

一种新型微机电系统法布里-珀罗滤波器的设计与分析

张建飞^{1,2} 庄须叶¹ 汪为民¹ 陶逢刚^{1,2} 姚 军¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 基于微机电系统(MEMS)技术,提出了一种光栅与法布里-珀罗(F-P)腔相结合的新型 MEMS F-P 滤波器结构,这种滤波器既能保证较宽的自由光谱范围又能够获得较窄的半峰全宽。从实现机理、参数设计和选择对 F-P 滤波器的结构进行了深入分析,并着重对微桥桥面的机电性能进行了仿真计算。通过选择不同的微桥桥面厚度(0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1 μm),比较微桥在静电力作用下的平整度,发现当微桥表面厚度为 1 μm 时,得到了一个较优结果,在 5 V 电压下,上反射镜的倾斜位移 ΔL 为 9.11 nm,最大腔长变化量为 242 nm,这样能保持前后腔面反射光的平行要求,从而保证滤波器的滤波效率和对选择光的利用率。该滤波器能够解决传统微型滤波器自由光谱范围与半峰全宽相互限制的矛盾,提高微型滤波器的性能。

关键词 光学器件;微机电系统;滤波器;光栅;可调谐法布里-珀罗腔;微桥

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0822005

Structure Design and Analysis of a New Type MEMS Fabry-Perot Filter

Zhang Jianfei^{1,2} Zhuang Xuye¹ Wang Weimin¹ Tao Fenggang^{1,2} Yao Jun¹

(¹ State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro Fabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on micro-electromechanical systems (MEMS) technology, a new MEMS Fabry-Perot filter structure combining with grating and Fabry-Perot cavity is proposed. This filter can not only ensure a wide free spectral range, but a narrow full width at half maximum (FWHM). The implementation mechanism, the parameters selection and the structure of the Fabry-Perot filter are analyzed deeply, and a simulation to calculate the mechanical and electrical properties of the micro-bridge deck is made. By choosing different thicknesses of the micro-bridge deck (0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 μm), and comparing with the flatness of micro-bridge within electrostatic interactions, it is found that when thickness is 1 μm and voltage is 5 V, the tilt displacement of the upper-mirror is 9.11 nm and the maximum cavity length change is 242 nm, which can maintain top and bottom cavity surface reflecting light parallel, and ensure filter's filtering efficiency and selected light utilization. This novel filter is able to solve the contradiction that the free spectral range and the FWHM restrict from each other in traditional micro-filters. Thereby, the performance of the micro-filter has improved.

Key words optical devices; micro-electromechanical system; filter; grating; tunable Fabry-Perot cavity; micro-bridge

OCIS codes 220.4830; 050.2230; 050.2770; 050.1950

收稿日期: 2012-02-20; 收到修改稿日期: 2012-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(60978051)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030124)和西部之光博士资助课题(A11K011)资助课题。

作者简介: 张建飞(1986—),男,硕士研究生,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: zjf425190955@126.com

导师简介: 姚 军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统、射频微机电系统及器件等方面的研究。

E-mail: junyao@ioe.ac.cn(通信联系人)

1 引言

滤波器是一种波长选择器件,能让有用的信号尽可能无衰减地通过而尽可能大地衰减无用信号。可调谐的法布里-珀罗(F-P)滤波器由于具有结构灵活、精细度高和调谐速度快等优点,成为现代宽带光网中的一种核心器件,例如在波分复用光纤网络中,它可将光纤中不同波长传输的信号进行复用或解复用,或者在光网络中用作光插、分复用器^[1~4]。目前,基于微机电系统(MEMS)技术的F-P滤波器不仅能充分展现其原有的性能,而且具有体积小、成本低和集成度高等优点,因此已经成为了重要的研究方向^[5~7]。

微F-P滤波器一般有三个主要的光学参数:自由光谱范围(FSR),即光谱中相邻两个透射波的中心波长之间的谱宽;半峰全宽(FWHM),即透射率为峰值一半处的波形宽;精细因子 F ,即自由光谱范围与半峰全宽的比值,它表示了波形的精细程度^[8~10]。获得宽自由光谱范围和窄半峰全宽是微F-P滤波器制作时需要考虑的主要因素,然而,微F-P滤波器自由光谱范围与半峰全宽在理论上是相互限制^[11]的,难以实现同时提高,宽自由光谱范围需要以牺牲窄半峰全宽为代价。由此,本文提出一种光栅与F-P腔相结合的光调制方案,可以实现宽自由光谱范围,窄半峰全宽的F-P滤波器。

2 实现机理

F-P滤波器实质上就是F-P干涉仪,利用多光束干涉原理,如图1所示,当入射光波长 λ 与腔长 L 满足

$$2nL \cos \theta = m\lambda \quad (1)$$

时,透射光干涉增强,能产生明亮精细的条纹,在长度计量和光谱超精细的研究中有很好的运用。式中, n 、 m 和 θ 分别是腔内的介质折射率、腔干涉级次和入射角。

根据多光束干涉原理,F-P滤波器的半峰全宽^[12]为

$$W_{1/2} = \lambda_m(1-R)/m\pi\sqrt{R}, \quad (2)$$

式中 R 为镜面反射率, m 为干涉级次。而自由光谱范围^[12]

$$R_{\text{fsm}} = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{2nL}{m(m+1)} = \frac{\lambda_m}{m+1} \approx \frac{\lambda_m}{m}. \quad (3)$$

微F-P滤波器的自由光谱范围越大表明能通

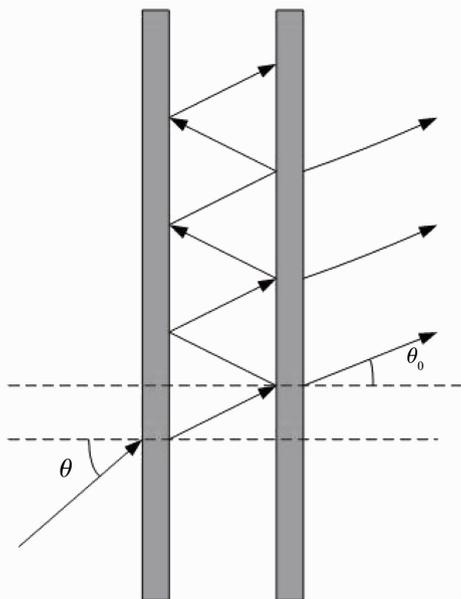


图1 F-P腔多光束干涉示意图

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

过此F-P腔可调谐光滤波器的波分复用(WDM)信号的波长信道数越多,而半峰全宽越小,说明F-P腔可调谐光滤波器的选择性能越好。由(1)式知,增大腔长也就是增大干涉级次,能有效减小半峰全宽长度,但这样会限制自由光谱范围。为了获得大的自由光谱范围,一般选择小干涉级次。所以要减小半峰全宽,只有采用极高的镜面反射率来实现。而高反射率也意味着透过光强的急剧减弱,对之后的探测器灵敏度要求很高。在某些场合,可以通过提高入射光强降低探测器对灵敏度的要求,但这又将引发散热问题。

平面相位光栅与F-P腔相集成的滤波器(如图2所示)能够解决自由光谱范围和半峰全宽之间难以调和的矛盾,其实现的机理就是先让辐射光通过透镜准直后入射平面光栅,经光栅色散后的-1级衍射光再通过F-P腔进行滤波,F-P腔后设置聚焦透镜,使波长满足条件的光波在CCD形成光谱条纹。设计F-P腔腔长可调,连续改变滤波条件实现波长扫描。

光束经过光栅后的衍射角与波长相联系,在自由光谱范围内一一对应。为了能够区分波长 λ 与 $\lambda + \Delta\lambda$,两者的衍射角必须有差异。但是当 $\Delta\lambda$ 足够大时, $\lambda + \Delta\lambda$ 的-1级衍射角与 λ 的-2级衍射角相同,此时将使得光谱不能分辨。也就是说 $\Delta\lambda$ 就是光栅的自由光谱范围。光栅后放置可调F-P腔对衍射光进行干涉滤波,探测面上将形成一系列分离的干涉条

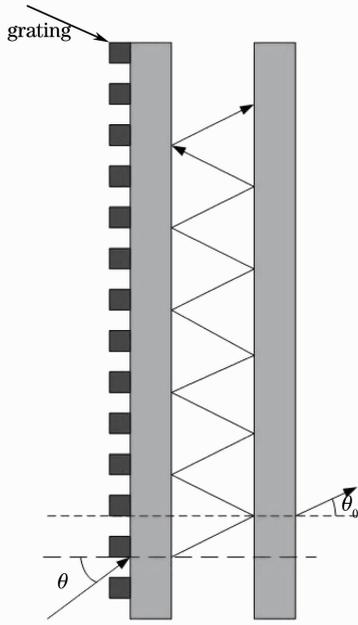


图2 光栅与F-P腔相结合的示意图

Fig.2 Schematic diagram of a composition of grating and F-P cavity

纹。调节腔长各分离干涉条纹的位置将发生移动,也就是改变条纹所对应的峰值波长,根据光栅方程 $d(\sin \theta_0 - \sin \theta) = k\lambda$ (k 为整数)与(1)式,可推得峰值波长与F-P腔干涉级次 m 的关系为

$$\frac{4\pi nL}{\lambda d} \sqrt{d^2 - (d \sin \theta + k\lambda)^2} = 2m\pi, \quad (4)$$

式中 L 为F-P腔腔长, d 为光栅周期, m 为F-P腔干涉级次。由于是-1级衍射光,即 $k = -1$ 。(4)式可简化成

$$\frac{4\pi nL}{\lambda d} \sqrt{d^2 - (d \sin \theta - \lambda)^2} = 2m\pi. \quad (5)$$

从图3中可以看出,随着腔长逐渐减小,各干涉级次所对应的峰值波长也相应减小。满足滤波条件的一系列干涉级次将光栅的自由光谱范围分割,各个干涉级次所承担的波长扫描范围并不大,其中不同的干涉级次则各自负责扫描一段较小的波长范围,因此可以选择较高干涉级次来减小半峰全宽[由(2)式知]从而提高滤波精度。只要腔长调制量足够,F-P腔自由光谱范围内的所有波长均可被扫描探测。

F-P腔在光调制器中只改变衍射光的振幅和相位,并不改变光的传播方向,对光栅自由光谱范围没有影响。先推导平行光通过光栅的光场角分布,进而求出衍射光通过F-P腔滤波后的光强函数。经过计算可以得到衍射光经过F-P腔滤波后的光强函数^[13]为

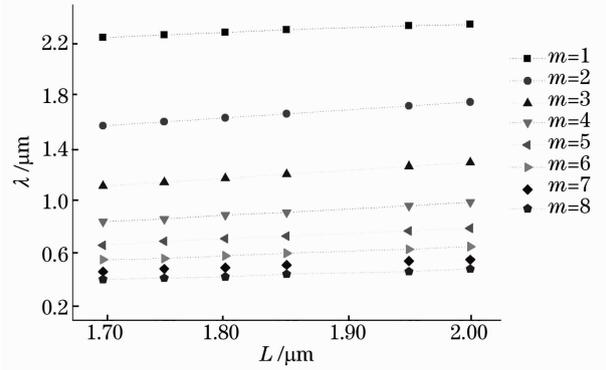


图3 各干涉级所对应的峰值波长随腔长变化图

($\theta_0 = 30^\circ, d = 1.8 \mu\text{m}, n = 1$)

Fig.3 Relation between peak wavelength of fringes and cavity length of the interferometer at different interference orders

$$I = |C_{g_x}|^2 f_y^2 N^2 \frac{\text{sinc}^2(N\alpha)}{\text{sinc}^2\alpha} \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\eta}, \quad (6)$$

(6)式表明光强调制函数由单光栅衍射因子 $|g_x|^2$, 多光栅周期干涉因子 $\text{sinc}^2(N\alpha)/\text{sinc}^2\alpha$ 和F-P腔多光束干涉因子 $(1-R)^2/(1+R-2R\cos\eta)$ 三部分相乘得到,其中 N 为光栅周期数, $\alpha = d(\sin\theta - \sin\theta_0)/\lambda$, η 是指衍射光通过F-P腔后来回一次产生的相位差。

3 结构设计及仿真

3.1 F-P滤波器的结构

MEMS F-P滤波器以900 nm为中心波长,具体结构如图4所示,DBR表示多层介质组成的反射镜。上下电极都在同一个平面上,金属微桥与上电极相连,通过静电驱动的方式,使金属微桥向下移动,从而改变腔长达到滤波的效果。光束从下反射镜的下表面射入,在下反射镜的下表面中间区域刻蚀光栅,而在光栅两边镀上增反(AR)膜,这样只要选择相应的反射镜材料就能达到对特定的波长进行滤波的效果。结构单元尺寸为 $300 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m}$ (宽×长)。

3.2 参数分析和选择

3.2.1 光栅周期 d 和台阶深度 h 的选择

由于光栅各级的衍射效率随着级次的增大而减小,采用中心波长的闪耀光栅将能最大限度地提高光能利用率。但由于闪耀光栅制作起来比较困难,采用矩形相位光栅,让能量较高的光栅-1级衍射光进入F-P腔滤波。衍射光应以尽量小的角度(不大于 30°)入射F-P腔,自由光谱范围内的最小

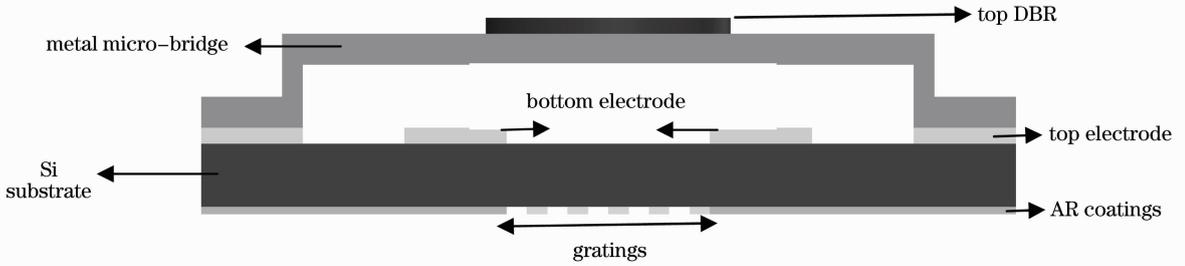


图 4 光栅与 F-P 腔相结合的滤波器结构示意图

Fig. 4 Schematic structure of a composition of grating and F-P filter

波长 λ_{\min} 和最大波长 λ_{\max} 的 -1 级衍射方向应当对称分布于光调制器法线两侧。根据光栅方程 $d(\sin \theta_0 - \sin \theta) = m\lambda$, λ_{\min} 、 λ_{\max} 与 -1 级衍射角的关系为^[14]

$$d[\sin \theta_{\max} - \sin \theta] = -\lambda_{\min}, \quad (7)$$

$$d[\sin(-\theta_{\max}) - \sin \theta] = -\lambda_{\max}, \quad (8)$$

得

$$d = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2 \sin \theta_{\max}}, \quad \sin \theta = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \sin \theta_{\max}. \quad (9)$$

由于介质表面反射率与入射角度密切相关,为了保证入射光束的透射率,要求入射角度不大于 30° ,即 $\sin \theta \leq 1/2$ 。将 $\lambda_{\min} = 800 \text{ nm}$, $\lambda_{\max} = 1000 \text{ nm}$ 代入(9)式得到

$$d = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2 \sin \theta_{\max}} = \frac{1}{\sin \theta_{\max}} \times 100 \text{ nm} \geq 1800 \text{ nm}, \quad (10)$$

取光栅周期 $d = 1800 \text{ nm}$ 。

图 5 为矩形光栅的基元结构。如果限制 b , 使 $b = d/2$, 可以计算出单光栅衍射因子^[14] $|g_x|^2$ 为

$$|g_x|^2 = \frac{2d^2}{\pi^2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi nh}{\lambda \cos \theta}\right) \right], \quad (11)$$

由(5)式的光强函数可知,增大衍射因子的取值,有助于提高光能利用率。因此可以设计光栅台阶深度 h 来改变衍射因子的大小。在自由光谱范围内

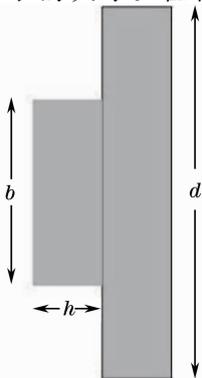


图 5 矩形光栅的基元结构

Fig. 5 Cell structure of rectangular grating

$(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}), \cos\left(\frac{2\pi nh}{\lambda \cos \theta}\right)$ 越接近于 -1 越好,可取

$$\frac{2\pi nh_1}{\lambda_{\min} \cos \theta} - \pi = 0, \quad (12)$$

$$\pi - \frac{2\pi nh_2}{\lambda_{\max} \cos \theta} = 0, \quad (13)$$

对于空气腔微 F-P 滤波器,当光垂直照射时,可得 $h_1 = 400 \text{ nm}$, $h_2 = 500 \text{ nm}$ 。所以取光栅台阶深度 $h = 450 \text{ nm}$ 。

3. 2. 2 微 F-P 腔初始腔长的尺寸选择

微滤波器的滤波性能直接受到 F-P 腔初始腔长尺寸的影响,根据 F-P 滤波器的工作原理,由(1)式知,入射光波长 λ 与腔长之间的关系为

$$L = \frac{m\lambda}{2n \cos \theta}, \quad (14)$$

把 $n=1, \theta=0$ 代入,得到 $L = m\lambda/2$ 。即 F-P 腔长等于半波长整数倍时,该波长发生多干涉加强,透过率最大。为了达到 200 nm 的光谱调谐范围同时考虑工艺制作的可行性以及加工的要求,且对于微纳器件,尺寸越小谐振频率越高,系统响应越快,因此在 $800 \sim 1000 \text{ nm}$ 的波长范围内,选择初始腔长 $L = 1.8 \mu\text{m}$ 。

3. 2. 3 微桥桥面的设计

微桥桥面的设计是结构设计重点,包括桥面尺寸大小、厚度及选用材料等。桥面尺寸太大了重量则太重,不但微桥桥腿负担不起,微桥桥面有可能因为自重而坍塌;太小了则通光孔径受到限制,影响滤波器性能。同样,桥面厚度如果过厚则增大了自身重量,进而影响腔长调谐范围和精度,过薄由于应力会发生桥面弯曲,从而影响微桥的均匀性和平整度等。

采用静电驱动的方式,在微桥材料的选取上,可用金属薄膜(AI)制作微桥结构,这样它在提供机械互联的同时,使得微桥桥面也充当顶部驱动电极的作用。微桥桥面所受静电力^[14]的大小为

$$F = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2a^2}, \quad (15)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, S 为平板的有限面积, a 是距离。当上下驱动电极之间加上电压, 实际上就形成了平行平板之间的电容, 外加电压为 U 时, 微桥单位面积所受的静电力 f 大小可表示为

$$f = \frac{F}{S} = \frac{\epsilon_0 U^2}{2(L - \Delta L)}, \quad (16)$$

式中 L 为微 F-P 腔初始腔长, ΔL 为腔长改变量。上下驱动电极的重合面积为电容平行平板的有效面积, 而重合电极的面积越大, 则在微滤波器其他结构尺寸一定的情况下, 驱动力矩越大, 越有利于微滤波器的腔长调谐。

为了保证微桥桥面在受静电力时的平行度, 在布置驱动电极的位置时需要考虑电极之间的距离大小。设计的滤波器结构将下电极放置在内侧, 选取下电极之间的距离为 $400 \mu\text{m}$, 两端的上电极直接与金属微桥相连。

3.3 微桥桥面机电性能仿真模拟

对于 F-P 腔可调滤波器, 镜面平整度直接影响到微 F-P 腔精细常数和对波长选择的灵敏性。一方面由于 F-P 腔中电场力分布的不均匀性, 会引起镜面受力大小的不同。另一方面由于支撑微桥桥腿的作用, 从而产生不同的形变。实际中只要 F-P 腔滤波器镜面最大的倾斜角不超过 0.006° 也能达到滤波效果^[15]。即

$$\sin \theta = \Delta L / r \leq \sin 0.006^\circ, \quad (17)$$

式中 r 为圆反射镜镜面半径, ΔL 为镜面边沿与圆心

之间的倾斜位移。当 $r = 100 \mu\text{m}$ 时, $\Delta L \leq 10.5 \text{ nm}$, 也就是说镜面倾斜位移不能超过 10.5 nm 。

在动态调谐过程中, 微镜必须尽可能保持垂直方向上的平动, 否则会造成中心波长的漂移和极大的损耗, 可动镜面的位移量与透射波长、调谐范围相对应, 而反射镜是在微桥的上表面。因此, 对于微桥桥面的机电特性模拟是很有必要的, 采用有限元分析的方法对于桥面在受静电力的作用下的动态过程进行了模拟。

先用 L-edit 软件设计好掩模板 (如图 6 所示), 再利用 IntelliSuit 有限元分析软件模拟微滤波器的机电特性。对微桥桥面厚度分别为 $0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 \mu\text{m}$ 进行仿真, 通过加不同的驱动电压分析微桥桥面的变化量和平行度。从图 7 中可以看出, 当微桥桥面厚度为 $0.5, 0.6, 0.7, 0.8 \mu\text{m}$ 时, 最大位移变化量 d 和倾斜位移 ΔL 不能同时满足设计要求。而当微桥桥面厚度为 $0.9 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 时分别在一定电压下能达到设计所要求的效果。图 7(e) 显示, 在电压为 4 V 时 F-P 腔的最大位移变化量 $d = 205 \text{ nm}$, 倾斜位移 $\Delta L = 8.66 \text{ nm}$; 图 7(f) 显示, 在电压为 5 V 时 F-P 腔的最大位移变化量 $d = 242 \text{ nm}$, 倾斜位移 $\Delta L = 9.11 \text{ nm}$ 。通过比较微桥桥面的厚度定为 $1 \mu\text{m}$ 。同时本征频率也是另一个关键的参数, 它可以衡量在低频振动环境下器件的抗震能力。对厚度为 $1 \mu\text{m}$ 微桥桥面, 一、二阶频的模拟仿真结果分别为 10242.1 Hz 和 23147.7 Hz , 符合设计要求。

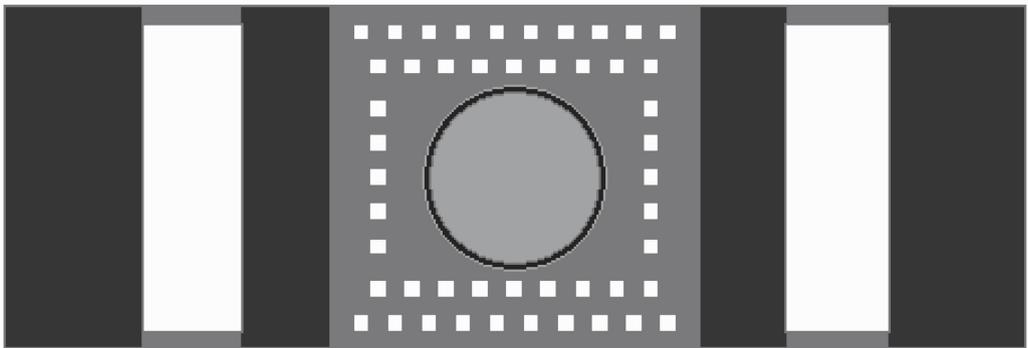


图 6 L-edit 设计的掩模板

Fig. 6 Mask designed by L-edit

4 结 论

对于一般微 F-P 滤波器而言, 为实现大的半峰全宽需以窄自由光谱范围为代价。提出将平面相位光栅与 F-P 腔相结合的方案, 使二者优势互补, 既

能够保证较宽的自由光谱范围又能够获得较窄的半峰全宽。满足滤波条件的一系列干涉级次将光栅的自由光谱范围分割, 从而实现在较小的半峰全宽下获得较大的自由光谱范围。采用有限元分析软件,

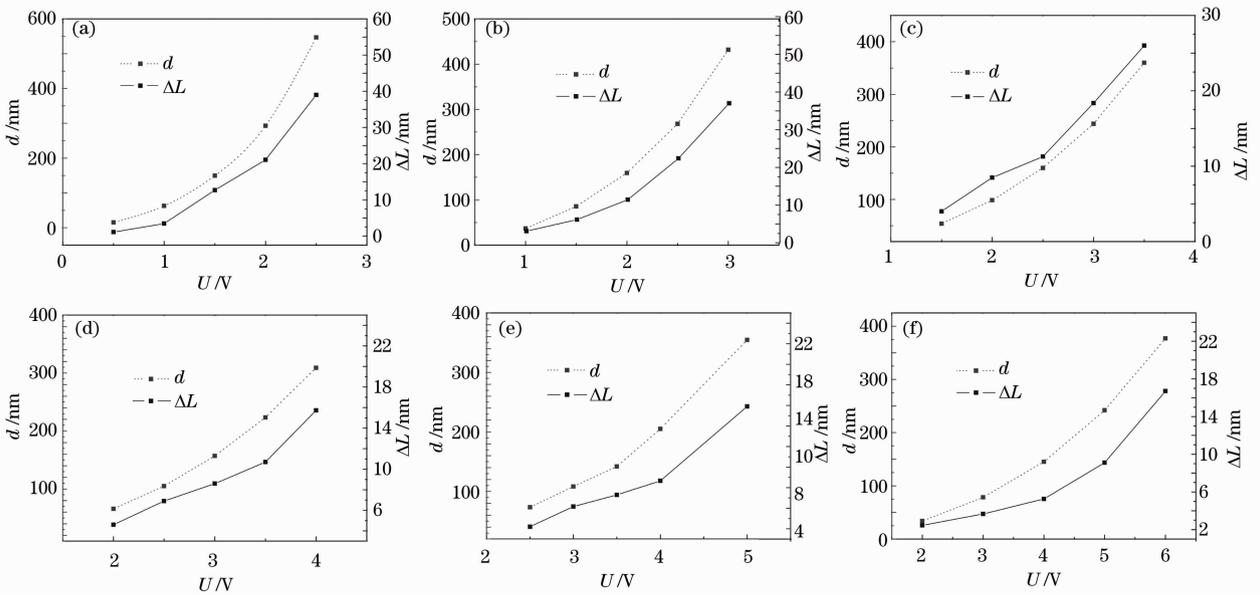


图 7 在不同电压下六种微桥厚度 F-P 腔的最大位移变化量 d 和倾斜位移 ΔL 。(a) $0.5 \mu\text{m}$;
(b) $0.6 \mu\text{m}$; (c) $0.7 \mu\text{m}$; (d) $0.8 \mu\text{m}$; (e) $0.9 \mu\text{m}$; (f) $1 \mu\text{m}$

Fig.7 Max displacement d and tipsy displacement ΔL of six micro-bridge thickness under different voltages. (a) $0.5 \mu\text{m}$; (b) $0.6 \mu\text{m}$; (c) $0.7 \mu\text{m}$; (d) $0.8 \mu\text{m}$; (e) $0.9 \mu\text{m}$; (f) $1 \mu\text{m}$

通过对 6 种不同桥面厚度的仿真分析,结果表明当微桥表面厚度为 $0.9 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 时,分别在 4 V 和 5 V 电压下,最大位移变化量 d 和倾斜位移 ΔL 能达到设计要求的效果。通过比较选择微桥桥面厚度为 $1 \mu\text{m}$ 时能达到最优效果,此时,电压为 5 V , ΔL 为 9.11 nm ,最大腔长变化量 d 为 242 nm 。为下一步 MEMS F-P 滤波器的加工提供了坚实的理论基础。

参 考 文 献

- 1 Yao Jun, Wang Weiming. Micro-Nano Systems Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 2011. 1~11
- 姚 军, 汪为民. 微纳系统技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 1~11
- 2 Sheng Zhengqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Perot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 3 Gong Li, Wang Yuehong. Optical wavelength division multiplexing technology and application [J]. *New Technologies and Products*, 2009, (14): 15
- 龚 莉, 王跃红. 关于光波分复用技术与应用 [J]. *中国新技术新产品*, 2009, (14): 15
- 4 Shi Sunxing, Liu Jifang. Photonics Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2010
- 石顺祥, 刘继芳. 光电子技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- 5 Niu Siliang, Rao Wei, Jiang Nuan *et al.*. Investigation on phase spectra of fiber Bragg gratings and the constructed Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806007

- 牛嗣亮, 饶 伟, 姜 暖等. 光纤布拉格光栅及其构成的法布里-珀罗腔的相位谱特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806007
- 6 Tong Xinglin, Lü Dajuan, Liu Lian *et al.*. Fabrication and experimental on a new kind of all-optical tunable Fabry-Perot filter[J]. *Wuhan Technology University Transaction*, 2009, **31**(1): 132~134
- 童杏林, 吕大娟, 刘 恋等. 新型全光纤型可调法—泊滤波器的制备与实验[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, **31**(1): 132~134
- 7 Wang Debing. Tunable Waveguide Filter with Optical Fabry-Perot Cavity[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006
- 王德兵. 基于法布里-珀罗腔结构的光学可调谐滤波器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- 8 Dong Xinyong, Kong Lingjun, Zhao Chunliu *et al.*. Multifunctional devices based on fiber Bragg grating Fabry-Perot structures[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120604
- 董新永, 孔令浚, 赵春柳等. 基于法布里-珀罗结构的光纤光栅功能型器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 120604
- 9 W. T. Lin, J. C. Chiou, Bruce C. S Chou. A photonic device compatible process in fabricating tunable Fabry-Perot filter [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**(3-6): 149~154
- 10 Zhou Tingting, Xie Hui, Sun Liping *et al.*. A MEMS-based tunable optical filter [J]. *Study On Optical Communications*, 2011, **37**(4): 23~25
- 周婷婷, 谢 卉, 孙莉萍等. 一种基于 MEMS 技术的可调谐光滤波器[J]. *光通信研究*, 2011, **37**(4): 23~25
- 11 T. Viard, C. Buisset, X. Rejeanier *et al.*. Programmable spectrometer using MOEMS devices for space applications [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 701048
- 12 Li Jufeng, Yuan Yifang, Tao Wei. Tunable Fabry-Perot filter for fiber communication system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 54~57
- 郇炬锋, 袁一方, 陶 伟等. 用于光纤通信系统的 F-P 可调谐滤波器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(2): 54~57
- 13 Yao Qijun. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.

131~138

姚启钧. 光学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 131~138

- 14 Mo Jinqiu, Liang Qinghua, Wang Guobao *et al.*. MEMS Design and Manufacture[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 108~125

莫锦秋, 梁庆华, 江国宝 等. 微机电系统设计与制造[M]. 北京:

化学工业出版社, 2004. 108~125

- 15 Wang Ming. Structure Design and Fabrication of Micro F-P Cavity Tunable Filter [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007

王 明. 微 F-P 腔可调谐滤波器的结构设计和工艺研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007

栏目编辑: 韩 峰