

文章编号: 1002-1582(2025)04-0432-07

微米量级腔长的开式F-P腔研制 及其折射率传感特性

许超^{1*}, 田庆业¹, 范飞虎²

(1. 中电智能科技有限公司, 北京 102200)

(2. 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: F-P 谐振腔 (Fabry-Pérot cavity) 广泛用于折射率、温度、压力等传感, 现有的基于光纤-谐振腔的封闭式 F-P 传感器因为谐振腔较长, 限制了待测物质种类及其测量范围。基于薄膜技术研制了短腔长的开式 F-P 折射率传感器, 具备宽测量范围和高灵敏度。理论研究了腔镜反射率和腔长对开式 F-P 腔特性参数的影响规律, 设计开式 F-P 谐振腔折射率传感器, 包含上下高反射率腔镜 (99.7%) 和短腔 (3.305 μm), 仿真结果表明, 其自由光谱范围高达 42 nm, 折射率测量范围高于传统 F-P 腔一个数量级, 达到 0.129 RIU (RIU 为折射率单位)。采用电子束热蒸发薄膜沉积和光刻技术研制了折射率传感器, 并搭建折射率测试验证装置, 开展了折射率测试实验。结果表明, 折射率变化导致的中心波长平均改变 1.79 nm/RIU, 测试灵敏度为 346.65 nm/RIU。该研究为低成本、宽测量范围、高精度液体/气体折射率传感器奠定理论和实践基础。

关 键 词: 开式 F-P 谐振腔; 折射率传感; 光学薄膜

中图分类号: TB43

文献标识码: A

Open Fabry-Pérot cavity with micrometer scale cavity length and its refractive index sensing characteristics

XU Chao^{1*}, TIAN Qingye¹, FAN Feihu²

(1. Intelligence Technology of CEC CO., LTD. Beijing 102200, China)

(2. School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: F-P optical resonant cavity (Fabry-Pérot cavity) is widely used for sensing refractive index, temperature, pressure, etc. The closed fiber F-P resonant cavity limits the types of substances to be measured and their measurement range due to the long resonant cavity. Herein, a short cavity length open F-P refractive index sensor was designed and fabricated based on thin film technology and lithography, which definitely increases the measurement range and high sensitivity, and is suitable for gases and liquids. Theoretical research was conducted on the influence of mirror reflectivity and cavity length on the sensitive parameters of open F-P cavity, and an open F-P resonant cavity structure and characteristics were all determined, including upper and lower high reflectivity mirrors (99.7%) and short cavity length (3.305 μm). The FDTD simulation results showed that its free spectral range was as high as 42 nm, the sensitivity was as high as 385.85 nm per Refractive Index Unit (RIU), and the refractive index measurement range was one order of magnitude higher than traditional F-P cavities, reaching to 0.129 RIU. In addition, a refractive index testing and verification system was built, and refractive index testing experiments were all carried out. Experimental verification showed that the greater the change in refractive index,

收稿日期: 2025-03-06; 收到修改稿日期: 2025-04-19

基金项目: 陕西省关键核心技术攻关 (2024CY2-GJHX-63)

作者简介: 许超 (1985—), 男, 工程师, 从事自主可控光电子探测与自动控制研究。

* 通讯作者: xuchaojintian@163.com; xuchao@itocec.com

the greater the shift in the center wavelength. The average change in the center wavelength was 1.79 nm/RIU, and the experimental sensitivity was determined to 346.65 nm/RIU. The results lay a theoretical and practical foundation for low-cost, wide measurement range, and high-precision liquid/gas refractive index sensors.

Keywords: open resonant cavity; refractive index sensing; optic thin films

0 引言

基于光学腔谐振效应的折射率传感器因其高灵敏、高精度以及可集成的潜能,成为研究的热点^[1-3]。目前,已报道的闭式光学谐振腔有三类^[4,5],包含法布里-珀罗谐振腔^[6](Fabry-Pérot cavity,简称F-P腔)、回音壁模式谐振腔^[7](Whispering Gallery mode Microcavity,简称WGM腔)、光子晶体谐振腔^[8](Photonic Crystal Microcavity)。其折射率传感的基本机理是待测物质折射率改变导致监控波长的振幅、频率或者相位变化实现折射率检测。尽管从腔特性参数角度上看,回音壁模式和光子晶体谐振腔的谐振腔性能优于法布里-珀罗谐振腔,这来源于两种光学谐振腔对谐振波长的模场变化高度敏感。但是,在光子晶体谐振腔中,通过引入缺陷仅仅实现对应波长的谐振,缺陷结构尺寸在微米或纳米级别,限制了待测物质和缺陷的相互作用范围。而在回音壁模式谐振腔中,其谐振波长发生在回音壁边缘的全反射区域,需要对全反射区进行监控,才可获取谐振模式的改变进而实现传感。这些局限性极大限制了此两种谐振腔的实际应用。而F-P腔和二者不同,腔内任何部位的折射率改变都可引起谐振模式的改变,对制备工艺和监控区域的要求均较低,可对腔内物质折射率进行无标记、高精度的实时检测。

基于F-P腔的折射率传感器大多与光纤传感相结合^[9-13],实现折射率的测试。在空心光纤的两个端面分别沉积高反射膜,端面之间即为样品折射率测试的空间。在制备过程中,端面对准误差和光束发散角误差导致光纤型F-P腔的品质因子和精细度降低^[10,11];其次,光纤型F-P腔的腔长一般较长,形成的干涉峰相对密集,导致自由光谱范围降低,限制了折射率的检测范围^[10,13]。

在折射率测量评价方面,研究者往往只采用灵敏度来评价F-P传感器,认为灵敏度越高越好,这是不全面的。实际上,灵敏度和自由光谱范围共同决定了折射率的测量范围,二者的商和测量范围直接相关。这就意味着仅仅是提高灵敏度,势必造成测量范围减小,限制了实际应用。对于光纤F-P腔受限于制造工艺,腔长一般在几十到几百

微米^[10,11,13,14],导致自由光谱范围小,所以尽管灵敏度很高,但是测量范围小。

另外,高的灵敏度并不意味着高测量分辨率,因为谐振波长的峰值半高宽和所用光谱仪的光谱分辨率也是影响折射率测量分辨率的主要因素。因此,从提高折射率测量范围的角度,需要宽自由光谱范围,即制备短腔的谐振结构。从提高折射率测量分辨率的角度,需要减小谐振波长的半峰宽并匹配合适的信号采集光谱仪。这就需要F-P腔腔层反射率高和腔长短,而传统光纤F-P腔很难实现,制约了折射率的测量分辨率和范围。

短腔F-P传感器可以弥补上述工作的不足,扩大自由光谱范围^[15],进而实现大折射率范围测试并提高测试分辨率。Claire Vallance等^[15]采用聚焦离子束技术在Si基底上制作出1μm腔长的微腔阵列,以SiO₂/TiO₂膜层作为腔镜的反射膜,在640nm中心波长处,F-P腔的品质因子约为10⁵,其灵敏度为3.5×10⁻⁴RIU(折射率单位),可用于大范围折射率测量。王文杰等^[16]采用CO₂激光器激光烧蚀的方法在石英玻璃基底上烧蚀3.5μm腔长的微腔阵列,在窄带光源的激励下,配合高分辨光谱仪,验证了超窄半高宽可以实现高精度的折射率检测,折射率检测极限为6.31×10⁻⁴RIU,检测灵敏度为411nm/RIU。这些工作证明了短腔F-P腔在折射率测量领域的优势。

薄膜和图形化技术不仅可以制备出高反射率的反射层,也可以实现谐振波长超窄半高宽,极大提高折射率测量范围和分辨率。本文仿真设计并分析了微米量级腔长的开式F-P腔折射率传感器,在保持折射率测量精度的前提下,拓展折射率的测量范围。采用电子束热蒸发和光刻技术研制了开式F-P腔,对开式F-P腔的光传感特性进行仿真和折射率测试,完成了实验验证和对比研究。

1 开式F-P腔的特征参数和传感原理

1.1 F-P腔的特征参数

F-P腔的特征参数主要有品质因数(Q)、精细度(F)、自由光谱范围(FSR)。品质因数(Q)表示了谐振腔在时间上限制光子的能力,品质因子越高光能损失越小。其定义式为

$$Q = \omega \frac{W_{\text{stored}}}{P_{\text{diss}}} \quad (1)$$

式中, ω 为谐振频率; W_{stored} 为存储在谐振腔内的总能量; P_{diss} 为腔内的损耗功率。由于 Q 值代表了谐振腔对光能的储存能力, 因此受 F-P 腔镜反射率、腔内介质对光的吸收以及上下反射镜的不平行带来的散射损耗等的影响。在理想情况下, 谐振腔无吸收损耗, Q 值仅由反射镜的反射率决定。品质因子决定了谐振波长在腔内的谐振次数, 实际影响了谐振波和待测物质的作用长度。

自由光谱范围 (Free Spectrum Rang, FSR) 代表了第 m 级长波长 (λ_2) 方向的干涉极大与第 $(m+1)$ 级短波长 (λ_1) 方向的干涉极大之间的波长范围。当 F-P 腔的腔长为 L , 腔内介质折射率为 1 时, 由定义可得

$$\text{FSR} = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2L} \approx \frac{\lambda^2}{2L} \quad (2)$$

显然, 自由光谱范围越大, 对应的折射率测量范围越大。

精细度 (Finess, F) 表示在单位自由光谱范围内含有多少个半高宽为 Δ 的干涉峰, 定义为自由光谱范围与半高宽的比值, 显然精细度越高, 自由光谱范围内能分辨率的峰个数越多, 对应的折射率测量的分辨率越高 (同样采样分辨率的条件下)。

$$F = \frac{\text{FSR}}{\Delta} \quad (3)$$

1.2 折射率传感原理

当 F-P 腔层介质的折射率 n_0 , 其腔长为 L , 谐振波长为 λ_0 , 三者的关系可以表示为

$$m\lambda_0 = 2n_0L \quad (4)$$

式中, m 为腔内谐振波长的干涉级次。在腔长 L 不变的情况下, 腔内介质的折射率发生微弱变化时, 干涉级次不发生改变, 但是 F-P 腔的谐振波长 λ_0 将发生变化。因此, 可通过检测 F-P 腔的谐振波长反演折射率, 其关系为

$$n = \frac{n_0 \lambda}{\lambda_0} \quad (5)$$

式中, n 为腔内物质的折射率; λ 为 F-P 腔所对应的谐振波长。腔内待测物质的折射率变化为 Δn , 引起的谐振波长变化 $\Delta \lambda$ 可表示为

$$\Delta \lambda = \frac{2\Delta nL}{m} \quad (6)$$

2 式 F-P 腔折射率传感器件设计、仿真和制备

2.1 基本结构

开式 F-P 腔折射率传感器的结构如图 1 所示,

由多组 H_4/SiO_2 膜层交替排列组成的上腔镜 1、下腔镜 2 以及腔层三部分组成。其中腔镜 1 和腔镜 2 的作用是构成开式 F-P 腔谐振所需的高反射镜, 其反射率的大小由 H_4/SiO_2 的组数决定, 谐振波长由腔长 L 和腔内介质折射率决定。

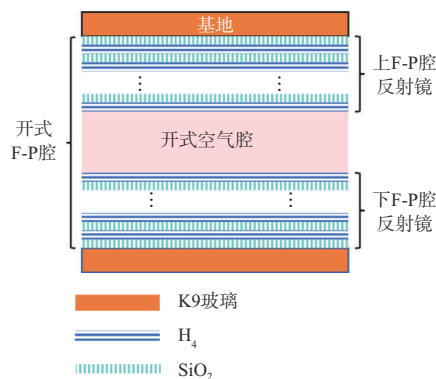


图 1 开式 F-P 腔传感器结构

2.2 仿真研究

采用时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 对开式 F-P 腔的特征参数进行了仿真研究, 仿真过程中的主要变量为上下腔镜的反射率和腔长。多组 $(\text{H}_4/\text{SiO}_2)^s$ 组成腔镜 1 和 2, s 是周期数, 其中 H_4 单层厚度为 82.38nm, SiO_2 的单层厚度为 110.51nm。在仿真过程中, 腔镜反射率通过改变周期数 s 分别为 7、8、9、10、11、12; 腔长改变为半波长的整数倍, 分别为 1.6525 μm 、2.9745 μm 、3.305 μm 、3.6355 μm 、4.2965 μm 。图 2 为开式 F-P 腔特性曲线, 包括透过率, Q 因子, FSR, 以及 FWHM, 分别通过式 (1), (2) 以及式 (3) 计算获得。

由图 2 (a) 的可以看出, 随着腔镜反射率的提升, F-P 腔的半高宽从 9.52nm 减小到 0.52nm (如图 2 (c) 所示), 品质因子从 14.29 增加到 1682.93 (图 2 (b)), 对应的精细度从 68.28 增加到 1250, 显然高的腔镜反射率提高了 F-P 腔的传感灵敏度能力。图 2 (c) 给出了 FSR 随腔长变化的仿真曲线, 腔长增加, FSR 从 68nm 减小到 42.5nm, 直接影响 F-P 腔折射率测量范围, 相比于光纤 F-P 腔的 FSR, 明显可以拓展折射率的测量范围^[10, 11]。

基于以上仿真结果可知, 腔镜反射率和腔长是影响 F-P 腔性能的主要因素。腔长主要影响 FSR 的大小, 对应折射率测量范围, 较大的 FSR 可保证传感腔内折射率的大范围变化。当腔长为 330.5nm 时可获得最大的 FSR, 但是对实际的腔长制备带来困难。反射率主要影响品质因子和精细度, 反射率越大, F-P 腔的品质因子和精细度越高, 透射带宽越窄, 相邻透射峰的分辨率高, 有助于提高折射率测量的分辨率。

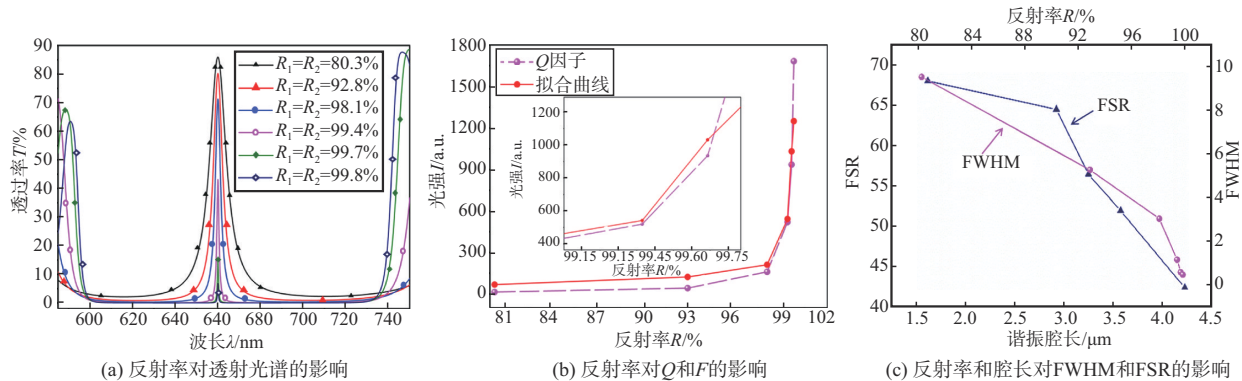


图 2 反射率及腔长对开式 F-P 腔性能的影响

改变腔层材料的折射率从 1.33 到 1.38，变化步长为 0.01，谐振波长的变化如图 3 (a) 所示。当折射率增加，腔长几何厚度不变时，相当于增加光学厚度，根据式 (4)，对应的谐振波长增加，使得 F-P 腔的峰值波长发生红移，这是因为折射率改变导致光通过 F-P 腔的光程发生变化。图 3 (b) 给出了谐振波长位置和折射率之间的一次回归关系，由斜率得到折射率传感的设计灵

敏度为 385.7nm/RIU。

基于上述对 F-P 腔参数的仿真分析 (图 2)，以及对折射率变化的响应特性分析 (图 3)，考虑到目前薄膜技术的制备精度和工艺可行性，选定腔长在 3.305 μm (是中心半波长的 10 倍)，在这种腔长下的精细度达 1000 以上，最终设计的谐振腔基本结构参数和特性参数如表 1 所示，对应的光谱曲线如图 4 所示。

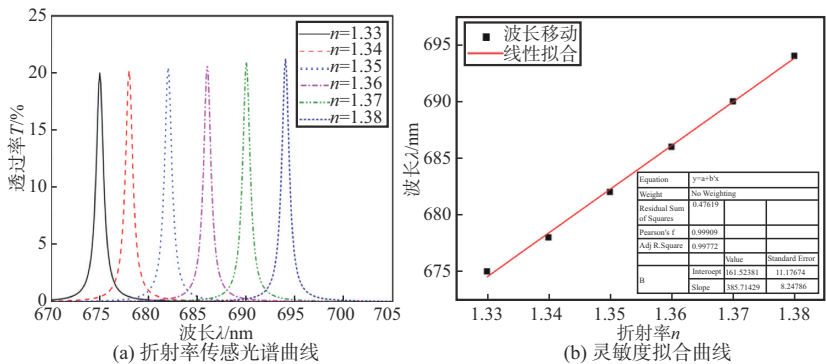


图 3 折射率传感仿真结果

表 1 F-P 腔光传感器设计结果

中心波长/nm	FWHM/nm	品质因子(Q)	腔长/ μm	自由光谱范围(FSR)/nm	精细度(F)	反射率/%
661	0.9	734.4	3.305	41.07	1031.75	99.7

2.3 制备和封装

开式 F-P 腔折射率传感器制备主要包括高反射膜制备、腔长调控、和封装测试三个环节。其制备流程如图 5 所示，首先通过电子束热蒸发薄膜沉积技术制备 F-P 腔的腔镜；其次，通过紫外光刻技术对腔长进行调控；最后，通过专用的 F-P 腔夹具对 F-P 腔进行封装并进行光谱测试。

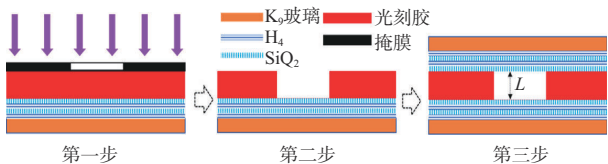


图 5 开式 F-P 腔光传感器制备流程

图 4 透射/反射曲线

采用 NewView 8200 白光干涉仪对腔长进行测试，测试结果如图 6 所示，厚度为 3.355 μm ，与设计 3.305 μm 腔长相差为 0.05 μm 。

为了保证上下腔镜平行，设计了一种专用夹具，基本结构尺寸和实物如图 7 (a) 和 (b) 所示，21 $\times$ 18 $\times$ 0.5 (mm) 的沉孔中央处开 10 $\times$ 10 (mm) 的通光孔，用来固定下腔镜，然后将上下腔镜对准后，完成开式 F-P 腔的封装，封装后的开式 F-P 腔光传感器如图 7 (c) 所示，其光谱曲线如图 7 (d) 所示。

从图 7 (d) 开式 F-P 腔光传感器的光谱测试结果可以看出，在反射带范围内存在波长分别为 642.2nm、667nm、694.2nm 的三个谐振峰，其透过率分别为 8.9%、3.87%、6.23%，中心波长

667nm 处谐振峰的 FWHM 为 2.64nm, 结合式 (1) 可得到其 Q 值为 252.65; 由式 (3) 结合所测得的反射率, 其 F 为 625.2, 由式 (2) 计算相邻波长之间的距离为 24.6nm 和 27.4nm, 即为传感器的 FSR。峰值透过率的降低主要是因为上下腔镜装配不平行导致的相位失配。667nm 峰值低于两侧的峰值, 是因为相位失配的程度不同。实际实验中, 通过调整夹具的松紧程度, 位于 642.2nm 和 694.2nm 处的峰值强度会对应的改变。

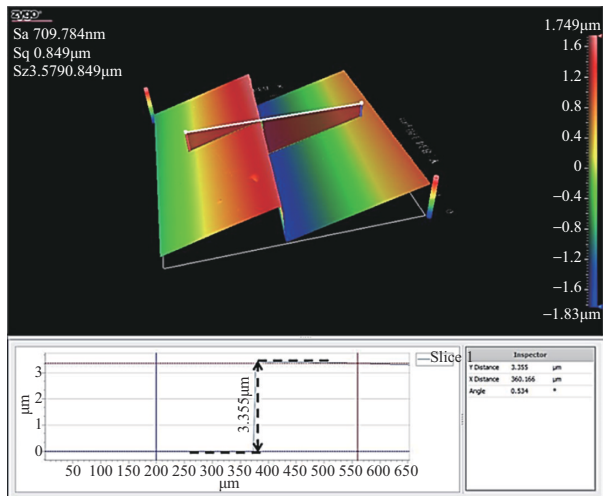
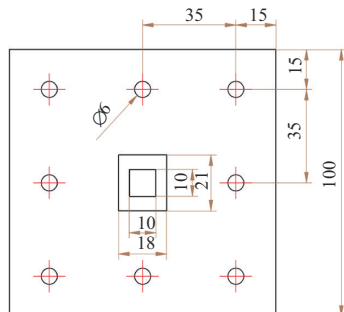
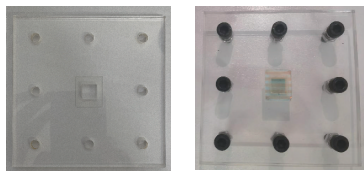


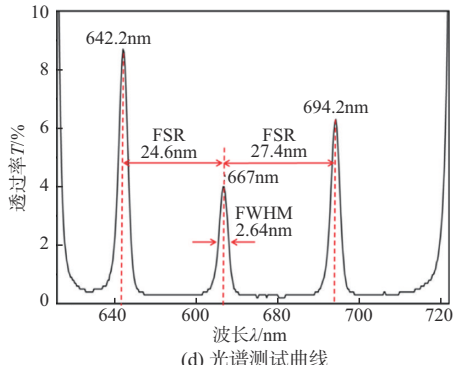
图 6 腔长调控测试结果



(a) 开式 F-P 腔夹具图纸



(b) 开式 F-P 腔夹具实物 (c) 封装的开式 F-P 腔



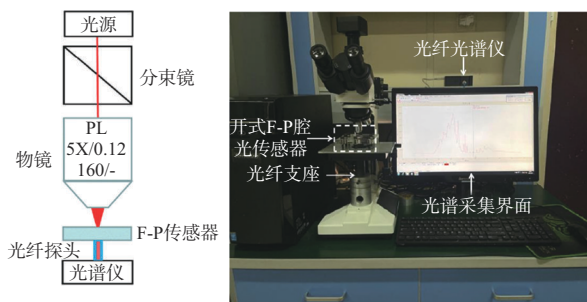
(d) 光谱测试曲线

图 7 开式 F-P 腔的封装与测试

目前所做的实验装置, 腔镜平行度受两个因素影响, 一是腔层厚度的均匀性, 实验中主要受匀胶胶层厚度均匀性影响 (图 5 工艺第二步); 二是受装配工艺影响 (图 7 (c))。实验中, 匀胶胶层通过转速和胶浓度优化, 可以匹配出均匀性良好的腔层, 因此现有传感器的腔镜不平行主要还是装配工艺影响的。装配中, 通过调整图 7 (c) 的 8 个螺丝, 并实时的观看透过率曲线, 找到最佳工作位置。作为原理样机, 现有的调节方案不适合批量制备和生产, 下一步预计采用专用定位工装, 保证腔镜的平行度, 满足批量制备需求。

3 折射率测试验证

如图 8 (a) 和 8 (b) 分别为折射率传感测试系统的原理图和实物图, 折射率测试系统由 XZJ-2030B 型正置显微镜、S3000-UV-NIR 型光谱仪、SMA905-Y 型光纤组成。



(a) 折射率测试系统原理图

(b) 实际折射率测试系统

图 8 折射率传感测试系统原理及实物

配制质量分数分别为: 0.0%、0.6%、1.4%、2.0%、2.7%、3.3%、3.9%、4.6% 的 NaCl 溶液作为折射率传感的待测介质, 记录不同溶液的光谱曲线。图 9 所示为待测液的透射光谱, 从透射光谱的中心波长变化可以看出, 随着 NaCl 溶液质量分数的增大, F-P 腔的透射峰向长波方向漂移。

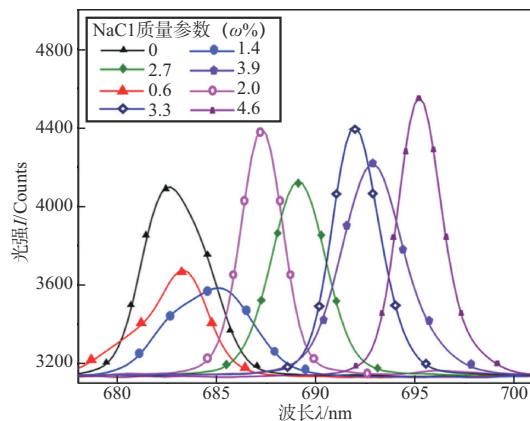


图 9 不同质量分数的 NaCl 溶液对应的透射光谱

不同质量分数的 NaCl 溶液对应的峰值波长分别为：682.65nm、683.31nm、685.03nm、687.21nm、689.03nm、691.96nm、693.24nm、695.16nm，F-P 腔的波长和腔内溶液之间的关系符合式（6），将

其带入式（6）内，对溶液的折射率和传感器的灵敏度进行计算与拟合，采用式（5）和式（6）对峰值波长改变量进行计算，其计算结果如表 2 所示。

表 2 溶液折射率及传感器灵敏度各项参数计算结果

NaCl 溶液($\omega\%$)	中心波长 λ/nm	FWHM/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta n/\text{RIU} \times 10^{-3}$	折射率/RIU	灵敏度 nm/RIU
0.0	682.65	3.53	/	/	1.33	346.65
0.6	683.31	3.52	0.66	1.29	1.33519	
1.4	685.03	4.83	1.72	3.35	1.34244	
2.0	687.21	3.06	2.18	4.25	1.34815	
2.7	689.03	3.20	1.82	3.55	1.35222	
3.3	691.96	3.12	2.93	5.71	1.35847	
3.9	693.24	3.59	1.28	2.49	1.36342	
4.6	695.16	3.09	1.92	3.74	1.36792	
平均值		3.32	/	/	/	

由表 2 的计算结果可以看出，折射率变化量越大，中心波长移动量越大，折射率平均每次改变 3.483×10^{-3} RIU，中心波长平均改变 1.79nm，一次线性回归拟合的灵敏度为 346.65nm/RIU（图 10 嵌入图所示）。

图 10 为不同折射率的溶液对开式 F-P 腔品质因子的影响规律，由表 2 中不同波长下的 FWHM 可以看出，当腔内介质由空气变为溶液介质时平均 FWHM 为 3.32nm，大于空气腔的 2.64nm（图 7（d）所示），进一步对其 Q 值进行计算，得到在不同折射率溶液中腔的品质因子特性，随着折射率的增大品质因子逐渐降低，这是由于随着折射率的增加，溶液对光学的吸收损耗增强，导致的 Q 值降低^[17]。

对传感器的重复性进行实验，在实验过程

中采用相同配比的 NaCl 溶液作为待测介质，充入 F-P 腔内的溶液质量分数由 4.6% 降低至 0%。图 11（a）为重复性测试的光谱曲线，随着腔内溶液折射率的降低，F-P 腔谐振的峰值波长向短波方向移动，而峰值位置与折射率增大时的峰值位置一致。图 11（b）为折射率重复性测试的灵敏度进行一次线性回归拟合，其灵敏度为 325.46nm/RIU，折射率重复性测试前后灵敏度的相对误差为 6.61%（两次实验的灵敏度差值除以第一次的灵敏度计算得到），传感器具有良好的折射率重复性。实验中，开展了多组次的折射率上升和下降实验，可以获得类似图 9 和图 11（a）类似的结果。另外，传感器的响应时间主要取决于溶液在开腔内注入时间，信号读出是纯光学信号读出，不影响传感器的迟滞性。

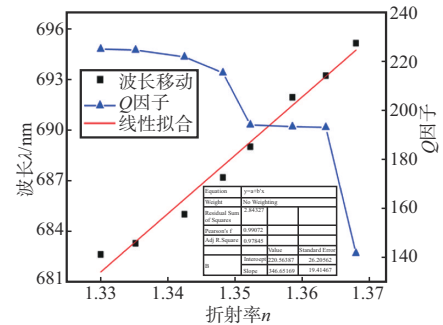
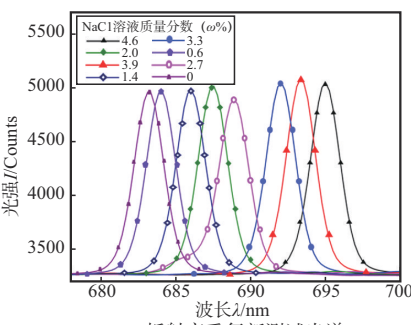
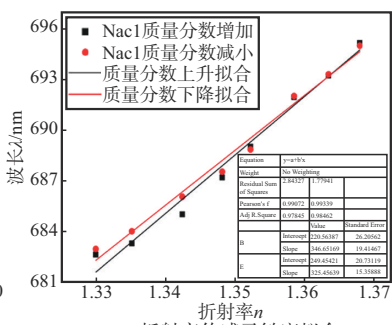


图 10 折射率对 F-P 腔 Q 值的影响

和已经发表的论文对比，本工作采用薄膜技术制备了短腔 F-P 折射率传感器，其 FSR 高达 48nm，优于文献[10]，[11]和[14]，折射率测量范围高两个数量级；和文献[16]相比，腔长长度接近，但是传感原理上，文献[16]采用可调谐激光光源，导致其 FSR 仅仅有 1.5nm 左右，限制了折射



(a) 折射率重复新测试光谱



(b) 折射率传感灵敏度拟合

图 11 折射率传感重复性测试

率测试量范围；在腔的品质上，本工作通过采用多组 SiO₂/H₄ 组成腔镜的薄膜技术方法，实现了 2.64nm 的半高宽，优于文献[10]，[11]和[14]，有利于高分辨率折射率探测；和文献[16]相比，其采用了激光泵浦光源，半高宽极低。实际上，折射率分辨率极限不仅受半高宽影响，还受信号测试

表 3 本文工作和已发表工作对比

序号	谐振腔长/ μm	FSR/nm	灵敏度/nm/RIU	FHWH/nm	测量范围	文献
1	93	12.9	~ 994	~ 18	0.013	[10]
	65	18.6			0.019	
	30	39.3			0.040	
2	10~20	86.45	1635.62	~ 30	0.0529	[11]
3	200	7	812.5	~ 3.5	0.0086	[14]
4	3.5	~ 1.5	411	0.026	0.0036	[16]
5	3.335	48	324	2.54	0.129	本文工作

用的光谱仪的波长分辨率影响，取决于二者之间的弱者。

4 结 论

开式 F-P 腔具有良好的光与物质相互作用的特点，被广泛应用于传感测试、光电探测、单光子源等领域的研究。目前开式 F-P 腔应用于传感领域的主要问题在于腔的品质因子较低、反射膜制备及腔长调节精度较低、以及封装后的稳定性较低，从而较难形成器件化的 F-P 腔光传感器。本文分析了开式 F-P 腔的结构组成、工作原理及特性参数。用 FDTD 对开式 F-P 腔性能进行仿真分析，得到反射率和腔长分别影响 F-P 腔的品质因子、精细度、自由光谱范围等参数的规律，并且对开式 F-P 腔的传感性能进行仿真分析。根据设计参数制备了 F-P 腔折射率传感器，完成了折射率传感测试研究，其折射率传感的灵敏度为 346.65nm/RIU，折射率测量差值范围高达 0.129。另外，采用薄膜技术制备的 F-P 折射率传感器，具备宽 FSR，高灵敏度特点，满足高测量精度和宽测量范围的实际需求。

参考文献：

[1] Xavier J, Yu D, Jones C, et al. Quantum nanophotonic and nanoplasmonic sensing: towards quantum optical bioscience laboratories on chip[J]. Nanophotonics, 2021, 10(5):1387—1435.

[2] Kunz R, Cottier K. Optimizing integrated optical chips for label-free bio-chemical sensing[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2006, 384(1):180—190.

[3] Chen W, Kaya O S, Zhao G, et al. Exceptional points enhance sensing in an optical microcavity[J]. Nature, 2017, 548(7666):192—196.

[4] Vahala K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839—846.

[5] Yoshie T, Tang L, Su S. Optical microcavity: sensing down to single molecules and atoms[J]. Sensors, 2011, 11(2):1972—1991.

[6] Bitarafan M H, Decorby R G. On-chip High-finesse Fabry-

perot microcavities for optical sensing and quantum information [J]. Sensors (Basel), 2017, 17(8):1748.

[7] Fan H, Gu X, Zhou D, et al. Confined whispering-gallery mode in silica double-toroid microcavities for optical sensing and trapping[J]. Optics Communications, 2019, 434:97—103.

[8] Yang D, Kita S, Liang F, et al. High sensitivity and high Q-factor nanoslotted parallel quadrabeam photonic crystal cavity for real-time and label-free sensing[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(6):063118.

[9] Islam M R, Ali M M, Lai M H, et al. Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review[J]. Sensors, 2014, 14(4):7451—88.

[10] Liu Y, Qu S. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown for refractive index sensing[J]. Appl Opt, 2014, 53(3):469—74.

[11] Tian J, Lu Z, Quan M, et al. Fast response Fabry-Perot interferometer microfluidic refractive index fiber sensor based on concave-core photonic crystal fiber[J]. Opt Express, 2016, 24(18): 20132—42.

[12] Fu X, Liu L, Huang S, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index with F - P microcavity sensor based on graded-index few mode fiber[J]. Optics Communications, 2020, (455):124577.

[13] Yu X, Wang S, Jiang J, et al. Hybrid sapphire Dual-fabry—Perot-cavities sensor for high temperature and refractive index measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3911—3918.

[14] Tao J, Zhang Q, Xiao Y, et al. A Microfluidic-based Fabry-perot gas sensor[J]. Micromachines, 2016, 7(3):36.

[15] Vallance C, Trichet A A, James D, et al. Open-access micro-cavities for chemical sensing[J]. Nanotechnology, 2016, 27(27): 274003.

[16] 韩超, 邱诚玉, 侯梦迪, 等. 基于光微流单模激光的液体折射率测量[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(08):333—338.

Han Chao, Qiu Chenyu, Hou Mengdi, et al. Measurement of liquid refractive index based on optofluidic single mode laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(08):333—338.

[17] 张宇光, 李鹏, 王丽, 等. 外界环境对微球腔品质因数的影响[J]. 光子学报, 2011, 40(05):803—806

Zhang Yuguang, Li Peng, Wang Li, et al. Effect of the environment on microsphere Q-factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(05):803—806.