

基于微 F-P 腔阵列可调谐滤波器的超光谱成像技术

马 宏 陈四海 王 明 赖建军 易新建

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

(武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 基于 MOEMS (微光机电) 技术, 研究了一种微 F-P 腔阵列的可调谐滤波器。根据设计的不同, 调谐范围可在可见光、近红外、中远红外。以 8-10 μm 长波红外为例, 设计了微 F-P 腔的增反膜, 中心波长反射率达 99.2%。这种调谐滤波器, 可以精确、快速调谐波长, 体积小, 重量轻, 在超光谱成像系统中有着广泛的应用前景。

关键词 MOEMS; 微 F-P 腔; 超光谱成像

1 引言

传统的成像光谱仪基本为: 分光元件完成光谱波段分割, 不同波段分别在不同探测器上成像。传统的成像光谱仪的分光方法是利用棱镜、光栅等色散型元件, 不同的光谱成像于不同的探测器上, 这种成像光谱仪结构复杂程度较高、重量和体积也较大。随着探测器由点扫描、线阵列扫描发展到焦平面阵列, 光谱成像发展到超光谱成像, 对光谱分辨率的要求也越高, 因此分光元件必须适应其发展。针对这种要求, 有人提出了可调谐滤光片。可调谐滤光片的种类较多如声光可调谐滤光片 (AOTF)、电光可调谐滤光片、双折射滤光片、液晶可调谐滤光片 (LCTF) 等, 而目前应用在超光谱成像仪上的主要有: 声光可调谐滤光片 (AOTF) [1] 和液晶可调谐滤光片 [2]。由于 F-P 滤波器设计和制作技术的迅速发展, 人们一直在尝试将其用于红外光谱仪以及红外超光谱成像探测方面。D.Rossberg 曾在两片硅衬底上分别制作了两面镜子, 然后键合在一起, 制作了 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ 的 F-P 可调谐滤波器, 调谐范围为 $1.5-7.5 \mu\text{m}$, 分辨率为 25nm [3]。1997 年 10 月, HONEYWELL 技术中心的 Thomas Ohnstein 报道了他们利用 LIGA (Lithographie Galvanoformung und Abforming) 工艺制作的单个可调谐 F-P 滤波器, 该滤波器与他们所制作的非致冷红外焦平面耦合封装在一起构成多光谱红外成像仪, 可用于气体分析 [4]。William J.Marinelli 在 1999 年首次报道了单个 F-P 可调谐滤光片与红外探测器混合集成构成的光谱仪, F-P 滤光片采用压电驱动方式, 实现了 $7.8-13.5 \mu\text{m}$, 50nm 分辨率的长波红外调谐 [5]。Kutyrev, Alexander S. 等报道了一种 Si-Ge 材料的用于气体成分分析的基于 F-P 可调谐滤波致冷型光谱仪, F-P 滤波器的大小为 80mm , 通光口径为 20mm [6]。Srivastava, Rohit 等也采用两个镜片键合的方式制作了一种宽带 F-P 可调谐滤波器, 如图 3 所示, 调谐面积为 $2 \times 2\text{mm}^2$, 可用于红外吸收光谱仪 [7]。从以上研究情况来看, 用于传统的超光谱系统的 F-P 可调谐滤波器通常是另外附加在红外探测器上, 滤波器的尺寸与红外焦平面阵列的像元相比还是很大、滤波器的滤波面积只占整个滤波器面积的很小部分, 体积仍较大、质量仍较重, 不适应于小型化的光谱成像仪的要求。

最近几年, MOEMS 发展成为微机电系统技术中一支极具活力的新技术系统 [8-9]。我们提出利用 MOEMS 技术, 根据 F-P 腔的光学滤波原理, 研究不同腔长 F-P 腔组成的可调谐微腔分光器阵列 [10] 与红外焦平面阵列集成一体化器件的相关技术, 以构成一种集成微型超光谱成像探测仪, 将其应用于超光谱探测器仪, 具有体积小、高光通量、高灵敏和高可靠性等优点, 可满足深空探测等应用领域。

2 调谐滤波器的设计

MOEMS 可调谐超光谱成像仪中的分光器，利用 F-P 的腔长变化实现波长调谐。如图 1 所示，当入射波长 λ 与腔长 D 满足关系式 $\lambda = 2D/m$ (m 为整数)，该波长透射。所要实现的基于 MOEMS 技术的 F-P 腔可调谐光分光器的 F-P 腔是由高低折射率的介质膜交替组成的介质反射镜，通过静电或者微电磁驱动上层反射镜来实现波长选择。

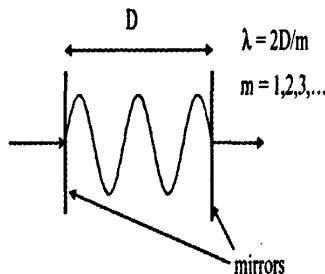


图 1 F-P 腔原理

光学谐振腔内侧镀增反膜，外侧镀增透膜。增反膜由交替的高低折射率材料组成。器件的调谐范围可用 (1) 式表示，其反射率 R 可用 (2) 式表示：

$$\Delta \lambda / \lambda \sim Np/2Na \quad (1)$$

$$\log R (OD) \sim 0.6288 Nc (Np/Na) \quad (2)$$

其中

$$Np = (nh - nl);$$

$$Na = (nh + nl) / 2;$$

nh 为高折射率材料的折射率；

nl 为低折射率材料的折射率；

Nc 为交替 Ge/ZnS 层的层数。

以调谐范围为 8-10 μm 为例，则器件中心波长为 9 μm ，器件的调谐范围为 2 μm ，大约为中心波长的 22%，这就要求光学镀膜材料有尽量大的折射率差和相对小的平均折射率， Ge 的折射率为 4.055， ZnS 的折射率为 2.22，由 (1) 式可得，器件的调谐范围可达 29%。

图 2 为所设计的工作在 8.0-10 μm 微 F-P 腔的上下镜面的增反膜设计结果。膜层由 Ge 和 ZnS 材料交替组成，共 33 层，总厚度为 10 μm 。

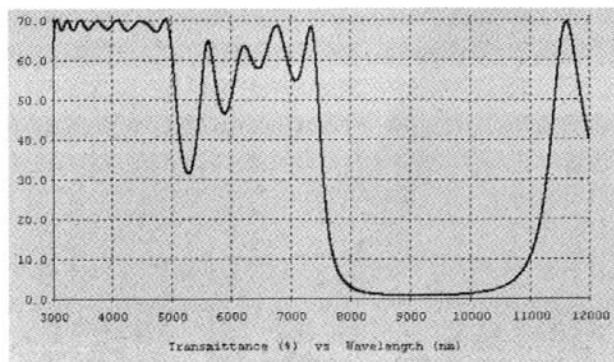


图 2 增反膜红外透射谱

F-P 腔的支撑结构如图 3 所示意。

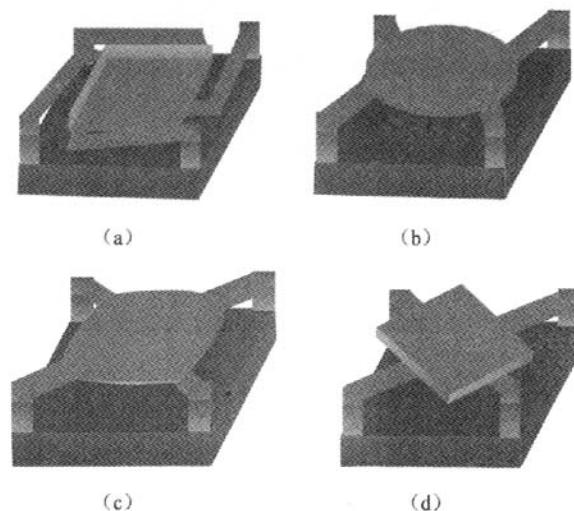


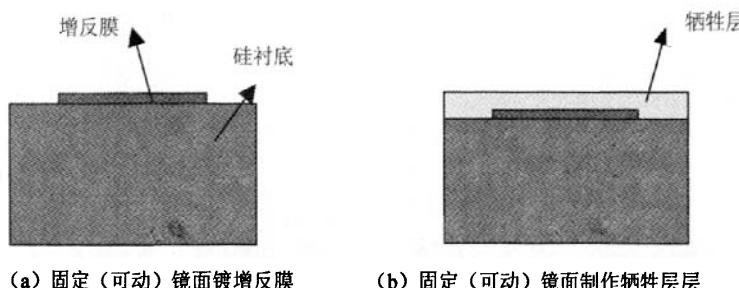
图 3 不同支撑结构设计示意图

3 工艺制作

微 F-P 腔由一个可动镜面和一个固定镜面的键合形成，图 4 为微 F-P 腔可调谐滤波器工艺流程图。固定镜面（硅衬底）与可动镜面（SOI 晶片，silicon on insulator）的前三步制作工艺相同且相互独立。以固定镜面为例，首先电子束蒸发镀增反膜，如图 4a 所示；再制作牺牲层，通过剥离工艺完成金键合极的制作，如图 4b、4c 所示；接着完成固定镜面与可动镜面的金-金对准键合，如图 4d 所示；随后背面减薄可动镜面至 20um，如图 4e 所示；然后通过干法刻蚀制作弹性桥腿结构，如图 4f 所示；接着电子束蒸发镀增透膜，如图 4g 所示；最后氧气干法刻蚀牺牲层，完成牺牲层的释放，如图 4h 所示。

4 超光谱成像系统

在超光谱成像系统中，F-P 滤波器可以与焦平面器件单片集成在一起，为了使光线平行入射到 F-P 滤波器上，在 F-P 滤波器前面混合集成微透镜阵列，微透镜与 F-P 滤波器一一对应。如图 5 (a) 所示意，传统的凝视型超光谱成像仪通过麦克尔逊干涉仪实现光谱调谐，干涉仪反射镜的运动把光谱信息变成时间干涉图，而利用这种 MOEMS 可调谐 F-P 腔分光器可以代替麦克尔逊干涉仪使得系统更为简单，结构更紧凑，容易实现小型化，如图 5 (b)。



(a) 固定（可动）镜面镀增反膜

(b) 固定（可动）镜面制作牺牲层层

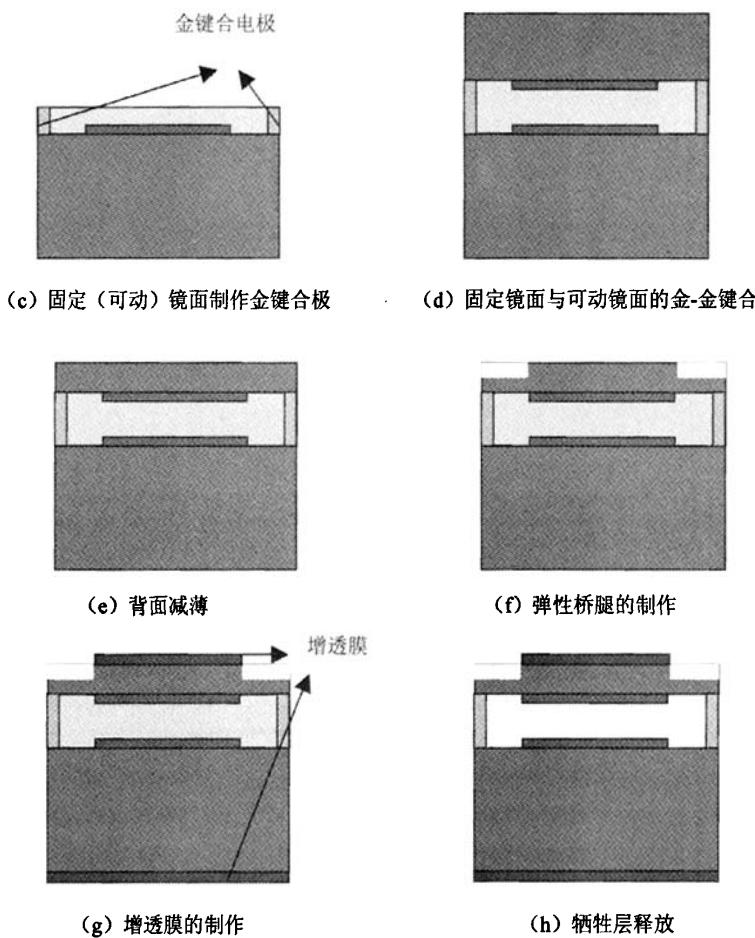


图 4 微 F-P 腔可调谐滤波器工艺流程图

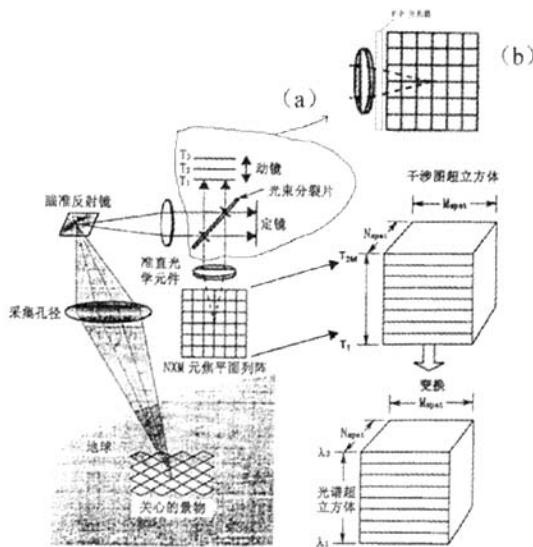


图 5 凝视型超光谱成像系统: (a) 麦克尔逊干涉方法; (b) MOEMS F-P 腔方法

5 应用前景

利用 MOEMS 技术, 实现一种 F-P (法布里-珀罗) 可调谐分光器等 MOEMS 器件, 这种器件调谐方式多样, 通过控制滤波器的驱动电压, 既可以实现不同单元的调谐 (在一帧内) 也可以实现阵列的同时调谐 (不同帧内), 具有非常灵活的滤波形式。分光器应用在超光谱成像系统中, 可以用于一些特定的环境下例如杂波区目标、高背景干扰等情况下实现高灵敏度, 高分辨率超光谱成像探测。

月球探测是中国的航天事业在卫星应用和载人航天取得历史性成就的基础上, 向深空探测领域迈出的第一步。因为月球是离我们最近的天体, 月球可以作为对地监测基地、科学的研究基地、新的军事平台以及深空探测的前哨站和转运站。科学家们正在评估月球的资源和能源的开发利用前景, 在不远的将来, 这些资源和能源将作为地球可持续发展的重要补充。人类在对月球的探测, 就需要配备超光谱成像光谱仪等多种先进科学仪器的环月卫星来获取月球表面三维影像, 分析月球表面多种有用元素的含量, 并探测月壤厚度分布和地月空间环境等。利用 MEMS 调谐技术实现的超光谱成像仪, 它的光谱覆盖在特定的范围内是连续的, 甚至每个波段的光谱位置是可以编程选择的, 由 CMOS 读出电路确定, 可根据应用需要, 获取特定光谱位置和光谱分辨率的图像数据, 因此, MEMS 超光谱技术可以真正获得完整的光谱信息, 可以应用于: 月球矿产资源探测; 月球特殊空间环境资源探测等。

参考文献

- 1 刘石神.声光可调谐滤波器及其在成像光谱仪上的应用.红外, 2004, 000 (No.7): 12-17.
- 2 Hardeberg, Jon Y., Schmitt, et al. Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter Source. Optical Engineering, 2002, Vol.41 (No.10) : 2532-2548.
- 3 D.Rossberg. Silicon micromachined infrared sensor with tunable wavelength selectivity for application in infrared spectroscopy. Sensors and Actuators A, 1995, Vol. 46-47: 413-416.
- 4 <http://www.stormingmedia.us/>
- 5 W.J. Marinelli, C.M. Gittins, A.H. Gelb, et al. "Tunable Fabry-Perot Etalon Based Long-Wavelength Infrared Imaging Spectrometer". Appl. Opt., 1999, Vol.38: 2594-2604.
- 6 Kutyrev, Alexander S., Bennett, et al. Near infrared cryogenic tunable solid Fabry-Perot spectrometer. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004 Vol.5492 (PART 2), Ground-based Instrumentation for Astronomy: 1172-1178.
- 7 Srivastava, Rohit, Shenoy, et al. Bulk micromachining of a MEMS tunable Fabry-Perot interferometer: Effect of residual silicon on device performance. Journal of Microlithography, Microfabrication and Microsystems, October, 2004, Vol.3 (No.4) : 579-588.
- 8 Datta, Madhumita, Pruessner, et al. Design of MEMS-tunable novel monolithic optical filters in InP with horizontal bragg mirrors. Solid-State Electronics, October/November 2004, SPEC. ISS, Vol.48 (No.10-11) : 1959-1963.
- 9 Dana Cristea, M.Kusko, and C.Tibeica, et al. Design and experiments for tunable optical sensor fabrication using (111)-oriented silicon micromachining. Sensors and Actuators A, 2004, Vol.113: 312-318.
- 10 ebeccaH.Trimm, EricJ.Tuck, and GeraldTuck, et.al. Dynamic MEMS-Based Photonic Bandgap Filter. IEEE SENSORS JOURNAL, 2005 VOL.5 (NO.6) : 1451-1461

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

微波滤波器设计培训专题视频课程



高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>