

基于微机电系统的法布里珀罗可调光滤波器

郭智慧¹, 李拥华¹, 杨 恒², 钟少龙^{2*}

¹上海大学理学院, 上海 200000;

²中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术联合国家重点实验室, 上海 200000

摘要 为实现调谐范围宽、调谐速度快、带宽窄、驱动电压低以及可批量化生产的可调光学滤波器, 提出了一种新型微机电系统(MEMS)可调光学滤波器。由高反射率可动光学镜面与准直扩束光纤端面组合法布里-珀罗(F-P)腔。通过静电驱动改变 F-P 腔的腔长以调整滤波器的输出光波长, 分析了可调光学滤波器的波长调谐原理和静电驱动原理, 给出了器件的结构参数和综合设计考虑。利用体硅加工工艺成功制作了可调光学滤波器样品, 并进行了实验测试。实验结果表明, 通过改变准直扩束光纤的初始位置, 3 dB 带宽与自由谱域之间具有可调性。该可调光学滤波器兼备了 MEMS 技术与光纤技术的优点, 并且结构紧凑、工艺简单、驱动电压低, 可用于光通信等场合。

关键词 光纤光学; 微机电系统; 法布里-珀罗腔; 可调光滤波器; 静电驱动

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0604007

Tunable Fabry-Perot Optical Filter Based on Micro-Electro Mechanical System

Guo Zhihui¹, Li Yonghua¹, Yang Heng², Zhong Shaolong²

¹College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200000, China;

²State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200000, China

Abstract In order to realize the goal of wide tunable range, fast tuning, narrow bandwidth, low actuated voltage, and mass production, a novel tunable optical filter based on micro-electro mechanical system (MEMS) is presented. The Fabry-Perot (F-P) cavity is composed of a movable optical mirror with high reflectance and the face of a fiber collimator. The output wavelength can be adjusted by changing the length of the F-P cavity through the electrostatic drive. The principles of wavelength tuning and electrostatic drive are analyzed. The structural parameters and comprehensive design method are discussed. The tunable filter is fabricated successfully by the bulk silicon technology and the experimental measurement is implemented. The test results show that the device can adjust between the 3 dB bandwidth and the free spectrum range by changing the original position of the fiber collimator. The filter takes the advantages of MEMS and fiber technology with compact structure, simple process and low actuated voltage. The device can be applied in many fields such as optical communications.

Key words fiber optics; micro-electro mechanical systems; Fabry-Perot cavity; tunable optical filter; electrostatic drive

OCIS codes 060.2330; 060.2370; 060.3510

收稿日期: 2016-12-29; 收到修改稿日期: 2017-02-28

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ250002)

作者简介: 郭智慧(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学 MEMS 器件设计与制作方面的研究。

E-mail: zhihuiguo@outlook.com

导师简介: 杨 恒(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事微纳电子机械系统和微纳传感器方面的研究。

E-mail: h.yang@mail.sim.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: shaolongzhong@mail.sim.ac.cn

1 引 言

可调光学滤波器是光纤通信、光纤传感和光纤激光系统中的关键器件之一,其性能的好坏直接决定整个测量系统的性能。目前,常见的可调光滤波器主要有马赫-曾德尔型^[1]、微波光子型^[2]、液晶型^[3]和光纤光栅型^[4]等,但由于它们调谐控制复杂、调谐速度慢、调谐范围窄、分辨率低等原因,其应用受到了限制。

近年来,基于微机电系统(MEMS)技术的法布里-珀罗(F-P)可调光滤波器因其插入损耗低、调谐速度快、可调范围广、精细度高等优势,受到广泛关注。可调光 F-P 滤波器的制作可以使用各种材料以及制作成各种不同的结构^[5]。压电材料与 MEMS 工艺的兼容性问题将导致基于压电技术的 F-P 腔长可调滤波器难以实用化^[6]。通过沉积介质薄膜来实现 F-P 腔体镜面结构的方法,在薄膜的厚度均匀性与应力控制方面存在一定的难度^[7-9]。

本文提出一种基于 MEMS 技术由高反射率的光学镜面与准直扩束光纤端面组成 F-P 腔的新型光学滤波器。由于准直扩束光纤初始位置的可调性,使得滤波器的自由谱域在一定范围内可任意调节,在精细度因子一定的前提下,半波宽与自由谱域之间具有可调性,并且工艺过程简单,使得同一批次的器件可以拥有不同的性能,为 F-P 滤波器的发展提供了新的方向。

2 MEMS F-P 可调光滤波器的设计

2.1 F-P 滤波器的工作原理

F-P 结构由两块高反射率的平行镜面组成,中间填以介质构成谐振腔,如图 1 所示。在不考虑平行镜面内反射光线在界面处的相位变化时,每个波和它前一个波的相位差对应平行镜面内走过的两段路程差,相位差为^[10]

$$\delta = 4\pi \frac{nL \cos\theta_i}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 L 为腔长, n 为腔内介质折射率, λ 为入射波长, θ_i 为入射角。

入射光在两高反射镜面间发生多次反射和透射,反射光和透射光发生多光束干涉,其透射光干涉光强分布为^[10]

$$A(\delta) = \frac{I_t}{I_i} = \left(\frac{T}{1-R} \right) \left/ \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2 \sin^2(\delta/2)} \right] \right., \quad (2)$$

式中 R 为镜面的反射率, T 为透射率。

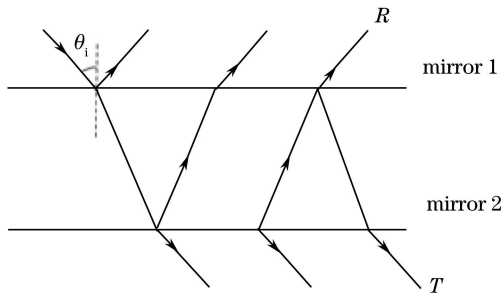


图 1 F-P 腔多光束干涉示意图

Fig. 1 Schematic of multi-beams interference in F-P cavity

当介质为空气($n=1$)、入射角为零($\theta_i=0$)时,可得到 F-P 透射波长($\lambda=2k$)与腔长 L 成正比,故可以通过改变腔长 L 来实现 F-P 透射波长的调谐。

2.2 F-P 滤波器的整体结构

基于 MEMS 技术的 F-P 可调光滤波器,由硅平板与光学薄膜构成的镜面、悬臂梁、F-P 腔体和带有光纤孔的支撑衬底组成,器件的结构简图如图 2 所示。由于光学薄膜对衬底的平整度要求很高,所以光学增透膜与光学高反膜分别制作于 SOI 硅片顶层硅两侧,且高反膜与光纤孔对准,在插入准直扩束光纤后,与其端面构成 F-P 腔。为了进一步降低器件光学损耗,在准直扩束光纤端面设置有自聚焦透镜,并在同一端面蒸镀

相同反射率的光学高反膜,并且硅基上的光学薄膜面积均大于准直扩束光纤的出射光束面积。F-P腔的运动空间通过在双抛硅片表面刻蚀得到。器件的驱动方式是平板电容静电驱动,电容的两电极分别位于SOI硅片顶层硅和双抛硅片形成的衬底上,中间由氧化层进行电绝缘。当器件施加驱动电压后,镜面在静电力的作用下平动,使得F-P腔长发生变化,故可实现调谐范围内的连续光波长调节。

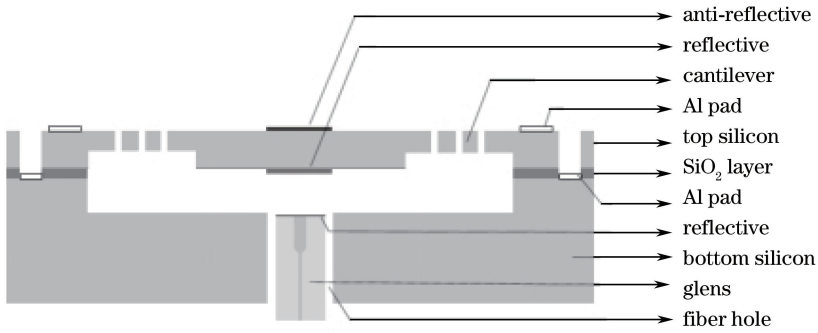


图 2 F-P 滤波器截面图

Fig. 2 Cross-section of the F-P filter

2.3 MEMS 结构与仿真

为满足光通信网络要求,设计调谐范围为 40 nm,取 $\lambda = 1550$ nm 的中心波长进行研究。为避免密集波分复用时分信号叠加所造成的混乱,F-P 滤波器的自由谱域不能小于光的调谐范围,即 $\lambda_{\text{FSR}} \geq 40$ nm。

由(1)式可知,当 $\delta = 4\pi(nL \cos \theta) / \lambda = 2m\pi$ 时,存在第 m 级干涉极大,由此可以得到干涉级数为 m 的中心波长为

$$\lambda_m = \frac{2nL \cos \theta}{m}, \quad (3)$$

自由谱域为

$$\lambda_{\text{FSR}} = \lambda_m - \lambda_{m+1} \approx \frac{\lambda_m^2}{2nL \cos \theta}, \quad (4)$$

取 $n = 1, \theta = 0$,则当 $\lambda = 1550$ nm 时,腔长 $L \leq 30.03 \mu\text{m}$ 。

由(4)式可知,改变F-P腔的初始腔长 L ,便可以调节自由谱域的大小,而F-P腔的初始腔长可以通过改变准直扩束光纤的初始位置来调节。根据精细因子的定义可知,在其一定的前提下,自由谱域与半波宽之间具有可调性。

由(3)式可知,F-P腔透射波长变化与腔长变化呈线性关系,可表示为

$$\frac{\Delta l}{L} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (5)$$

由(5)式可知,当可调谐范围和中心波长一定时,腔长 L 越小,所需的腔长变化量越小,由驱动所导致的镜面弯曲量也随之减小。光学镜面与静电驱动器集于一体,匹配以合适的梁结构,便可以使光学镜面拥有理想的运动模式。本文设计中,电极的初始间距 $L_0 = 10 \mu\text{m}$,为防止静电吸合导致的器件损坏,光学镜面的位移量最大应小于电极间距的 $1/3$,由于光学腔长的变化量等于电极的位移量,因此 $\Delta l \leq 3.3 \mu\text{m}$ 。当 $L = 10 \mu\text{m}$, $\Delta \lambda = 40$ nm, $\lambda = 1550$ nm 时, $\Delta l = 0.26 \mu\text{m}$ 。因此,当F-P腔长变化 0.26 时即可实现 40 nm 的波长调谐。

F-P 滤波器对两高反射镜面的平行度有极高的要求,为实现镜面的平动,则需要悬臂梁平动方向的刚度尽可能小,而其他方向的刚度尽可能大,蛇形曲折梁与其他相同尺寸的常用梁如 L 形梁、直梁以及 U 形梁相比检测模态刚度小,在满足平动的条件下,蛇形曲折梁尺寸更小^[11],故选择蛇形曲折梁。

在动态调谐过程中,可动镜面的相对平动与翘曲程度直接影响滤波器的性能,使用有限元软件 COMSOL 对结构的机电性能进行了模拟。为保证可动镜面在运动过程中的姿态,采用对称的蛇形梁结构。本征频率是表征微机电结构机械性能的关键参数,尤其可以表示结构在低频下是否具有有良好的抗震性能,对所设计结构的振动模式进行了仿真,参数设计与仿真结果如图 3 所示。图 3(a)为器件可动结构示意图,包括可动镜面与蛇形曲折梁及各自的尺寸。图 3(b)和(c)分别为该结构的一阶模态、二阶模态。一阶频率为

7373 Hz, 振型为上下平动, 二阶频率为 13142 Hz, 远大于一阶频率, 而器件的工作带宽只有几百赫兹, 所以一阶模态是器件在工作条件下的唯一振动模态。

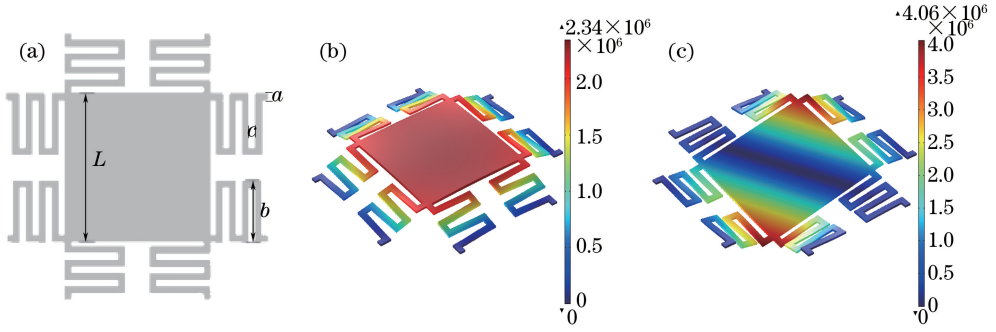


图 3 可动结构示意图及仿真结果。(a)可动结构示意图及尺寸, $L=2000, a=100, b=800, c=100$;
(b)一阶模态, $f=7373$ Hz; (c)二阶模态, $f=13142$ Hz

Fig. 3 Movable structure and simulation results. (a) Movable structure and parameters, $L=2000, a=100, b=800, c=100$;
(b) first modal, $f=7373$ Hz; (c) second modal, $f=13142$ Hz

由于镜面结构是对称的, 准直扩束光纤在镜面上的有效光斑直径大于 50, 所以, 当在电极两端施加一定大小的驱动电压时, 以镜面中心为原点, 对镜面结构进行了翘曲仿真, 结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出, 镜面的翘曲中心为 1000, 从图 4(b)可以看出, 中心翘曲起伏数量级为纳米, 因此, 镜面在实际运动过程中, 镜面中心能保持很好的平整度, 从而保证 F-P 腔的输出波形不产生劣化。

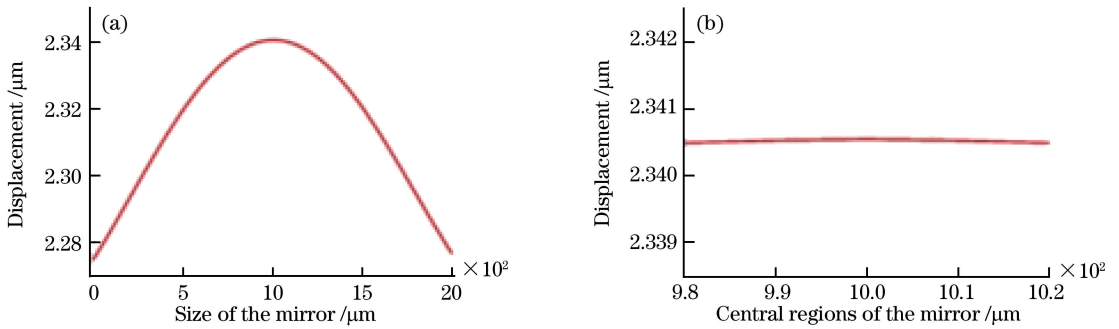


图 4 结构翘曲图。(a)镜面整体翘曲图; (b)镜面中心区域翘曲图

Fig. 4 Warping diagram of structure. (a) Warping diagram of the mirror; (b) warping diagram of the mirror centre

2.4 光学反射薄膜的设计

F-P 腔的精细度因子是衡量光学滤波器分辨能力的重要参数^[12]。由于硅材料本身的反射率只有 30%~70%, 故通常使用在平整的硅表面沉积高反射光学薄膜的方法制作滤波器的反射镜面。本文设计采用薄膜设计软件, 使用低折射率材料 SiO_2 与高折射率材料 TiO_2 作为沉积介质, 对具有四分之一波长厚度的多层堆垛高反射薄膜进行设计, 所设计的中心波长为 1550 nm, 反射率为 95.5%。膜系结构表示为 $(\text{LH}) \cdot \text{NLA} (\text{LH}) \cdot \text{NL}$, H 表示高折射率材料 TiO_2 的物理厚度, L 表示低折射率材料 SiO_2 的物理厚度, A 代表 F-P 腔长, $(\text{LH}) \cdot \text{N}$ 表示 N 对 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, 通过磁控溅射的方法, 将介质薄膜依次堆垛在衬底上。经过优化, N 取 5, SiO_2 层的物理厚度为 270 nm, TiO_2 层的物理厚度为 168 nm。

图 5(a)表示玻璃基底上高反射膜层反射率的模拟结果, 采用的膜系结构为 $(\text{LH}) \cdot 5\text{L}$, 模拟结果为 95.3%; 图 5(b)表示 F-P 腔初始腔长下的静态透射波长模拟结果, 采用的膜系结构为 $(\text{LH}) \cdot 5\text{LA} (\text{LH}) \cdot 5\text{L}$, 入射角度为 0° 。从图中可以看出, 软件模拟透射光谱符合典型 F-P 腔干涉谱。当腔长 $A=16.1 \mu\text{m}$ 时, 透射峰位置分别为 1540 nm 和 1638 nm。

考虑到光学高反膜沉积制备工艺对反射率的控制偏差一般为 $\pm 2\%$ 左右, 所以在制备硅基光学高反膜与准直扩束光纤端面高反膜的时候将反射率设计值确定为 97.5%, 从而使实际制备出的硅基光学高反膜与准直扩束光纤端面上的高反膜的反射率在 95.5%~99.5% 范围内, 保证 F-P 滤波器的精细度因子高于设计值。

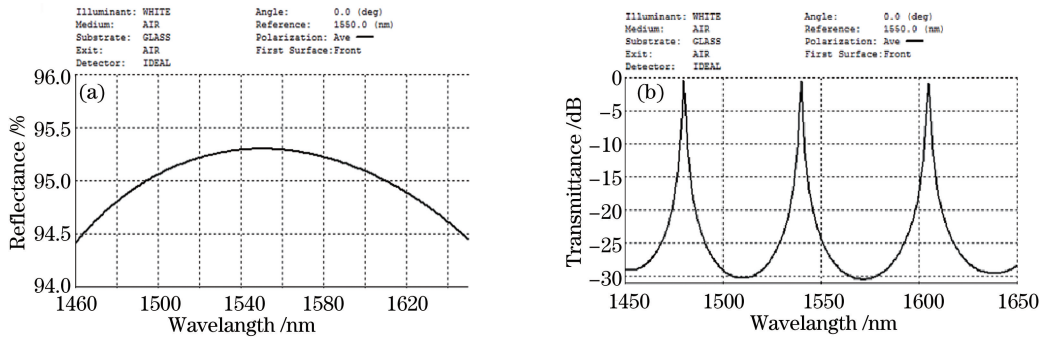


图 5 光学薄膜的光谱图。(a)玻璃衬底上反射谱图;(b)滤波器的透射谱图

Fig. 5 Spectrum of optical film. (a) Reflectance spectrum on glass substrate; (b) transmittance spectrum of filter

作为高反射膜沉积基底的硅表面以及反射镜面在工作时的运动状态,对滤波器的性能具有关键作用。镜面起伏是导致主透射峰劣化的主要原因,它使得半高宽增大,透射峰强度下降^[13]。为了避免硅基底表面的不平整所导致的镜面起伏,利用 SOI 硅片,将其顶层硅作为高反射镜面的基底。SOI 顶层硅厚度可以根据要求设计为几微米到几十微米,其厚度差异可以控制在纳米精度范围^[14],因此可以极大地简化制作流程,降低了器件制作的难度。

3 F-P 可调光滤波器的工艺制作

MEMS F-P 可调光滤波器由 SOI 硅片与双抛硅片键合而成。SOI 硅片用于形成蛇形曲折梁与光学镜面,双抛硅片用于形成 F-P 腔的运动空间与光纤安装孔。F-P 滤波器的制作工艺具体步骤如下:

- 1) 首先在 SOI 硅片的顶层硅上光刻,通过深反应离子刻蚀(DRIE)形成蛇形梁与电极的初始位置;
- 2) 在氧化双抛硅片上光刻,通过 DRIE 形成 F-P 腔的运动空间;
- 3) 将 SOI 硅片与双抛硅片进行硅硅键合,键合面均为两片的图图形面;
- 4) 在 50 °C、浓度为 40% 的 KOH 溶液中腐蚀去掉 SOI 硅片的衬底层,腐蚀直到 SOI 的埋氧层自停止,随后在双抛硅片表面光刻,之后通过 DRIE 形成光纤孔;
- 5) 使用反应离子刻蚀(RIE)除去 SOI 的埋氧层,并在顶层硅表面光刻,之后通过磁控溅射和 lift-off 的方式在顶层硅上沉积形成图形化的光学增透膜;
- 6) 在 SOI 硅片的顶层硅表面光刻,通过 DRIE 出电极孔;
- 7) 通过 Varian3180 溅射沉积 500 nm 的金属铝,随后通过光刻、磷酸腐蚀形成驱动电极;
- 8) 通过光刻,DRIE 形成蛇形曲折梁以及释放结构;
- 9) 通过光纤孔,采用磁控溅射的方式沉积光学高反膜,完成器件的制作。

器件的扫面电镜(SEM)照片如图 6 所示。器件尺寸为 5 mm×5 mm,在图 6(a)中,标注 1 为镜面区域,

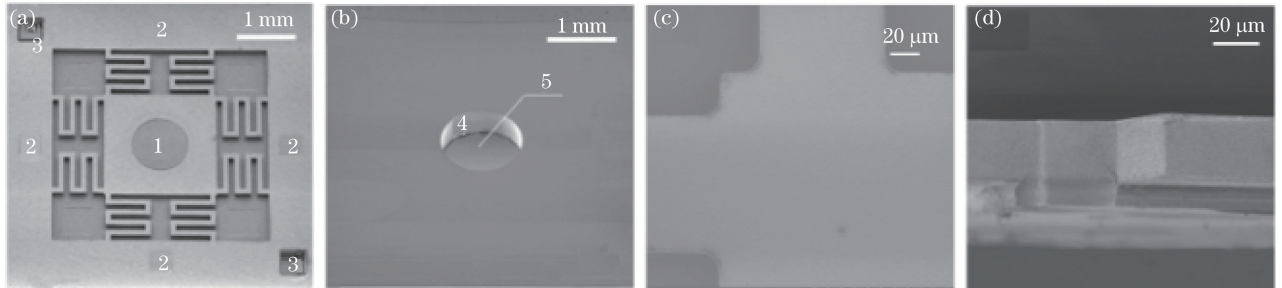


图 6 器件 SEM 照片。(a)器件正面的镜面、悬臂梁和电极部分;(b)器件背面的光纤孔及高反膜;
(c)梁根部的倒角与平移;(d)镜面与蛇形梁之间的台阶

Fig. 6 SEM images of the sample. (a) Front SEM image of the sample, cantilever and electrodes; (b) back of the sample, fiber hole and reflective film; (c) chamfer and translation of the cantilever in the root; (d) gap between the mirror and cantilever

颜色较深的部分为光学增透膜,标注 2 和 3 为电极区,其中标注 2 为上电极,与镜面的电位一致,标注 3 为下电极,与衬底的电位一致;在图 6(b)中,标注 4 为光纤孔,标注 5 为光学高反膜。为了减小蛇形梁根部的应力,在蛇形梁末端的连接处均设计了一定尺寸的倒角,并将蛇形梁分别向对称轴中心平移了一定的长度,这样可以避免蛇形梁之间的影响,结果如图 6(c)所示。如图 6(d)所示,为进一步降低蛇形梁在运动过程中垂直方向上的刚度,减小镜面运动过程中所需驱动电压,悬臂梁与镜面的上表面处于同一平面,两者的下表面存在高度差。

4 器件测试与性能分析

4.1 准直扩束光纤与 MEMS 芯片的耦合对准封装与测试

整个测试系统主要由 SOA 光源、输入单模准直扩束光纤、F-P 滤波器样品、输出单模准直扩束光纤、驱动器电源和光谱分析仪(MS9710C, Anritsu, 美国)等几部分组成,测试光路示意图如图 7 所示。

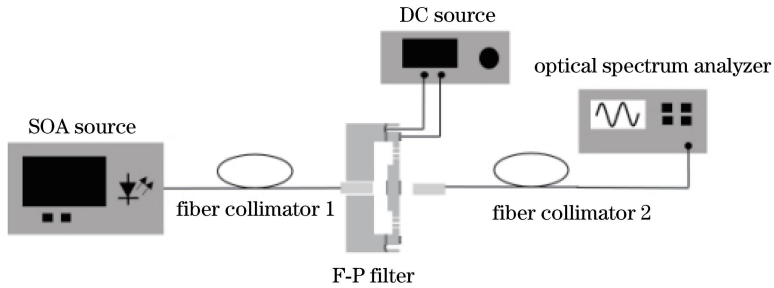


图 7 光谱测试系统示意图

Fig. 7 Schematic of the experimental setup

由于准直扩束光纤位置的可调性,故可以通过微调准直扩束光纤高反射端面与 F-P 滤波器高反射镜面之间的距离,设置多组初始腔长,从而获得不同的静态自由谱域和相应的 3 dB 带宽。在进行器件性能测试之前,需要在光学平台上,利用光谱分析仪将封装管壳内的 F-P 滤波器与五自由度调节架上的准直扩束光纤进行耦合对准。通过调节初始腔长,对同一批次两种不同参数的滤波器进行了测试,测试结果如图 8

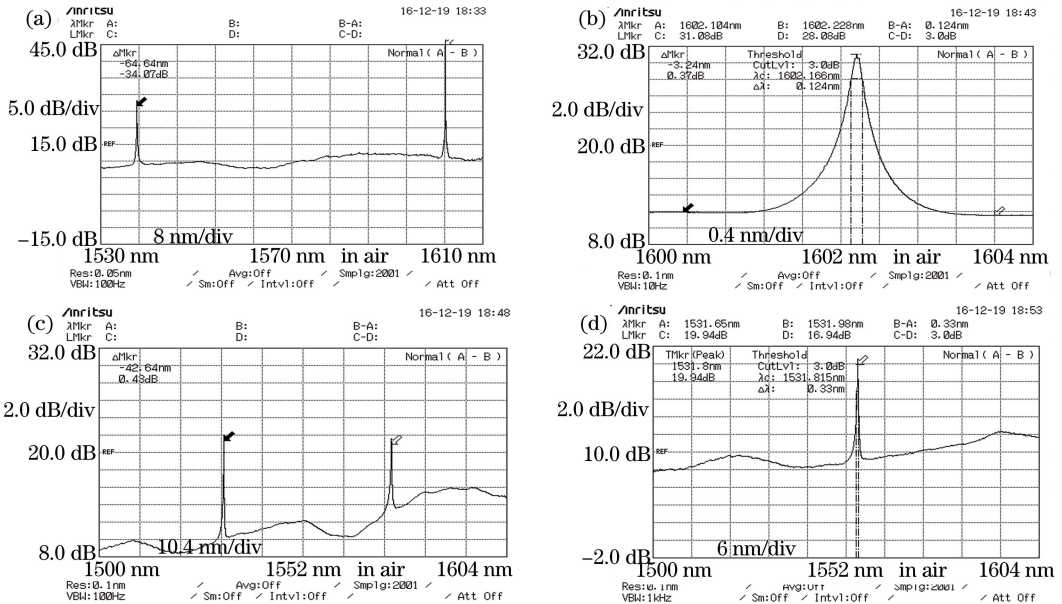


图 8 滤波器的自由谱域与 3 dB 带宽。(a) $\lambda_{FSR} = 64$ nm; (b) 对应的 3 dB 带宽 0.124 nm; (c) $\lambda_{FSR} = 42$ nm; (d) 对应的 3 dB 带宽 0.33 nm

Fig. 8 Free spectrum range and 3 dB bandwidth of the filter. (a) $\lambda_{FSR} = 64$ nm; (b) 3 dB bandwidth of 0.124 nm accordingly; (c) $\lambda_{FSR} = 42$ nm; (d) 3 dB bandwidth of 0.33 nm accordingly

图 8(a)、(b)所示是滤波器的自由谱域为 64 nm, 3 dB 带宽为 0.124 nm; 图 8(c)和(d) 所示是滤波器的自由谱域为 42 nm, 3 dB 带宽为 0.33 nm。由于光学高反膜沉积过程中反射率的误差和所选器件与准直扩束光纤的匹配随机性, 导致了不同器件最终的光学性能有所差异。本文制备的硅基 F-P 滤波器可调谐镜面的光学膜反射率约为 99%, 一致性较好。但由于准直扩束光纤端面直径仅为 125 μm , 不同器件之间表面沉积的光学膜厚度和均匀性离散较大, 因此, 二者组合后制作出的 F-P 滤波器的精细度因子有较大的离散性。

4.2 动态调谐特性

采用跨自由谱域跟踪法, 固定初始波长 1599 nm, 利用其透射峰值随电压变化的关系来测量器件的最大可调谐范围, 所固定的初始波峰如图 9 箭头所示。

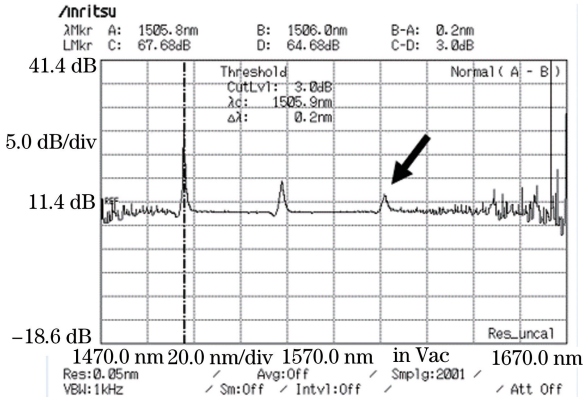


图 9 透射峰固定于 1599 nm

Fig. 9 Transmission peak in 1599 nm

随着滤波器两端电压的逐渐增大, 透射峰中心波长逐渐减小, 而且滤波器两端的电压越大, 透射峰波长越小。器件透射峰值与电压的关系如表 1 所示, 其关系曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看出, F-P 滤波器的最大可调谐范围约为 100 nm。

表 1 透射峰值与电压的关系

Table 1 Relationship between transmission peak and voltage

Voltage /V	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Peak wavelength /nm	1599	1598.9	1597.2	1594.5	1590.1	1584.4	1577.3	1567.8	1555.9
Voltage /V	45	47.5	49.3	50	51.1	52	53	54	54.5
Peak wavelength /nm	1541.8	1531	1524.8	1521	1516.5	1511.7	1506.1	1497.9	1494.3

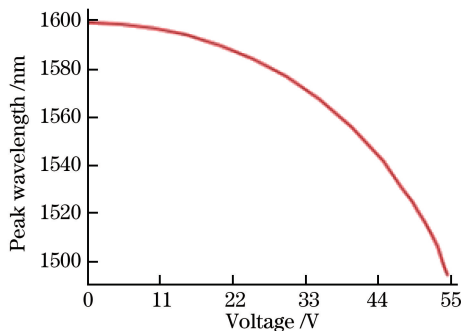


图 10 透射峰值随电压变化的关系曲线

Fig. 10 Transmission peak versus voltage

在外加三角波的情况下, 对器件进行测试, 实验结果表明, 滤波器可以用于 25 Hz 周期性光谱动态扫描, 结果如图 11 所示。图 11(a)是采用所制备的滤波器对波长标准具 (ETALON) 的光谱扫描结果, 结果表明, 器件可以实现对 1525~1565 nm 波长范围内 ETALON 的间隔为 0.8 nm 的 51 个不同波长的反射峰进行光谱探测和区分。图 11(b)是采用所制备的滤波器对单只光纤光栅的扫描结果, 结果表明, 器件可以实现对 3 dB 线宽为 0.2 nm 左右的光纤光栅反射光谱的精细扫描。

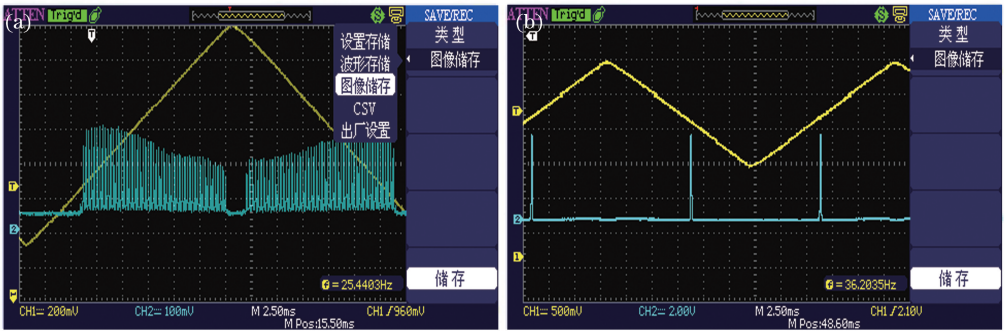


图 11 光谱周期性动态扫描。(a)光谱的探测与区分;(b)光谱的精细扫描

Fig. 11 Periodic dynamic scanning of spectrum. (a) Detection and distinction of spectrum; (b) fine scanning of spectrum

5 结 论

结合 MEMS 技术与光纤技术,设计并成功制作了一种新型 F-P 可调光滤波器。分析了 F-P 滤波器的工作原理,通过软件仿真,优化了器件的设计。由于准直扩束光纤初始位置的可调性,使得器件的自由谱域与 3 dB 带宽之间具有可调性,制作的器件可以在封装过程中根据具体要求形成不同性能的滤波器。所设计的滤波器拥有良好的重复性,在 54.5 V 驱动电压下可以拥有的最大调谐量约为 100 nm,并且根据光源的选择,性能可以进一步提升。该滤波器结构简单,工艺难度小,为 F-P 可调光学滤波器的设计提供了一种新的思路,可以此结构为基础,制备其他种类的 MEMS 传感器。

参 考 文 献

- [1] Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui, *et al.* All-fiber interleaved filter using Mash-Zehnder-based sampled fiber gratings[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(3): 243-246.
蔡海文, 黄 锐, 瞿荣辉, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 243-246.
- [2] Zhang Lili, Tong Zhengrong, Cao Ye, *et al.* Microwave photonic bandpass filter based on multi-wavelength fiber lasers and cascaded dispersion devices[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0205004.
张丽丽, 童峥嵘, 曹 晔, 等. 基于多波长光纤激光器和色散器件级联的微波光子带通滤波器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0205004.
- [3] Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Research in electro-optical tunable liquid crystal filter[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(s1): 46-48.
云茂金, 李国华, 王 宁. 电光液晶调谐滤波器的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(s1): 46-48.
- [4] Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long, *et al.* Wavelength tunable band-pass filter based on chirped fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 873-878.
姜 萌, 张伟刚, 金 龙, 等. 基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 873-878.
- [5] Irmer S, Daleiden J, Rangelov V, *et al.* Ultralow biased widely continuously tunable Fabry-Perot filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3): 434-436.
- [6] Xiang M, Cai Y M, Wu Y M, *et al.* Experimental study of the free spectral range(FSR) in FPI with a small plate gap [J]. Optics Express, 2003, 11(23): 3147-3152.
- [7] Lin W T, Chiou J C, Chou B C S. A photonic device compatible process in fabricating tunable Fabry-Perot filter[J]. Optics Communications, 2002, 210(3-6): 149-154.
- [8] Bartek M, Correia J H, Wolffenbuttel R F. Silver-based reflective coatings for micromachined optical filters[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1999, 9(2): 162-165.
- [9] Raley N F, Ciarlo D R, Koo J C, *et al.* A Fabry-Perot Microinterferometer for visible wavelengths[C]. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1992: 170-173.
- [10] Liang Quanting. Physical optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [11] Xiao Yuhua, Song Zhaohui, Ge Xiaohong, *et al.* Serpentine elastic beam vertical comb actuator using silicon plastic

- deformation[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(3): 141-144.
- 肖育华, 宋朝辉, 戈肖鸿, 等. 基于硅塑性变形的蛇形梁垂直梳齿驱动器[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(3): 141-144.
- [12] Zhai Leiyang, Xu Jing, Li Sihua, *et al.* Study on tunable MEMS F-P optical filter with low actuated voltage[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(7): 965-971.
- 翟雷应, 徐 静, 李四华, 等. 低电压驱动的 MEMS F-P 可调光学滤波器研究[J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(7): 965-971.
- [13] Zuo Yuhua, Mao Rongwei, Huang Changjun, *et al.* The effect of mirror undulation on optical property of Si-base MEMS optical tunable filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(6): 661-664.
- 左玉华, 毛容伟, 黄昌俊, 等. 镜面起伏对 1.55 μm Si 基 MEMS 光滤波器的影响[J]. *光子学报*, 2003, 32(6): 661-664.
- [14] Raskin J P, Iker F, André N, *et al.* Bulk and surface micromachined MEMS in thin film SOI technology [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(8): 2850-2861.