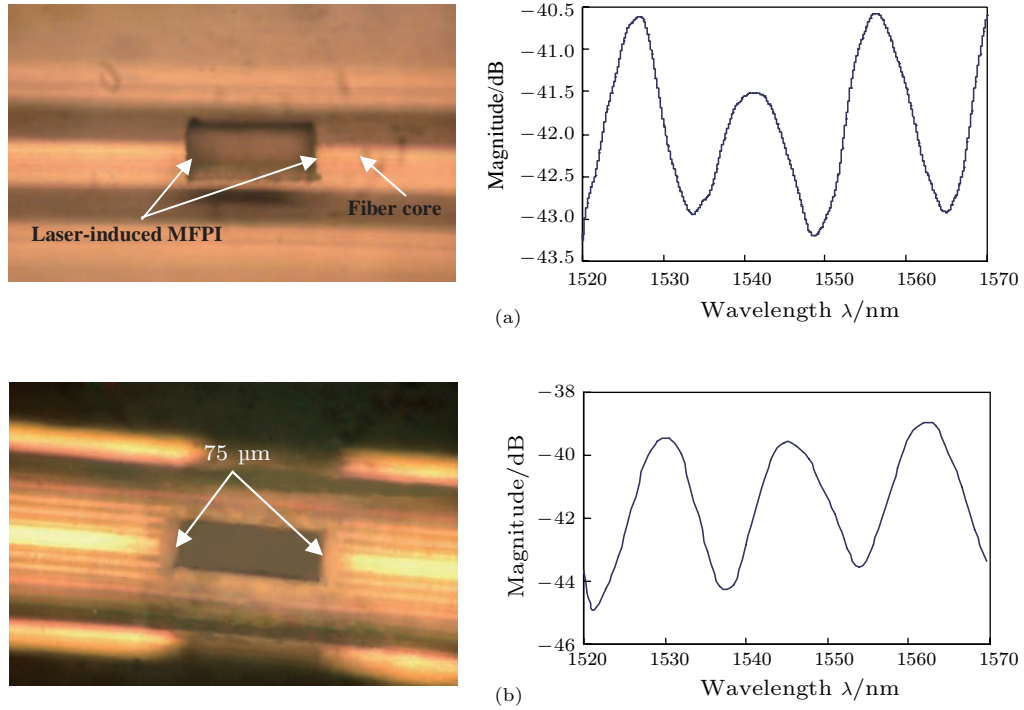


图 19 (a) 腔长为 80 μm 的 SMF-MFPIS 的显微图像及对应的反射光谱图; (b) 腔长为 75 μm 的 PCF-MFPIS 的显微图像及对应的反射光谱图 [19]

Fig. 19. (a) Optical micrograph and reflective spectrum of a MFPI with a 80 μm cavity length based on the SMF; (b) optical micrograph and reflective spectrum of a MFPI with a 75 μm cavity length based on the PCF [19].

2008 年, Wei 等 [20] 提出了另一种利用飞秒激光制备 F-P 干涉仪的结构, 如图 20 所示. 制备完成的光纤 FPI 腔长约 30 μm , 深度约 72 μm , F-P 腔恰好穿过纤芯. 这种结构的 FPI 损耗小于 16 dB, 干涉可见度超过 14 dB. 测试温度高达到 1100 $^{\circ}\text{C}$.

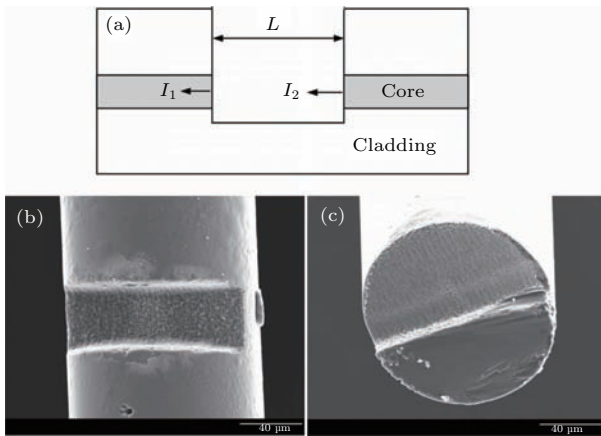


图 20 (a) 结构说明; (b) 前视图; (c) 截面图 [20]

Fig. 20. (a) Structural illustration; (b) top view; (c) cross section [20].

2015 年, Tang 等 [21] 利用飞秒激光在空芯光子带隙光纤 (hollow core photonic band gap fiber, HC-PBF) 侧边开孔, 制备出 F-P 干涉气体压力传

感器, 如图 21 所示. 通过在普通单模光纤之间熔接一段 HC-PBF, 然后利用飞秒激光在 HC-PBF 侧边开孔, 孔穿过 HC-PBF 的纤芯. 通过这种方法制备出腔长分别为 1300, 415, 60 μm 的三个不同的样品. 样品的反射光谱图如图 22 所示, 图 22 (a) 为样品的反射光谱, 图 22 (b) 为腔长与 FSR 的函数关系图.

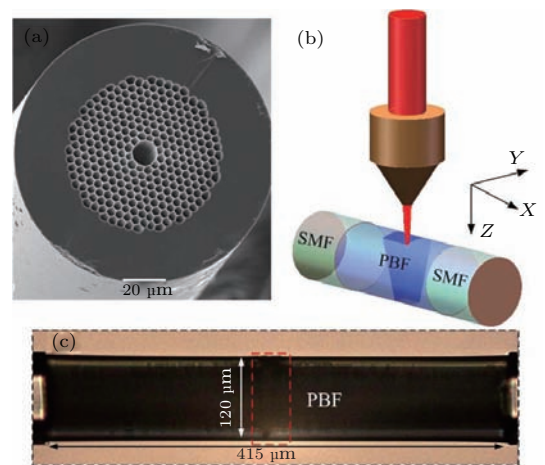


图 21 (a) HC-PBF 的截面图; (b) 飞秒激光加工原理示意图; (c) 侧边开孔 F-P 腔侧视图 [21]

Fig. 21. (a) Cross section of HC-PBF; (b) schematic diagram of FS laser fabrication; (c) side view of the side-opened drilled F-P cavity [21].

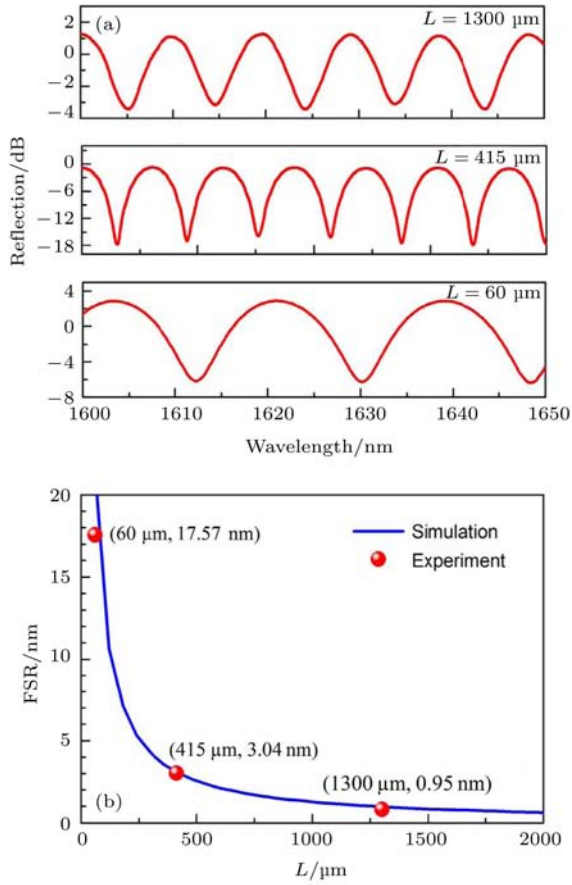


图 22 (a) 测得的反射光谱; (b) 腔长与 FSR 的函数关系图 [21]
Fig. 22. (a) Measured reflection spectrum; (b) the functional relationship between cavity length and FSR [21].

3.4 聚合物辅助制备法

聚合物辅助制备法是利用高分子聚合物形成超薄膜片来制备光纤 F-P 干涉传感器. 由于全石英材料制作的光纤 EFPI 温度敏感性低, 石英膜片的杨氏模量大、膜片加工的最小厚度有限, 不适合微弱声信号的感测. 有机聚合物材料因其杨氏模量小、易加工成超薄膜片, 所以利用聚合物材料制作超薄膜片具有无可比拟的优势 [30]. 常用膜片材料的主要性能如表 1 所列.

2007 年, Hill 等 [22] 研制的 SU-8 复合材料压力传感器在 MEMS 中应用得越来越广泛. SU-8 是一种紫外敏感的负性厚光刻胶, 由于 SU-8 胶光敏性较好, 同时吸收系数也较小, 对几百微米厚的 SU-8 进行紫外光刻, 在短时间内即可达到曝光剂量的要求 [35]. 利用 SU-8 复合材料制备的光纤 F-P 压力传感器的模型及结构如图 23 所示, 传感器由 SU-8 胶帽和单模光纤组成. F-P 腔的直径 100 μm, 腔长 50 μm, 薄膜厚度 2 μm.

表 1 常用膜片材料的主要参数 [34]

Table 1. Main parameters of common diaphragm materials [34].

材料名称		材料的性能		
中文名称	英文缩写	杨氏模量/Pa	泊松比	密度/kg·m ⁻³
铝	Al	6.89×10 ¹⁰	0.33	2.7×10 ³
铜	Cu	11×10 ¹⁰	0.343	8.9×10 ³
聚醚酰亚胺	PEI	5.7×10 ⁹	0.36	1.27×10 ³
聚醚醚酮	PEEK	6.9×10 ⁹	0.33	1.3×10 ³
聚碳酸酯	PC	5.7×10 ⁹	0.33	1.2×10 ³
聚对苯二甲酸	PET	4×10 ⁹	0.33	1.34×10 ³
乙二醇酯				

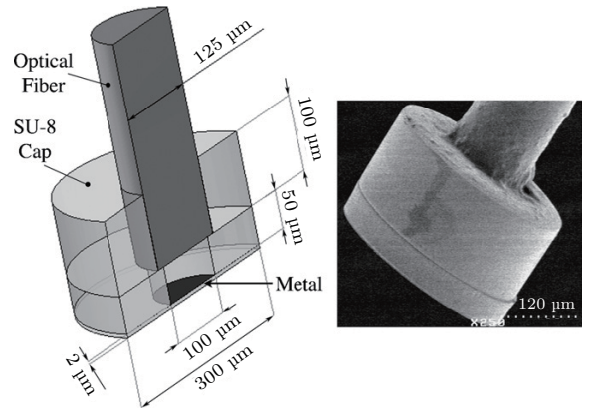


图 23 传 (左) 传感器的三维横截面示意图; (右) 传感器的扫描电镜图像 [22]
Fig. 23. (Left) The 3 D cross-section schematic of sensor; (right) SEM image of sensor [22].

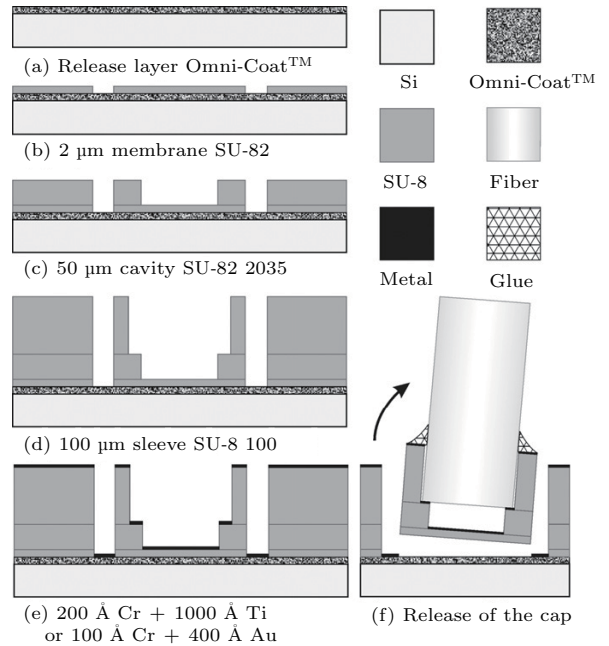


图 24 SU-8 材料微型压力传感器制作流程 [22]

Fig. 24. Fabrication and assembly process for the sensor [22].

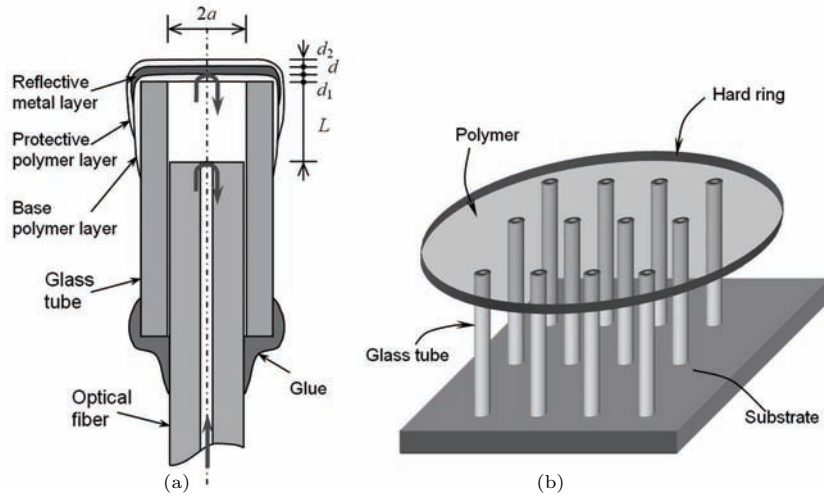


图 25 (a) 基于聚合物金属复合膜片压力传感器的结构图; (b) 传感器制备原理示意图 [23]

Fig. 25. (a) Structure of the miniature fiber optic pressure sensor element that makes use of a polymer-metal composite diaphragm as a pressure transducer; (b) schematic of sensor fabrication [23].

SU-8 复合材料压力传感器制备流程如图 24(a)–(f) 所示。首先, 硅晶片上依次制作基底膜和 $2\ \mu\text{m}$ 厚的 SU-8 层作为横振膜; 然后在此基础上, 制作孔径 $100\ \mu\text{m}$, 厚 $50\ \mu\text{m}$ 的环状 SU-8 材料腔以及孔径 $125\ \mu\text{m}$, 厚 $100\ \mu\text{m}$ 的 SU-8 套管; 为控制端面反射率, 在上述结构件的表层进行金属镀膜, 再将光纤插入, 光纤端面与 SU-8 金属镀层之间就形成了 F-P 腔体; 拔出光纤, 用氰基丙烯酸盐黏合剂在大气压力下黏结, 形成最终的传感器结构。镀膜厚度的控制及传感器顶端加工的控制是此类传感器制作的难点。

2008 年, Nesson 等 [23] 提出了基于多层高分子-金属复合膜片压力传感器, 多层高分子金属复合膜片包括 $150\ \text{nm}$ 厚的聚酰亚胺层、 $1\ \mu\text{m}$ 厚的金属反射层; 另外, $150\ \text{nm}$ 厚的聚酰亚胺层作为保护层和隔离层。这种多层高分子-金属膜片压力传感器结构及其制备原理如图 25 所示。

制备工艺包括: 将聚酰亚胺滴在一个直径为 $100\ \text{mm}$ 的培养皿中(培养皿中装有水), 聚酰亚胺漂浮在水面上并扩散形成薄层, 聚酰亚胺的体积控制在 $1\ \text{mm}^3$, 通过观察聚合物层的着色和控制铺展时间, 可以控制聚酰亚胺层在水面均匀地铺展。然后使用紫外(UV)光预固化聚合物层, 使其有足够的强度, 然后将其覆盖于玻璃管端部。最后再用紫外光固化, 使聚合物层固定在玻璃管端面。接着利用直流磁控镀膜机, 在聚合物层镀上镍/钛金属反射层。然后重复上述操作, 在金属反射层的基础上再镀一层聚合物层作为保护层。最后, 将光纤插入

玻璃管中形成传感器件, 光纤端面距离聚合物-金属薄膜 $15\ \mu\text{m}$, 用环氧树脂固定接口处。镀膜厚度的控制是此类传感器的制备难点。

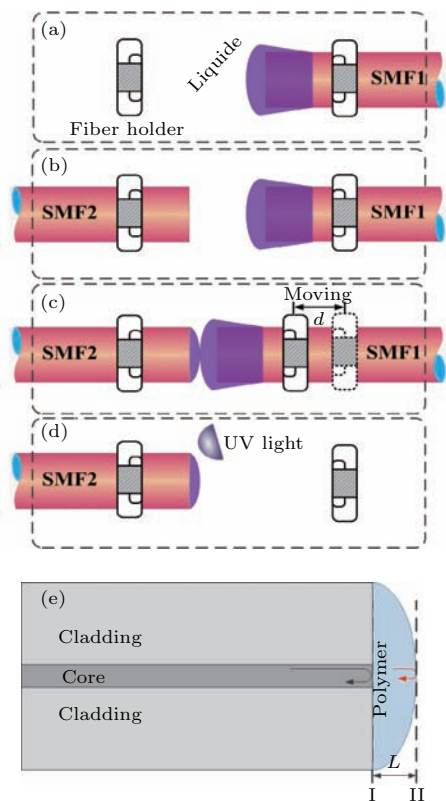


图 26 (a), (b), (c), (d) 基于聚合物液滴 FPI 的制备流程图; (e) 光纤端面 FPI 传感器示意图 [24]

Fig. 26. (a), (b), (c), (d) Schematic diagram of the fabrication process of the FPI sensor based on pendant polymer droplet; (e) schematic diagram of the fiber-tip FPI sensor [24].

2015年, Sun等^[24]制备出基于聚合物液滴的F-P干涉仪, 其制备工艺如图26(a)—(d)所示. 控制马达使浸泡过紫外固化液的单模光纤SMF1缓慢移动, 逐渐靠近SMF2的端面, 使SMF2接触到紫外固化液, 然后将SMF2取出. 用强度270 mW/cm²的紫外光在室温下照射30 min, 得到折射率1.524固体聚合物. 制备完成的基于聚合物液滴的F-P干涉仪如图26(e)所示, L 表示FPI的腔长.

图27所示为不同腔长对应的反射光谱及FSR与腔长的函数关系.

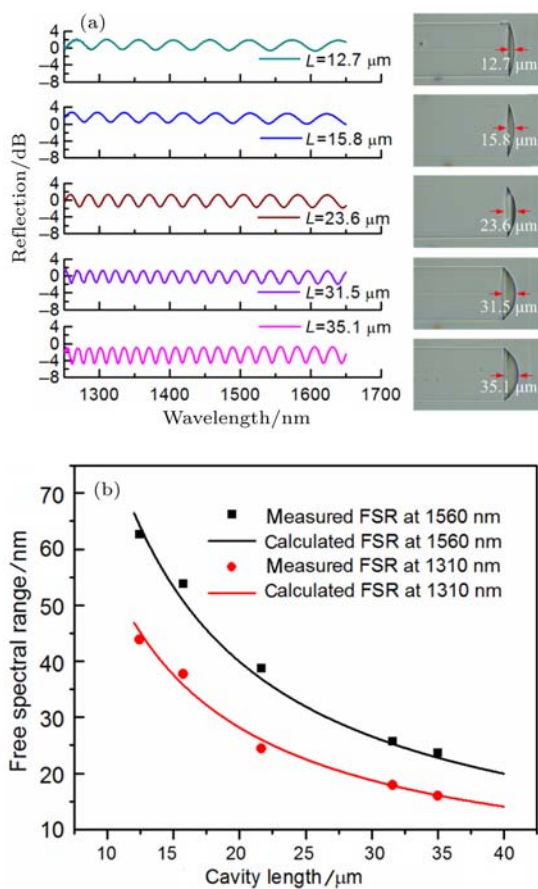


图27 (a) 室温下不同腔长相应的反射光谱和显微图像; (b) FSR与腔长的函数关系图^[24]

Fig. 27. (a) Reflection spectra and optical microscope images of FPIs with different cavity lengths in air at room temperature; (b) the functional relationship between FSR and cavity length^[24].

4 光纤F-P干涉仪传感应用

4.1 温度传感器

2008年, Wei等^[20]提出了利用飞秒激光制备微型F-P传感器. 腔长随温度的变化函数如图28

所示, 腔长随着温度近似呈线性增加. 该光纤F-P干涉仪测试温度高达1100 °C, 但是当温度增加到1100 °C时, 干涉条纹可见度减小2 dB. 这种特殊的F-P干涉仪对温度的敏感性0.074 pm/°C.

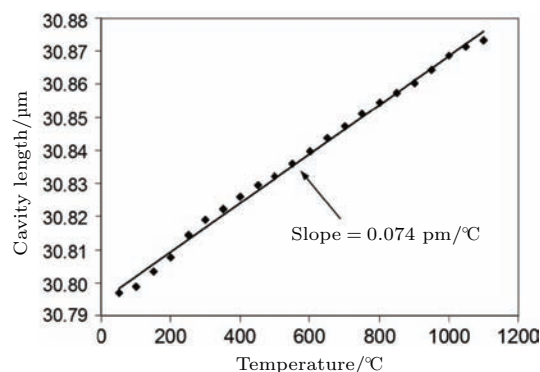


图28 传感器对温度变化的响应^[20]

Fig. 28. Fiber inline F-P device in response to temperature change^[20].

2015年, Yang等^[36]研制的基于一个充满汞的石英管光纤F-P干涉温度传感器, 传感器的F-P腔是由水银柱和单模光纤端面之间的空气腔形成, 腔长随温度的变化情况如图29所示. 这种传感器表现出-41.9 nm/°C的一种超高的温度灵敏度.

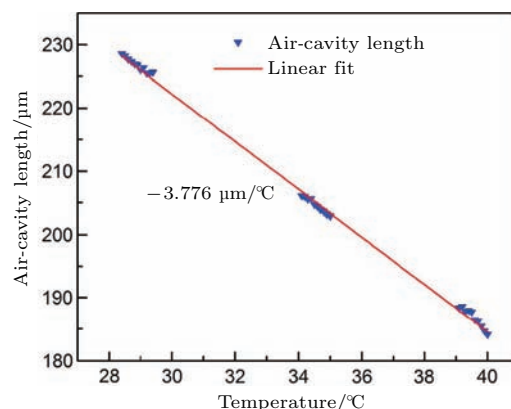


图29 空气腔腔长关于温度的函数^[36]

Fig. 29. A function between air-cavity length and the temperature^[36].

此外, 用于温度传感的F-P干涉仪已经有了很多改进, 例如, 它可以与迈克耳孙干涉仪相结合, 制作一个混合式的温度传感器^[37]. 2010年, Kou等^[38]提出的全玻璃F-P模态干涉仪(Fabry-Perot modal interferometer, FPMI)的温度灵敏度大约在20 pm/°C. 2010年, Zhu等^[39]利用薄芯光纤制作的高温F-P传感器的灵敏度约为18.3 pm/°C, 测试温度高达850 °C. 2010年, 柯涛等^[40]研制一种全光纤微型F-P高温传感器, 测温上限为1200 °C,

干涉长度为3.46 mm, 灵敏度为103 nm/°C. 2012年, Rong等[41]提出了一种微型光纤F-P干涉仪在高于80 °C 温度下具有高达173.5 pm/°C⁻¹的灵敏度并且可以提供恒定的温度读数. 2013年, Jia和Wang[42]提出了一种基于压电陶瓷反馈控制腔长的全二氧化硅光纤F-P传感器可同时用于加速度和温度的传感. 也有一些基于F-P干涉仪型温度传感器的专利[43,44].

4.2 压力传感器

2005年, Donlagic和Cibula[12]提出的基于SiO₂膜片的全光纤F-P压力传感器结构, 该压力传感器对三种不同压力范围的响应如图30所示, 可实现0—1 MPa的压力范围测量. 在1550 nm处达到最大灵敏度为1.1 rad/40 kPa、分辨率为300 Pa.

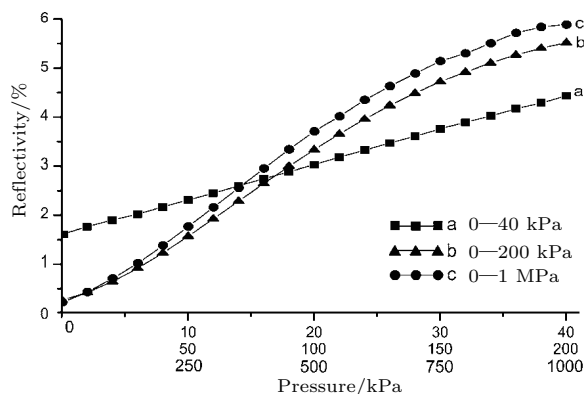


图30 传感器对三种不同压力范围的响应[12]

Fig. 30. Responses of pressure sensors for three different pressure ranges[12].

2014年, Liao等[17]提出的亚微米级厚度薄膜的新型F-P干涉仪, 三个样品的压力性能进行比较如图31所示. 样品S1, S2, S3的薄膜厚度分别为约6.7, 1.8和0.5 μm, 通过计算压力灵敏度分别约为137 pm/MPa, 599 pm/MPa和1036 pm/MPa.

早在1997年, Kim等[45]提出了一种基于Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄薄膜的光纤F-P压力传感器, 具有0.11 rad/kPa的压力灵敏度. 2003年, Zetterlind等[46]提出了一种光纤F-P应力传感器, 在不同应力环境下的应力灵敏度为1526 nm/RIU. 2007年, Aref等[47]提出了一种EFPI压力传感器, 敏感性为2.75 × 10⁻⁸ kPa⁻¹. 2013年, Wang等[48]提出了一种超高F-P压力传感器, 压力敏感性超过1000 nm/kPa. 此外, 在文献[10, 45, 49—54]中也

有学者研制出其他类型的光纤F-P压力传感器. 同时, 也有一些基于FPI型压力传感器的专利[55—58].

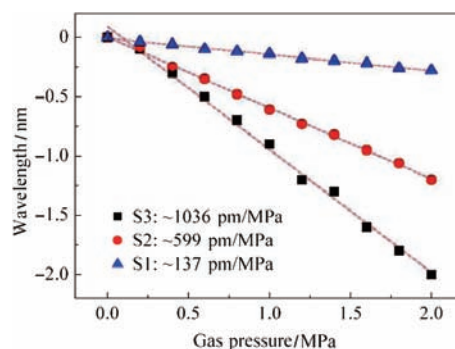


图31 三个样品在1550 nm处波长随气压的漂移[17]

Fig. 31. Wavelength shift of the interference dip at 1550 nm for the three sensor samples with the gas pressure applied[17].

大多数光纤F-P腔压力传感器仍处于实验室研制阶段, 不能投入批量生产和工程化应用. 但是在实验室研究的基础上, 也有一些国内外研究机构和公司研究开发了一些用于实际应用的光纤F-P腔压力传感器. 2007年, 大连理工大学物理系和中国石油辽河油田分公司钻采工艺研究院设计研制了基于光纤EFPI腔的波长解调型光纤压力传感系统. 该系统采用激光熔接制备的光纤F-P传感头, 在压强0—30 MPa范围内, 系统压力测量分辨率达到0.003 MPa[59]. 2010年, 由山东省科学院激光研究室承担的“光纤高温高压井测试技术”课题通过科技部验收. 该课题组根据高温高压油井的特殊应用环境, 深入开展了耐高温光纤传感技术研究, 在国内首次自主研制出了可在温度220 °C和压力100 MPa下长期使用的固定式高精度光纤压力传感器, 除了油井检测应用之外, 这一光纤温度压力传感器在电力、化工、矿山等许多领域都将有广阔的应用前景[60]. 此外, 加拿大FISO公司在医疗应用中引入光纤传感技术, 凭借其光纤压力传感器系列, 已达到世界领先的光纤压力传感器OEM供应商地位[61]. 该公司研制的小型光纤压力传感器在颅内压、动脉血压、膀胱/尿道压力、椎间盘内压、内髓内压等医疗领域有广泛应用.

4.3 温压一体传感器

随着光纤F-P腔温压传感器制备技术的成熟, 功能齐全、制作简单的温压一体化光纤传感器被越来越多的科研人员关注. 2016年, Xu等[62]提

出了一种光纤F-P干涉仪用于气体压力和温度的测量. 室温下(25 °C)该传感器在1520—1535 nm波长范围内不同气压下的反射光谱如图32(a)所示. 在图32(b)中, 气压从0到1.12 MPa变化, 谐振峰向长波方向漂移. 通过线性拟合, 得到两个谐振峰的气压灵敏度分别为2126 pm/MPa和1711 pm/MPa. 不同环境温度下器件的反射光谱如图33(a)所示. 温度从20.0 °C到36.0 °C变化时, 谐振峰波长的漂移情况如图33(b)所示. 通过线性拟合, 得到两个谐振峰的温度灵敏度分别为

7.1 pm/°C和5.6 pm/°C.

此外, 2011年, Wu等[63]提出了一种基于PCF的光纤F-P传感器, 分别研究了在25—700 °C和0—40 MPa的温压特性, 得到其温度灵敏度为13 pm/°C, 压力灵敏度为-5.8 pm/MPa. 同时, 也有学者研究了温压一体传感器在生物医学领域的应用, 2015年, Sven等[15]提出一种用于人体尿动力学检测的温压一体传感器, 分辨率优于0.1 cmH₂O (~ 10 Pa), 稳定性优于1 cmH₂O/h.

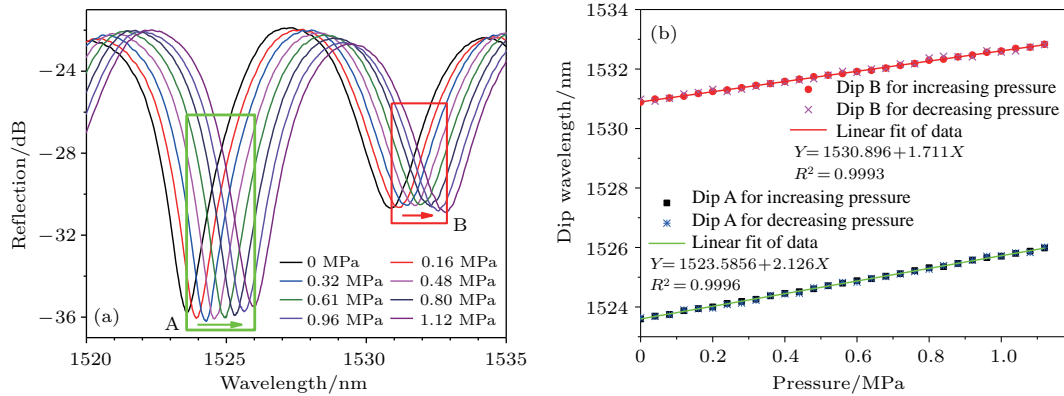


图32 (a) 温压一体传感器承受不同压力时反射光谱的演变; (b) 不同压力情况下谐振峰的漂移 [62]

Fig. 32. (a) Reflection spectra of the temperature and pressure sensor under different pressures; (b) dip wavelength versus pressure [62].

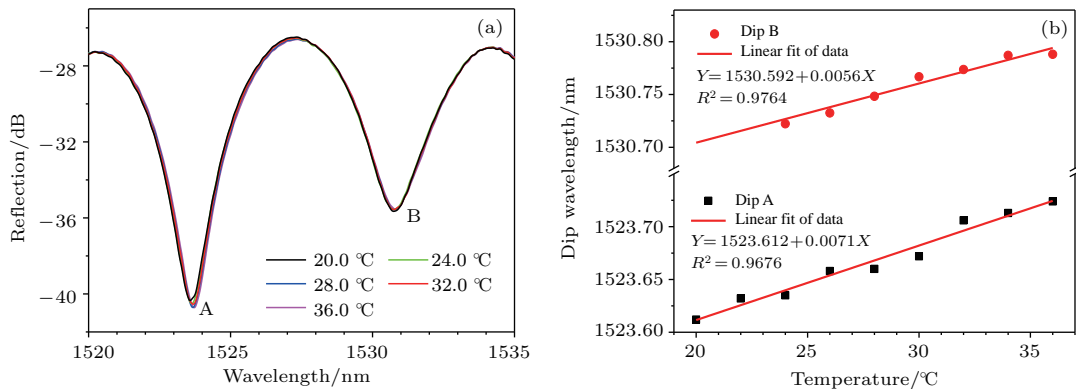


图33 (a) 温压一体传感器不同温度变化时反射光谱的演变; (b) 不同温度下谐振峰漂移情况 [62]

Fig. 33. (a) Reflection spectra of the temperature and pressure sensor under different temperatures; (b) dip wavelength versus temperature [62].

5 结 论

本文对几种常用光纤F-P腔温度和压力传感器的制作工艺做了总结性介绍. 对比分析了不同加工工艺下传感器的性能. 光纤传感器正朝着微型化、低成本、耐恶劣环境和实用化方面发展. 我国对光纤F-P腔温度和压力传感器的研究水平与国际领

先水平还有不小的差距, 主要表现在实用化方面, 多处于实验室研制阶段, 不能投入批量生产和工程化应用. 近年来, 国内各大高校和科研院所都加大了对光纤F-P腔温度和压力传感技术的研究工作, 取得了很大的进展. 光纤传感器的各种优异性能决定了其广泛的应用前景, 所以对光纤F-P腔压力传感器的制作工艺进行深入的研究是很有必要的.

参考文献

- [1] Lin Z H, Li C F, Liu J C 2011 *Optical Communication Technology* **7** 4 (in Chinese) [林之华, 李朝锋, 刘甲春 2011 光通信技术 **7** 4]
- [2] Meng Z, Hu Y M, Yao Q, Song Z Q, Zhang Z H 2007 *Journal of North University of China (Social Science Edition)* **23** 98 (in Chinese) [孟洲, 胡永明, 姚琼, 宋章启, 张振慧 2007 中北大学学报 **23** 98]
- [3] Wang Y P, Chen J P, Li X W, Zhou J Q, Shen H, Shi C H, Zhang X H, Hong J X, Ye A L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4782 (in Chinese) [王义平, 陈建平, 李新碗, 周俊鹤, 沈浩, 施长海, 张晓红, 洪建勋, 叶爱伦 2005 物理学报 **54** 4782]
- [4] Zhang G J 2005 *Ph. D Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [张桂菊 2005 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [5] Liu S, Wang Y P, Liao C R, *et al.* 2014 *Opt. Lett.* **39** 2121
- [6] Liao C, Wang Q, Xu L, *et al.* 2016 *Appl. Opt.* **55** 1525
- [7] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平, 饶云江, 冉曾令, 朱涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [8] <http://www.nchtech.com/fiso/> [2017-1-8]
- [9] <http://www.hi1718.com/company/443121/products/201695184951399.html> [2017-1-8]
- [10] Lee C, Taylor H 1988 *Electron. Lett.* **24** 193
- [11] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, Claus R O 1991 *Conf on Fiber Optic Smart Structures and Skins* 4 Boston, MA Sep. 5-6, 1991 p134
- [12] Donlagic D, Cibula E 2005 *Opt. Lett.* **30** 2071
- [13] Zhu Y Z, Cooper K L, Pickrell G R, Wang A 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 861
- [14] Pevec S, Donlagic D 2012 *Appl. Opt.* **51** 4536
- [15] Poeggel S, Duraibabu D, Tosi D, *et al.* 2015 *J. Biomed. Opt.* **20** 037005
- [16] Ma J, Ju J, Jin L, Jin W 2011 *IEEE Photonics Technology Letters* **23** 1561
- [17] Liao C R, Liu S, Xu L, *et al.* 2014 *Opt. Lett.* **39** 2827
- [18] Liu S, Yang K M, Wang Y P, *et al.* 2015 *Sci. Rep.* **5** 7624
- [19] Rao Y J, Deng M, Duan D W, *et al.* 2007 *Opt. Express* **15** 14123
- [20] Wei T, Han Y K, Tsai H L, Xiao H 2008 *Opt. Lett.* **33** 536
- [21] Tang J, Yin G L, Liao C R, *et al.* 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1
- [22] Hill G C, Melamud R, Declercq F E, *et al.* 2007 *Sens. Actuator A: Phys.* **138** 52
- [23] Nesson S, Yu M A, Zhang X M, Hsieh A H 2008 *J. Biomed. Opt.* **13** 044040
- [24] Sun B, Wang Y P, Qu J L, *et al.* 2015 *Opt. Express* **23** 1906
- [25] Jia C Y 2009 *M. S. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [贾春艳 2009 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [26] Li C 2013 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [李成 2013 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [27] Bi W H, Wang X, Lang L Y 2002 *Journal of Optoelectronics-Laser* **13** 1316 (in Chinese) [毕卫红, 王昕, 郎利影 2002 光电子·激光 **13** 1316]
- [28] Kuske A, Robertson G 1979 *Photoelastic Stress Analysis* (Shanghai: Shanghai Science and Technology Press) (in Chinese) [柯斯克, 罗伯逊 1979 光弹性应力分析 (上海: 上海科学技术出版社)]
- [29] Sun S H, Wang T Y, Xu Y 2000 *Optical Fiber Measurement and Sensing Technology* (Harbin: Harbin Institute of Technology Press) (in Chinese) [孙圣和, 王廷云, 徐颖 2000 光纤测量与传感技术 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社)]
- [30] Hao Z Y 2005 *M. S. Dissertation* (Shijiazhuang: Hebei University of Technology) (in Chinese) [郝子宇 2005 硕士学位论文 (石家庄: 河北工业大学)]
- [31] Kern W, Yang G G 1987 *Microelectronics* **3** 11 (in Chinese) [科恩, 杨功铭 1987 微电子学 **3** 11]
- [32] Wang Y P, Tang J, Ying G L, Zhong X Y, Liao C R 2015 *J. Vibration, Measurement & Diagnosis* **35** 809 (in Chinese) [王义平, 唐剑, 尹国路, 钟晓勇, 廖常锐 2015 振动测试与诊断 **35** 809]
- [33] Han B, Gao C 2012 *Metrology & Measurement Technology* **32** 5 (in Chinese) [韩冰, 高超 2012 计测技术 **32** 5]
- [34] David W, Burns <http://wenku.baidu.com/link?url=7sqo2RetYTd3DC5y9CwVRdIt8fiDVl2em5JId3DYT66m-t38h9JjI8-T0X2gm4NVodAUZZgPpWoX1X96EwjWtuLAFi7Wu2Q-aq1MXi4ZcYW> [2017-1-8]
- [35] Zhang D Z, Hu G Q, Chen C W 2009 *Instrument Technique and Sensor* **11** 4 (in Chinese) [张冬至, 胡国清, 陈昌伟 2009 仪表技术与传感器 **11** 4]
- [36] Yang K M, He J, Wang Y, *et al.* 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 1
- [37] Frazao O, Silva S F, Viegas J, *et al.* 2010 *Meas. Sci. Technol.* **2** 1
- [38] Kou J L, Feng J, Ye L F 2010 *Opt. Express* **18** 14245
- [39] Zhu J J, Zhang A P, Xia T H 2010 *IEEE Sens. J.* **10** 1415
- [40] Ke T, Zhu T, Rao Y J, Xu M, Duan D W 2010 *Infrared and Laser Engineering* **39** 106 (in Chinese) [柯涛, 朱涛, 饶云江, 徐敏, 段德稳 2010 红外与激光工程 **39** 106]
- [41] Rong Q Z, Sun H, Qiao X G 2012 *J. Opt.* **14** 045002
- [42] Jia P G, Wang D H 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 040601
- [43] Davis C M 1988 *US Patent* 4 755 668
- [44] Andrews J P, Pulfrey R E 1999 *US Patent* 5 907 403
- [45] Kim M G, Park J, Kang S W 1997 *Smart Electronics and MEMS* Adelaide, SA, Australia 11-13 Dec. 1997 p347
- [46] Zetterlind V E, Watkins S E, Spoltman M W 2003 *IEEE Sens. J.* **3** 393
- [47] Aref S, Latifi H, Zibaii M, Afshari M 2007 *Optics Communications* **269** 322
- [48] Wang Y, Wang D N, Wang C 2013 *Opt. Express* **21** 14084

- [49] Jiang M, Gerhard E 2001 *Sensors and Actuators A:Physical* **88** 41
- [50] Xiao G Z, Adnet A, Zhang Z 2005 *Sensors and Actuators A: Physical* **118** 177
- [51] Lai C W, Yur J P, Liao C C, Lo Y L 2011 *Recent Patents on Signal Processing* **1** 48
- [52] Reinsch T, Blöcher G, Milsch H 2012 *arXiv preprint arXiv* **55** 55
- [53] Zhang Y, Yuan L, Lan X 2013 *Opt. Lett.* **38** 4609
- [54] Dai L, Wang M, Cai D 2013 *IEEE Photonics Technology Letters* **25** 2505
- [55] Taylor H F, Kao T W, Gardner J, et al. 2001 *US Patent* 6 281 976
- [56] Schmidt S 2008 *US Patent* 7 423 762
- [57] Lopushansky R L, Berthold J W 2009 *US Patent* 7 492 463
- [58] Bremer K, Leen G, Lewis E 2014 *US Patent* 8 764 678
- [59] Yu Q X, Wang X N, Song S D, Zhao Y W, Cui S B 2007 *J. Optoelectronics Laser* **18** 299 (in Chinese) [于清旭, 王晓娜, 宋世德, 赵业卫, 崔士斌 2007 光电子 **18** 299]
- [60] Shi Y 2010 *Oil Drilling & Product Technology* **32** 70 (in Chinese) [石艺 2010 石油钻采工艺 **32** 70]
- [61] <http://fiso.com/section.php?p=47&> [2017-2-17]
- [62] Xu B, Liu Y M, Wang D N, Li J Q 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 4920
- [63] Wu C, Fu H, Qureshi K K, Guan B O, Tam H Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 412

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Research progress of in-fiber Fabry-Perot interferometric temperature and pressure sensors*

Li Zi-Liang Liao Chang-Rui Liu Shen Wang Yi-Ping[†]

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 19 January 2017; revised manuscript received 24 February 2017)

Abstract

Optical fiber sensors based on Fabry-Perot interferometer (FPI) have attracted intensive attention for sensing applications in temperature and pressure measurement, owing to their compact, small size, fast responses, high resolution, high sensitivity, good stability, and resistance to electromagnetic interference. It's known that the in-fiber optic interferometers based on single-mode fibers can exhibit compact structures, easy fabrication and low cost. In this paper, firstly, the basic principle of in-fiber FPIs is introduced. Secondly, we review several kinds of typical in-fiber FPIs formed in single-mode fibers fabricated with different post-processing techniques, such as chemical etching, arc discharge, femtosecond laser micromachining, and polymer coating, etc. Finally, the optical sensors based on in-fiber FPIs, with a capability of simultaneous multi-parameter sensing of temperature and pressure, are summarized and prospected.

Keywords: optical fiber sensor, Fabry-Perot interferometer, temperature sensor, pressure sensor

PACS: 07.07.Df, 87.85.fk, 88.10.gk, 42.81.Pa

DOI: [10.7498/aps.66.070708](https://doi.org/10.7498/aps.66.070708)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61635007, 61425007, 61377090, 61575128), the Guangdong Natural Science Foundation, China (Grant Nos. 2014A030308007, 2014B050504010, 2015B010105007, 2015A030313541), the Science and Technology Innovation Commission of Shenzhen, China (Grant Nos. GJHZ20150313093755757, JCYJ20160520163134575, JCYJ20160427104925452), and Pearl River Scholar Fellowships, China.

[†] Corresponding author. E-mail: ypwang@szu.edu.cn