

激光与光电子学进展

微法布里-珀罗腔可调谐滤波器的研究进展

黄新, 蒙庆华*, 张克智, 何馥娴, 卢旭恒, 王瑞扬, 唐柳, 吴哲锋

南宁师范大学物理与电子学院, 广西 南宁 530299

摘要 红外光谱检测是一种可靠稳定的分析方法, 微机电系统(MEMS)法布里-珀罗(F-P)可调谐滤波器是红外光谱仪、手机摄像头、便携式高光谱成像仪和遥感仪等仪器的核心器件。传统红外分析系统和光谱仪的体积大、功耗高且价格昂贵, 很难应用到小型化器件中。相比传统类型的滤波器, MEMS F-P 可调谐滤波器具有尺寸小、分辨率高、易于集成和功耗低等优势。综述了近年来 MEMS F-P 可调谐滤波器在国内外的研究进展, 讨论了其波长调谐范围、光谱分辨率、孔径大小以及制造的复杂性和成本等, 并展望了 MEMS F-P 滤波器未来的发展趋势和应用前景, 为 MEMS F-P 可调谐滤波器的研究提供了参考。

关键词 光学器件; 微机电系统; 法布里-珀罗腔; 可调谐滤波器; 红外

中图分类号 TN21

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1100005

Research Progress of Micro Fabry-Perot Cavity Tunable Filter

Huang Xin, Meng Qinghua*, Zhang Kezhi, He Fuxian, Lu Xuheng, Wang Ruiyang, Tang Liu, Wu Zhefeng

School of Physics and Electronics, Nanning Normal University, Nanning 530299, Guangxi, China

Abstract Infrared spectroscopy detection provides a reliable and stable method of analysis. Micro electro mechanical system (MEMS) Fabry-Perot (F-P) tunable filters are the core components of instruments, such as infrared spectrometers, mobile phone camera modules, portable high spectral imagers, and remote sensing devices. Traditional infrared analysis systems and spectrometers are bulky, power-consuming, and expensive. Due to their large size and power consumption, they are not suitable for miniaturized devices. Compared with traditional types of filters, MEMS F-P tunable filters have the advantages of small size, high resolution, easy integration, and low power consumption. This article summarizes the progress made in the research on MEMS F-P tunable filters in China and other countries in recent years and discusses their wavelength tuning range, spectral resolution and aperture size, and the complexity and cost of manufacturing. Finally, the future development trends and application prospects of MEMS F-P filters are prospected, and these provide a reference for future research on MEMS F-P tunable filters.

Key words optical devices; micro electro mechanical system; Fabry-Perot cavity; tunable filter; infrared

1 引言

微机电系统(MEMS)法布里-珀罗可调谐滤波

器(FPTF)是许多精密器件、高光谱仪、红外(IR)干涉仪、法布里-珀罗(F-P)干涉仪等器件的核心元件。Mallinson等^[1]提出了一种用于近红外区域波分复用

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-06-30; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 广西科技计划重点研发计划(桂科 AB17292082)

通信作者: *mqhgx163.com

的微FPTF并将其用于光谱传感器中^[2],之后,美国霍尼韦尔公司、施乐公司等都申请了FPTF的相关专利。传统分光元器件如棱镜、光栅和傅里叶型干涉仪具有体积大、价格昂贵、分辨率受限、功耗高且需要精密稳定的平台等优点,难以进行集成小型化。MEMS FPTF从根本上解决了传统分光器件高成本和大尺寸等问题,可以实现一些特定环境下高灵敏度、高分辨率的光谱成像探测,且不受目标区杂波的干扰,为分光元件的设计提供了一种新思路^[3-6]。

近年来,FPTF的应用得到了快速发展,庄鹏等^[3]将F-P干涉仪用于研制探测中高层风场的瑞利-米散射多普勒激光雷达系统中;尹玺等^[4]研究了基于F-P微腔结构的光纤声传感系统;刘强等^[5]介绍了小型化光声成像技术在生物医学领域的研究进展;张祥东等^[6]利用高光谱图像开发算法进行图像处理。MEMS FPTF在高光谱成像系统、激光雷达、医学成像和食品水质安全等领域得到了广泛应用,但目前MEMS FPTF的研发还比较困难,特别是在滤波器制备方面的工艺经验较少,发展潜力大。因此,对于MEMS FPTF的研究有着迫切的需求和巨大的挑战。

本文综述了近年来MEMS FPTF在红外波段发展的研究,对国内外MEMS FPTF工艺制作、性能参数等指标的发展情况进行了综合分析并对其未来发展状况进行了展望,为MEMS FPTF的发展

提供了一定的理论基础。

2 MEMS F-P可调谐滤波器

2.1 F-P腔的工作原理

F-P腔由两块平行镜面组成,中间填充介质构成谐振腔,如图1(a)所示。其中, T 为透射率, n, n_1, n_2 为不同介质的折射率, θ 为光束相对镜面的折射角, L 为腔长, λ 为入射波长。不考虑平行镜面内反射光线在界面处的相位变化时,每个波与其前一个波的相位差^[7]可表示为

$$\phi = 4\pi nL \cos \theta / \lambda. \quad (1)$$

当 $n=1$,入射角为 0° 时,入射波长与F-P腔的腔长成正比,可通过调节腔长进行调谐。入射光在两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,F-P腔的输出光强 I 与入射光强 I_0 的比^[7]可表示为

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\phi/2)}, \quad (2)$$

式中, R 为镜面反射率。F-P腔的输出特性如图1(b)所示。可以发现:自由光谱范围(FSR)越大,表明通过FPTF信号的波长信道数越多;精细度 F 越大,表明F-P腔对不同光波的分辨率越高。根据多光束干涉原理可知,F-P滤波器的FSR^[7]为

$$X_F = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \lambda^2 / 2nL, \quad (3)$$

精细度为^[7]

$$F = \pi \sqrt{R} / (1-R). \quad (4)$$

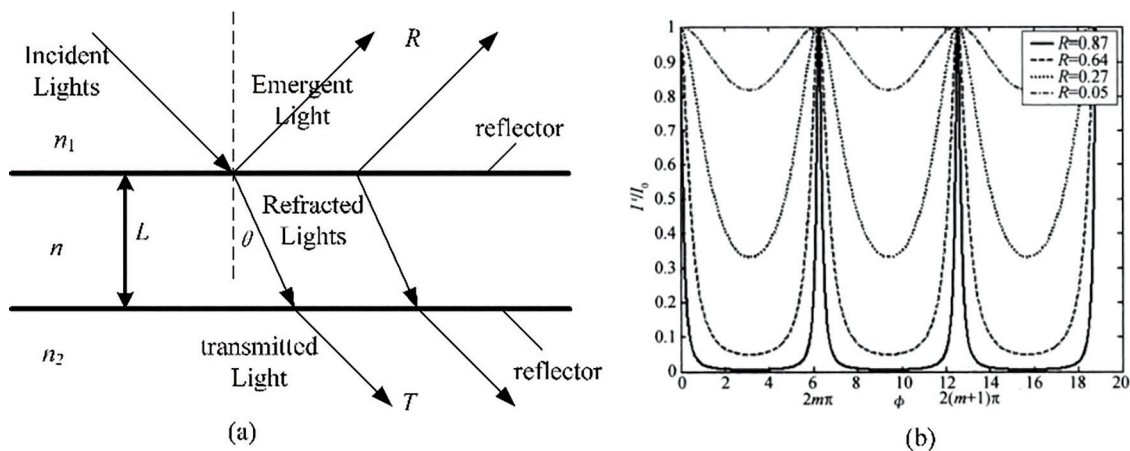


图1 F-P腔的原理和输出特性。(a) F-P腔的工作原理;(b) F-P腔的输出特性^[7]

Fig. 1 Principle and output characteristics of the F-P cavity. (a) Working principle of the F-P cavity; (b) output characteristics of the F-P cavity^[7]

2.2 MEMS F-P滤波器的设计方法

2.2.1 体微机械加工滤波器

体微机械加工滤波器通常由两个或多个晶片

构成,其结构如图2所示。其中, U 为激励电压。这些晶片通过湿法和干法蚀刻、电极和光学层的沉积构造,最后结合在一起形成F-P腔。通过间隔层或

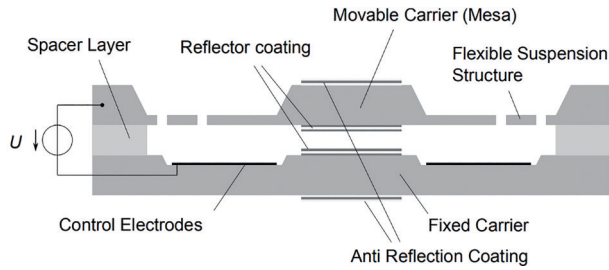


图 2 体微机械加工滤波器的原理图^[8]

Fig. 2 Schematic diagram of the bulk micro-machined filter^[8]

蚀刻实现空腔间隔,两个反射器均有较厚的机械刚性基板支撑,以避免层应力引起的翘曲,并确保驱动过程中的平整度,且基底背面必须涂有抗反射涂层(ARC)^[8]。

2.2.2 表面微机械加工滤波器

表面微机械加工滤波器通常只由一个单片的晶片制造,电极、间隔层和反射器叠层沉积在一侧,如图 3 所示。其中,间隔层充当牺牲层,将蚀刻部分牺牲层后形成的反射器作为独立式薄膜。在另一个固定的反射器中衬底可被移除,否则,基底的背面必须涂上 ARC。表面微机械加工滤波器很难创建完美匹配且高反射率的反射镜,从而降低了光学效率。由于静电调谐中的拉入现象限制了调

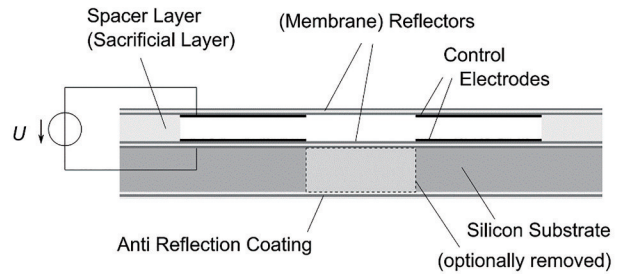


图 3 表面微机械加工滤波器的原理图^[8]

Fig. 3 Schematic diagram of surface micro-machined filter^[8]

谐范围,独立式薄膜反射器必须适当张紧并呈对称分层,以避免发生翘曲,这对材料的选择和光学结构的设计更加严格。薄膜反射器在驱动力作用下会发生弯曲,在调谐过程中精细度会降低、孔径受到限制,但薄膜的质量可以忽略不计,因此不会产生加速效应,这为具有更小电极和更低激励电压的设计提供了空间。表面微机械加工滤波器的结构和制造工艺更简单,成本更低,最适合大规模生产^[8]。

体微机械加工和表面微机械加工滤波器各有优势,两种结构的特征和设计如表 1 所示。根据不同的场景、性能指标和市场需求可以使用不同结构的滤波器,从而节省成本、提高研发效率。

表 1 体微机械加工和表面微机械加工滤波器的特征和设计^[8]

Table 1 Characteristics and design of bulk micro-machined and surface micro-machined filters^[8]

Filter	Bulk micromachined filter	Surface micromachined filter
Basic technology	two or more wafers, wafer bonding with spacer layer	one wafer, sacrificial layer etching
Design flexibility for the reflectors	high	low
Identical (matched) reflectors	yes	no
Anti-reflection coating (ARC) required	yes, both sides	on lower substrate
Stiffness /flatness of the reflectors	high, no static and dynamic deformations	low, static and dynamic deformations
Moving mass, acceleration sensitivity	higher, not neglectable	very low, neglectable
Design flexibility for electrostatic actuation and tuning range	higher	lower
Chip size, aperture size	larger	smaller
Complexity and costs of fabrication	higher	lower

3 国内外研究进展

3.1 国外研究进展

国外研究 MEMS FPTF 的机构主要包括西澳大利亚大学、德国 InfraTec GmbH 公司和 Fraunhofer ENAS 研究所、德国 Robert Bosch GmbH 公司和芬兰 VTT 技术研究中心等。

3.1.1 西澳大利亚大学

西澳大利亚大学研究的第一批法布里-珀罗滤波器(FPF)设备是为近中波红外(MWIR)范围开发的^[9-12],近几年成功研发了在长波红外(LWIR)热成像的 MEMS FPTF。

Tripathi 等^[12]介绍了基于 Si-Air-Si 分布式布拉格反射器(DBR)的 FPTF, DBR 的结构如图 4 所示。

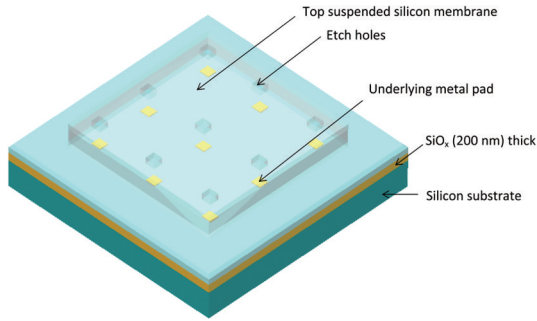


图 4 DBR 的结构^[12]

Fig. 4 Structure of the DBR^[12]

该 FPF 的上下反射镜均由 Si-Air-Si DBR 构成, 硅基氧化物 (SiO_2) 层的厚度均为 $\lambda/4$ (λ 为光的波长)。基于 Si-Air-Si 的 DBR 在 MWIR 波长范围内的滤波器峰值透射率大于 80%, 最小半峰全宽 (FWHM) 为 30 nm, 最大 FSR 为 1850 nm, 精细度为 61.7。短波红外 (SWIR) 滤波器的峰值透射率为 60%, 最小 FWHM 为 15 nm, 最大 FSR 为 850 nm, 精度为 70。仿真结果表明, 基于 Si-Air-Si 的 DBR 可以实现高精度和宽 FSR 的滤波器。

Mao 等^[13] 提出了一种用于自适应多光谱热成像的 MEMS FPTF, 如图 5 所示。该滤波器由悬挂顶镜 $1/4$ 波长的 Ge 层和在硅衬底上固定 $1/4$ 波长的 Ge/ZnS/Ge/ZnS 底反射镜组成。尺寸为 $200 \mu\text{m}$ 的滤波器在 160 V 最大电压驱动下显示出 $8.5 \sim 11.46 \mu\text{m}$ 的连续波长调谐范围, 整个调谐范围内的镜面弯曲小于 100 nm, 峰值透射率大于 80%, 光谱带宽约为 500 nm, 带外抑制大于 40:1。在整个驱动过程中, 尺寸为 200 nm 的滤光片实现了像素级传输峰值的波长均匀性, 在 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 光学区域内的峰值波长变化量小于 1.2%。LWIR 滤波器设计

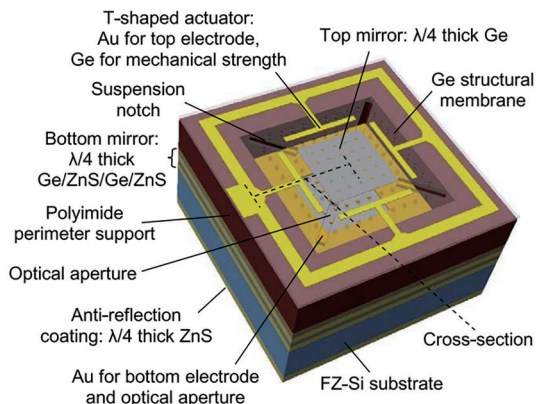


图 5 用于自适应多光谱热成像的 MEMS FPF 示意图^[13]
Fig. 5 Schematic diagram of MEMS FPF for adaptive multispectral thermal imaging^[13]

在液氮温度下运行, 符合二维 LWIR 成像焦平面阵列的要求。

Mao 等^[14] 提出了适用于多光谱和高光谱成像的大面积 MEMS FPTF 技术。用于多光谱成像的 SWIR 和 MWIR 滤波器由单层 Si 顶镜和双层 Si/SiO₂ 底镜组成, LWIR 滤波器由单层 Ge 顶镜和四层 Ge/ZnS/Ge/ZnS 底镜组成, SWIR 和 MWIR 滤波器的调谐范围分别为 $1.77 \sim 2.42 \mu\text{m}$ 和 $4.1 \sim 4.9 \mu\text{m}$, LWIR 滤波器的调谐范围为 $8.5 \sim 11.46 \mu\text{m}$ 。此外, 还提出了大尺寸 (1 cm) 基于大面积单晶硅膜的 SWIR FPTF。保持上反射镜的平整度及其与下反射镜的平行度是制作大尺寸 FPTF 的关键, 实验结果表明, 整个 1 cm 光学成像区域像素上的透射峰波长变化量最大为 55 nm, 对应像素的峰值波长变化量为 2.6%。基于图 5 中的 MEMS 与空气间隔反射镜实现了高光谱成像的大尺寸 MEMS FPTF, 其结构如图 6 所示。该滤波器包括悬挂的顶部 DBR 空气间隔和固定在硅基板上的底部 DBR 空气间隔。基于空气间隔 DBR 的 SWIR、MWIR 和 LWIR 滤波器的峰值透射率约为 90%, 光谱分辨率分别为 10 nm、25 nm 和 50 nm, 可以满足高光谱成像应用的光学要求。

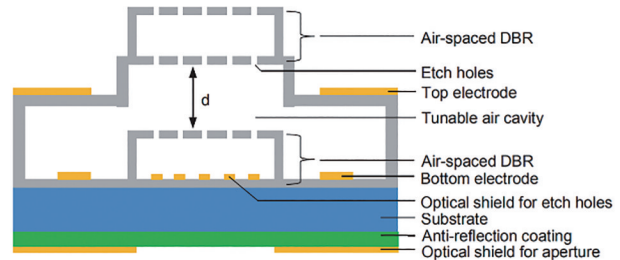


图 6 用于高光谱成像空气间隔镜的 MEMS FPTF 横截面^[14]

Fig. 6 Cross-sectional of MEMS FPTF used for hyperspectral imaging air spacer^[14]

3.1.2 德国 Robert Bosch GmbH 公司

Huber 等^[15] 介绍了一种单膜和双膜表面微加工法布里-珀罗干涉仪 (FPI), 其结构如图 7 所示。该 FPI 的反射镜是基于 Si 和 SiCN 的 DBR 反射镜, 单膜 FPI 在衬底 DBR 中增加由等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 的非晶碳氮化硅 (a-SiCN) 层, 以减少透射损失, 在 DBR 中心波长处的峰值反射率为 97.6%, 透射峰的理想 FWHM 为 8.1 nm, 双膜 FPI 的 F-P 腔体上下反射镜均为由薄膜 DBR、 $2.5 \mu\text{m}$ 气隙和硅片组成的薄膜堆栈。相比单膜 FPI, 双膜 FPI 一阶透射峰在 5.1 nm 处的理想 FWHM 更小。单层薄膜中的拉伸应力会引起基片的弯曲, 导致

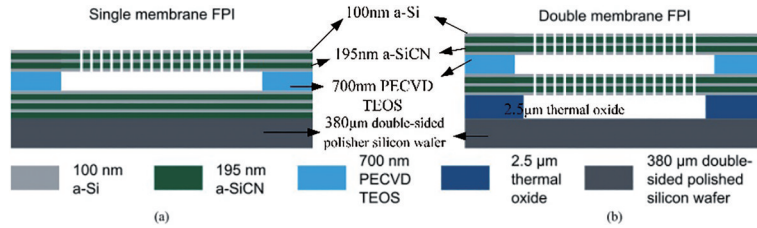


图 7 单膜和双膜 FPI 的横截面图。(a)单膜 FPI 的横截面图;(b)双膜 FPI 的横截面图^[15]

Fig. 7 Cross-sectional views of single- and double-membrane FPIs. (a) Cross-sectional view of single-membrane FPI; (b) cross-sectional view of double-membrane FPI^[15]

FPI 间隙发生变化。双膜 FPI 由于两个反射镜在光学孔径内与衬底解耦,反射镜的平行度不受衬底晶圆内弯曲的影响,且双膜反射镜的设计更方便,同时结合了高分辨率和高光吞吐量的优势。

Krämmer 等^[16]提出了在 900~1650 nm 光谱范围内的宽带表面微机械加工 MEMS FPTF,其结构如图 8 所示。该滤波器由两个对称的硅/空气 DBR 和远距离静电驱动。双膜设计可以将光学间隙和制动间隙分开,从而独立调节初始透射波长和最大反射镜行程范围。此外,该结构还能改善镜片的平行度,制作的器件显示出了极好的镜面平行度和较大的一阶 FSR 调谐范围。

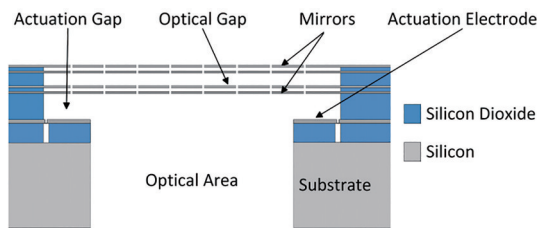


图 8 900~1650 nm 宽带 MEMS FPTF 横截面^[16]

Fig. 8 Cross-sectional of 900~1650 nm broadband MEMS FPTF^[16]

3.1.3 德国 InfraTec GmbH 公司和 Fraunhofer ENAS 研究所

InfraTec GmbH 公司和 Fraunhofer ENAS 研究所共同合作了多种用于气体、液体、固体检测的商用滤波器^[17-19]。

Fraunhofer ENAS 研究所在反射镜上进行了深入研究,用亚波长结构的反射镜替代 DBR^[20-22],具有亚波长结构的反射镜如图 9 所示。研究表明,亚波长尺寸的金属环形谐振器阵列在较宽的波长范围内具有较高的反射率,且采用亚波长结构反射器的 FPI 标准具透过率特性的偏振依赖性很小。该研究所将亚波长结构反射器和亚波长光栅反射器用于 MEMS F-P 红外过滤器上,通过静电力改变两个反

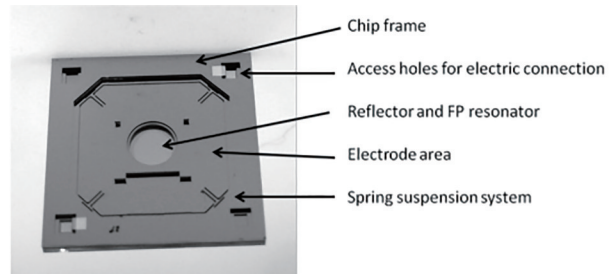


图 9 具有亚波长结构反射镜的 F-P 滤光片^[22]

Fig. 9 F-P filter with sub-wavelength structure mirror^[22]

射器之间的距离。测量结果表明,在 2.5~6.5 μm 波长范围内,其峰值透过率超过 50%,相比 DBR,该结构的制造更简单且具有更好的平面性和粗糙度。但金属损耗导致反射器的吸光度受限,因此,必须选择亚波长结构尺寸。

Ebermann 等^[17]给出了 8~11 μm 光谱范围内 MEMS FPTF 的初步仿真结果,滤波器的横截面如图 10 所示。其中, V_c 为激励电压, d 为腔长, n 为介质折射率。固定的反射器在底部晶圆,可移动的反射器在上层晶圆,两晶圆中间由 SU8 层粘合。通过使用具有增强折射率对比的新型介电材料和具有较少层数的反射器设计,实现了宽带宽和低相位色散。此外,研制了不同 DBR 和完整的全透射器件,制作样品并进行测试。结果表明, FPTF 的带宽为 170~250 nm,峰值透过率高达 60%。

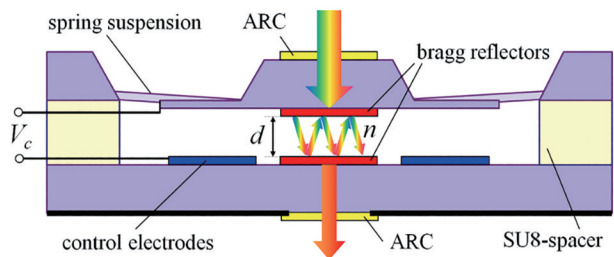


图 10 MEMS FPTF 的横截面示意图^[17]

Fig. 10 Cross-sectional schematic diagram of MEMS FPTF^[17]

Meinig 等^[23]研发了一种可同时使用 8~10.5 μm 和 4~5 μm 光谱范围的可调谐双频 MEMS FPTF, 其结构如图 11 所示。该结构由两个单晶硅基板组成, 通过硅熔合键合组装, 反射器和 ARC 沉积在可移动结构上。该滤波器的峰值透射率大于 75%, FWHM 小于 200 nm, 最大控制电压为 41 V, 可集成在微型光谱仪模块中。

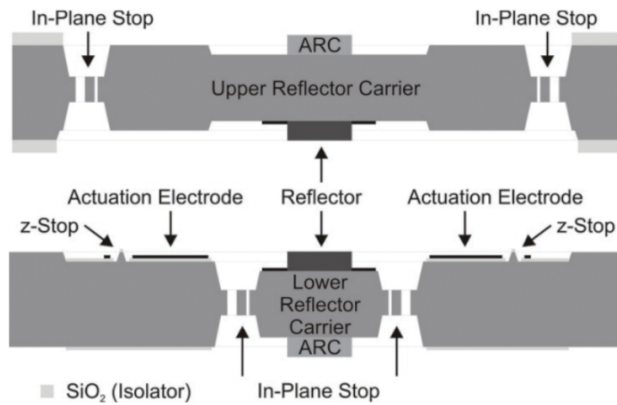


图 11 可调谐双频 MEMS F-P 滤波器剖面图^[23]

Fig. 11 Sectional view of tunable dual-frequency MEMS F-P filter^[23]

Ebermann 等^[24]基于已有的 MWIR 体微机械加工 FPTF, 开发了 LWIR 范围内的微 FPTF。由于长波红外中, 二氧化硅或氮化硅具有高本征吸收, 不能作为光学材料, 因此, 用新型材料降低反射层叠加中的内应力。LWIR FPTF 的带宽约为中心波长的 1.5%~2.5%, 直径为 1.9 mm 的孔径可提供较高的光通量, 两个可移动反射镜架的设计大大降低了系统对加速力的敏感度。若与室温操作的热释电探测器配合使用, 可为红外吸收光谱学领域的许多应用提供足够大的信噪比。

Ebermann 等^[25]开发了一种基于 MEMS FPTF 的新型快速红外光谱仪, 其结构如图 12 所示。其中, μFPP 为微法布里-珀罗滤波器。MEMS FPTF 直接

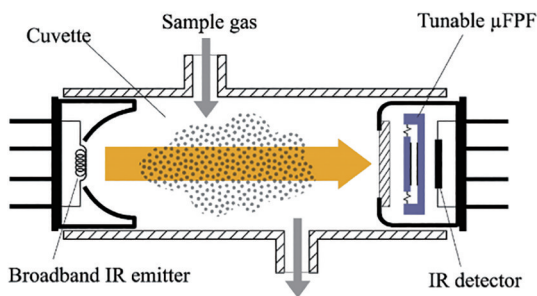


图 12 具有 μFPP 的 IR 气体分析仪设备^[25]

Fig. 12 Equipment of an IR gas analyzer with μFPP^[25]

放置在红外探测器前, 可具有三级或四级结构, 能提高约 20~30 nm 的光谱分辨率, 调谐范围为 3.1~3.8 μm, 与传统的步进扫描方式相比, 该结构采集完整光谱的速度提升了 50 倍, 光谱分辨率提高了 3 倍。

Ebermann 等^[26]提出了一种高度微型化的 MEMS FPTF。该滤波器由一个可移动反射器和一个固定的反射器或两个可移动的反射器构成, 如图 13 所示。其中, d_R 为谐振器长度, d_{mm} 为内部两个可移动部分的距离, d_{mf} 为可移动上载体与下芯片框架的固定部分距离。新型微法布里-珀罗 (μFP) 腔充分利用了已优化的 1M (有一个可移动反射器和一个固定的反射器) 设计和更坚固的 2M (有两个可移动反射器) 结构。对该滤波器的芯片布局进行优化后, 可消除浪费区域并最大程度地减少触点、弹簧、键合框架等占用的空间, 将滤波器的芯片尺寸缩小到 5 mm×5 mm, 使其产量增加了 1 倍。

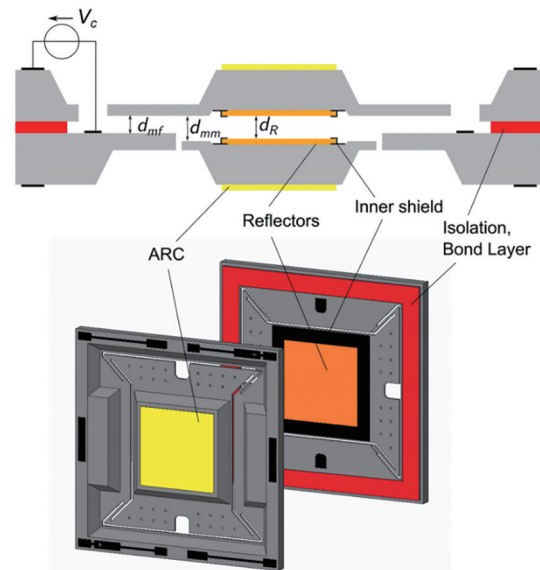


图 13 新型 μFP 滤波器芯片设计示意图^[26]

Fig. 13 Schematic diagram of the new μFP filter chip design^[26]

3.1.4 芬兰 VTT 技术研究中心

芬兰 VTT 技术研究中心在 1997 年推出了一种小型近红外光谱仪的封装设计, 该近红外光谱仪的核心是一个电可调的硅表面微机械 FPI^[27]。

2010 年, VTT 机构^[28]研发了用于可见光波长范围的 FPI, 其结构如图 14 所示。基于原子层沉积 (ALD) Al₂O₃ 和 TiO₂ 薄膜制成五层介质反射镜。测量得到五阶透射率的 FWHM 为 5.4 nm, 在 λ=510 nm 时的最大透射率约为 67%, 且该 FPP 适用于可见光和紫外波长范围。

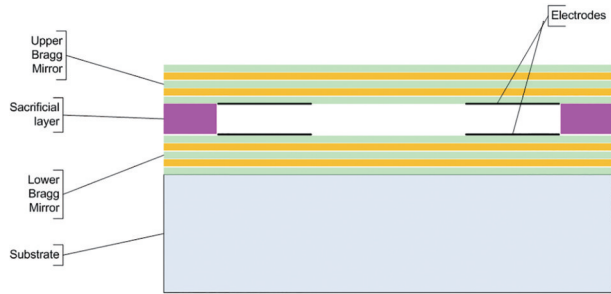


图 14 MEMS FPI 器件的总体结构^[29]

Fig. 14 Overall structure of the MEMS FPI device^[29]

Tuohiniemi 等^[30]提出了一种基于 MEMS 的分布式布拉格反射器,可用于热红外范围,可调谐 FPI 的工作波长范围为 7~12 μm ,其结构如图 15 所示,包括释放蚀刻后的层间距离和凸起。该结构由厚度为 $\lambda/4$ 多晶硅层(高折射率材料)和厚度为 $\lambda/4$ 空气间隙(低折射率层)组成。空气间隙通过蚀刻牺牲二氧化硅层产生,多晶硅层之间的锚定提供了稳定的机械结构,并在释放步骤后保持了气隙的高度。由于硅和空气的高折射率,该反射器表现出宽阻带特性,仅用三层就可以达到约 96% 的反射率。

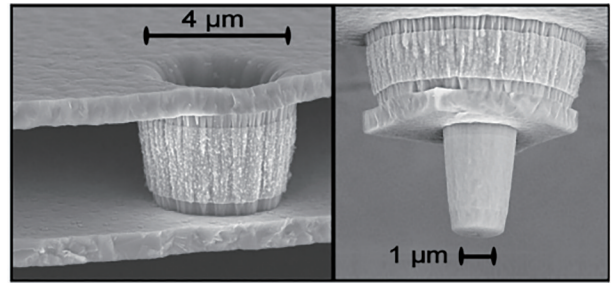


图 15 反射器的微观结构图^[30]

Fig. 15 Microstructure diagram of the reflector^[30]

此外,反射器在长波红外范围内具有低损耗。

Rissanen 等^[31]提出了将可调谐 MEMS FPI 集成在 PIN 光电二极管上的显微光谱仪。该 FPI 由静电驱动两个平行 ALD 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 布拉格反射镜堆叠组成,顶部和底部嵌入圆形铝电极,电容调谐波长范围为 420~550 nm,如图 16 所示。Antila 等^[32]介绍了一种利用 MEMS 可调谐 FPI 滤波器在 430~580 nm 可见光范围内工作的掌上光谱成像仪,该仪器是一种凝视型的高光谱成像仪,无需移动目标或相机即可测量数据立方体。

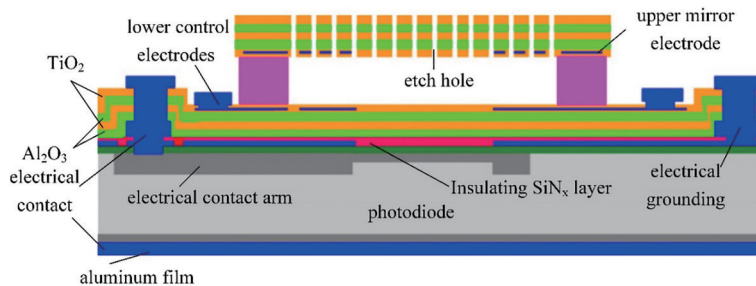


图 16 光电二极管上的单片集成 FPI^[31]

Fig. 16 Monolithically integrated FPI on photodiode^[31]

Rissanen 等^[33]介绍了利用低应力多晶硅和富硅氮化硅 $\lambda/4$ 薄膜堆叠制造的大孔径低压化学气相沉积(LPCVD)DBR,其结构如图 17 所示。该反射器可用作 MEMS FPI 设备中的上镜,通过氟化氢蒸汽对 SiO_2 进行蚀刻,成功释放出直径为 5~10 mm 的高纵横比(1:10000)镜膜,波长在 600~1000 nm 之间释放。相比基于 ALD 的 Al_2O_3 和 TiO_2 反射器,LPCVD DBR 薄膜叠层的膜产率更高,可适用于可调谐 MEMS FPI 中的大光学孔径反射镜。

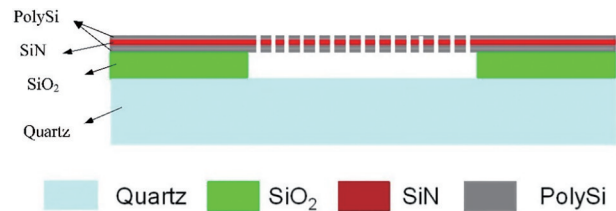


图 17 多晶硅-氮化硅释放布拉格反射镜的结构^[33]

Fig. 17 Structure of the polysilicon-silicon nitride release Bragg reflector^[33]

VTT 技术研究中心 2013 年研发了用于检测气体的手持式设备^[34],其波长调谐范围为 2.8~3.5 μm ,光谱分辨率为 50~60 nm,结构如图 18 所示。其中,A 为接触垫,B 为制动电极,C 为上活动镜,D 为下固定镜,E 为光圈。两个高度反射表面由可调谐的空

气间隙分开,间隙通过静电力移动上镜进行调整,不需要实际移动部件。此外,VTT 还为卫星开发了微型光谱成像仪^[35],该光谱成像仪基于可调谐 FPI,FPI 由两个高反射的表面组成,由一个可调谐的气隙隔开。光谱分辨率在 FWHM 处为 8~15 nm,工作

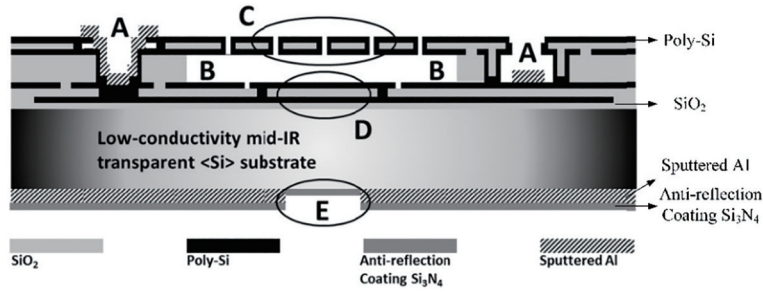


图 18 MEMS法布里-珀罗干涉仪的结构^[35]

Fig. 18 Structure of the MEMS Fabry-Perot interferometer^[35]

波长范围为 500~900 nm。

VTT 技术研究中心 2014 年开发了波长范围为 7.5~9.5 μm 的 MEMS FPI^[36], 其结构如图 19 所示。其中, A 为接触垫, B 为上活动镜, C 为下固定镜, D 为制动电极, E 为光圈, V 为电压源。该 FPI 由两个 MEMS 工艺制造的 DBR 组成, 下反射镜是固定的, 上反射镜受到力的作用而移动。采用 0~30 V 的压电控制, 透射峰的 FWHM 为 150 nm, 通过施加 0~30 V 的控制电压, 能使传输峰值在 7.5~9.5 μm 内变化。此外, 还基于可见光和近红外技术提出了两种不同的可调谐滤波器方案, 用于中红外气体测量^[37]。其中一个方案只有一个传输峰值顺序, 称为小间隙 FPI, 另一个方案存在多个传输峰值顺序, 称为大间隙 PFI。小间隙 FPI 模块已成功应用于红外气体分析系统中, 大间隙 FPI 则需要更多实验进行验证。VTT 技术研究中心 2015 年基于 MEMS FPI 开发了一种微型光学传感器, 可检测手机中的气体^[38]。该 FPI 包括可调谐气隙分隔的两个高反射表面结构, 可集成到手机屏蔽罩中, 通过调整波长范围和定制 MEMS FPI 结构能选择性地检测多种气体。

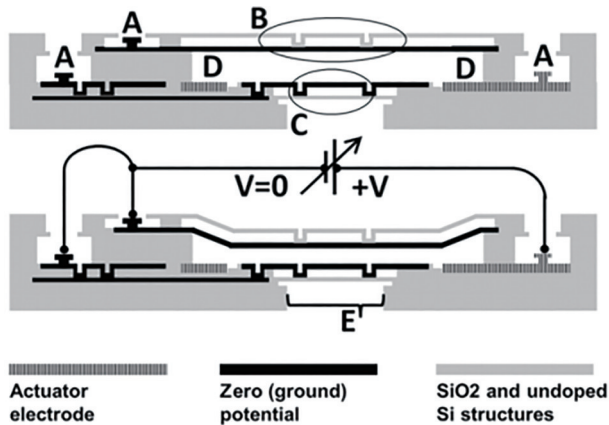


图 19 MEMS FPI 反射镜和执行器电极的结构^[36]

Fig. 19 Structure of MEMS FPI mirror and actuator electrodes^[36]

3.1.5 其他

Edwards 等^[8]评估了由 Rivas 等^[39]提出的一种在焦平面阵列上每个像素进行单片集成的新型 MEMS FPTF 的性能, 其结构如图 20 所示。光腔的上反射镜完全由下反射镜上方 200 nm 处的四个 $10 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 聚酰亚胺腿形状结构支撑。FPTF 被设计在 400~750 nm 可见光谱范围内调谐, 物理尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 具有约 16 nm 的光谱选择性。调节方法为焦耳加热和微分膨胀, 可垂直调节腔体上镜的距离。反射镜的分离距离范围为 200~375 nm, 即预期光谱的一半波长, 以消除第一阶干扰以外的所有干扰。该滤波器可设计一种新的紧凑型光谱仪, 且具有更少的活动部件。多次测量滤波器样本后发现, 第一批 F-P 装置未达到预期的功能, 器件的透射曲线没有任何 FPTF 效果或明显的透射峰。因此, 用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线元素分析和光学透射率测量, 记录了未蚀刻晶圆初始状态的参考测量值。虽然用多种方法进行了 6 次蚀刻改进, 但还是出现了蚀刻、释放镜面结构失败和无法按正常设计运行的情况, 原因包括: 1) 晶片表面可能存在污染; 2) 蚀刻机的影响或硅牺牲层的非晶硅膜内

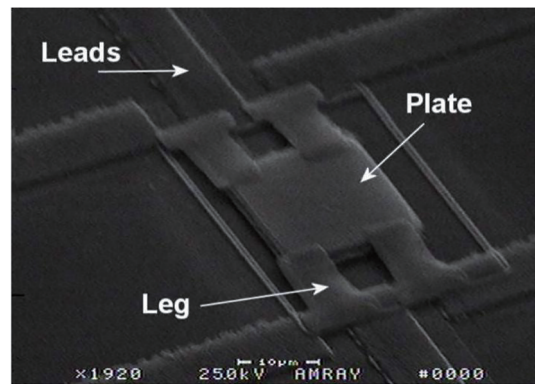


图 20 基于 F-P 器件的电子显微照片^[8]

Fig. 20 Electron micrographs of F-P based devices^[8]

部氧化;3)CCD的高噪声和光学系统透射率的局限性。该FPTF是一种在可见光到红外光谱范围通用且可实施的设计方案,因此,还需进一步开发此设备。

Kim等^[40]设计并制作了一种基于MEMS可调谐FPI滤波器,该滤波器具有宽带红外探测器阵列,在长波红外区域中的工作波长范围为8~11 μm ,其结构如图21所示。用具有Ge和ZnS的DBR实现覆盖目标光谱的反射镜,其中一个反射镜由四个X

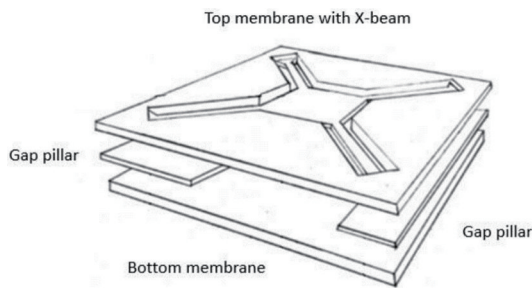


图 21 简化的 MEMS 的可调谐 F-P 干涉仪滤波器结构示意图^[40]

Fig. 21 Schematic diagram of simplified MEMS tunable F-P interferometer filter structure^[40]

形的弹簧制成,利用静电引力调节两个膜之间的间隙距离调节通过滤波器的波长。制造的滤波器具有30%的透射率峰值和2 μm 的FWHM,均低于预期性能(100%的峰值和0.15 μm 的FWHM),原因是Si膜的反射和吸收引起的损耗以及通带展宽至DBR板引起的破坏。

Levin等^[41-42]报道了一种在可见光和近红外光学范围内工作的晶圆级封装、真空密封、集成且与手机兼容的可调微机械加工FPTF,其结构如图22所示。其中, V_0 、 $V_{1&2}$ 、 $V_{3&4}$ 为驱动电极,TGVs为钨玻璃通孔,Pads为接触垫。该滤波器结合静电驱动与常闭结构实现,而不是闭合光学腔,且能增强光学间隙的可调性。为了测量设计和操作参数,建立了该装置对应的光电模型,通过数学方法求解耦合结构、挤压膜、静电和电路域的方程组。制造了具有1.85 mm光学孔径和由单晶Si组成的坚固弹性悬架器件,并在实验中证明了滤波器的可调谐性在100~500 nm之间。垂直集成设计使完全组装的设备厚度只有1 mm,其紧凑的尺寸、可制造性和在ms量级的短响应时间,使该可调滤波器可以直接集成到手机摄像头模块、便携式高光谱成像仪和遥感仪器中。

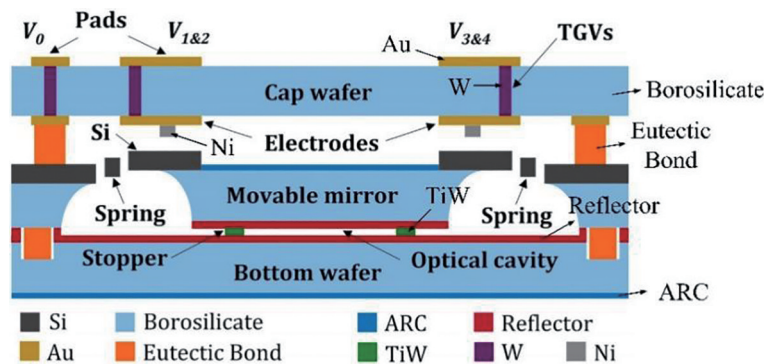


图 22 P MEMS F-P 滤波器示意图^[41]

Fig. 22 Schematic diagram of MEMS F-P filter^[41]

3.2 国内的研究进展

李元元等^[43-44]进行了微FPTF的设计与制作,X-arm、+circular-arm和L-arm型结构如图23所示。采用静电驱动方式调节,上反射镜可调,在上、下电极上施加电压后,静电力的作用会牵引上反射镜上(下)运动,从而实现波长或频率的调谐。该滤波器在中波红外3~5 μm 的光谱范围内调谐,峰值透射率均大于80%,FWHM约为110 nm,满足实际需求。利用有限元分析软件模拟了FPTF结构在施加不同驱动电压时的电学和力学特性,并确立了L-arm类型的悬臂梁结构。仿真结果表明,调谐过

程中L-arm结构的驱动电压为1.95 V,最大的倾斜角为0.002°,器件结构平整度和稳定性较好,在达到位移0.5 μm 时L-arm结构施加电压仅为1.90 V,远小于X-arm(7.81 V)和+circular-arm(8.97 V)结构的驱动电压。

任浩杰等^[45]提出了一款低电压驱动的MEMS FPTF,该滤波器可在3~5 μm 的光谱范围内调谐,具有良好的滤波效果,可以满足低电压驱动和宽调谐范围的要求。在静电力的牵引下,上部反射镜会随着桥面而上下运动,改变滤波器的腔长,进而实现滤波器的调频功能。利用COMOSL多物理场有

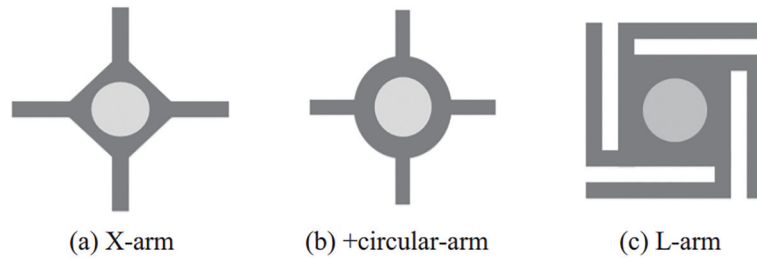


图 23 微桥结构图。(a) X-arm 结构; (b) +circular-arm 结构; (c) L-arm 结构^[44]

Fig. 23 Microbridge structure diagram. (a) X-arm structure; (b) +circular-arm structure; (c) L-arm structure^[44]

限元软件,对无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种新型折叠梁形桥面结构 FPTF 进行了电压-位移、应力和镜面平整度仿真,以优选最佳的桥面结构,四种桥面的结构形状设计如图 24 所示。在相同驱动

电压下,菱形孔桥面的位移最大,同时,桥面达到相同位移时,菱形孔桥面所需的驱动电压最小,且菱形孔桥面的应力和平整度也能满足滤波器的设计要求。

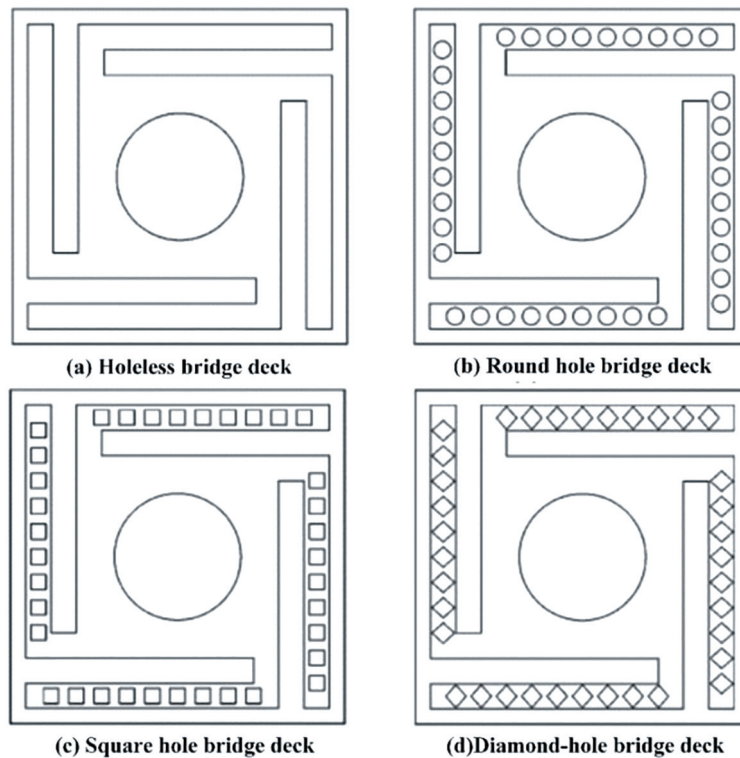


图 24 四种桥面的结构。(a)无孔桥面;(b)圆孔桥面;(c)方形孔桥面;(d)菱形孔桥面^[45]

Fig. 24 Structural of four bridge decks. (a) Holeless bridge deck; (b) round hole bridge deck; (c) square hole bridge deck; (d) diamond-hole bridge deck^[45]

4 结 论

综上所述, MEMS F-P 可调谐滤波器具有调谐范围广、可从可见光到近红外、中红外和远红外波段范围内进行滤波器的设计与制造、分辨率高、尺寸小易集成、峰值透射率高等优点。国外对 MEMS F-P 可调谐滤波器的研究较早,已经达到商用水平,且可以直接集成到手机摄像头模块、便携式高光谱成像仪和遥感器中,国内相关机构也设计并制造了

多种滤波器。MEMS F-P 可调谐滤波器的制造工艺主要是表面和体微机械加工的方式,表面微机械加工技术相对简单,成本更低,适合大规模生产,而体微机械加工技术要复杂得多,成本较高,但同时可以获得光学性能、孔径更大以及设计更灵活的结构。MEMS F-P 可调谐滤波器对反射镜的透射率和反射率有较高的要求,可以通过不同的材料组合来形成 DBR 或通过不同的技术形成反射镜来调整滤波器的调谐范围和提高滤波器的分辨率,但如何

简化制造工艺、降低制造难度和成本依然是一个难题。

随着互联网科技的发展,微型滤波器在产品应用中将越来越重要,市场应用范围广潜力巨大。MEMS F-P可调谐滤波器还需改进的方面:1)缩小滤波器的尺寸,提高其集成度,降低批量生产成本;2)滤波器的应用潜力还需进一步挖掘,提高其在医疗成像、卫星遥感、环境监控等方面的应用;3)滤波器的结构还需进一步改进,以减小体微机械加工和表面微机械加工技术的缺点。尽管现今面临着许多技术工艺上的难题,相信随着技术的发展, MEMS F-P可调谐滤波器在集成、微型化、高性能等方面的发展将取得巨大的成功。

参 考 文 献

- [1] Mallinson S R, Jerman J H. Miniature micromachined Fabry-Perot interferometers in silicon[J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(20): 1041-1043.
- [2] Rossberg D. Silicon micromachined infrared sensor with tunable wavelength selectivity for application in infrared spectroscopy[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 47(1/2/3): 413-416.
- [3] 庄鹏, 沈法华, 王邦新, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利-米散射测风激光雷达研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1210001.
Zhuang P, Shen F H, Wang B X, et al. Rayleigh-Mie wind lidar based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1210001.
- [4] 尹玺, 万生鹏, 熊新中, 等. 基于法布里-珀罗微腔结构的光纤声传感系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0312003.
Yin X, Wan S P, Xiong X Z, et al. Study of an optical fiber acoustic sensing system based on F-P microcavity structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0312003.
- [5] 刘强, 金天, 陈倩, 等. 小型化光声成像技术在生物医学领域的研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207019.
Liu Q, Jin T, Chen Q, et al. Research progress of miniaturized photoacoustic imaging technology in biomedical field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207019.
- [6] 张祥东, 王腾军, 朱劭俊, 等. 基于扩张卷积注意力神经网络的高光谱图像分类[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0310001.
Zhang X D, Wang T J, Zhu S J, et al. Hyperspectral image classification based on dilated convolutional attention neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0310001.
- [7] 陈海燕. 激光原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
Chen H Y. *Laser principle and technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [8] Edwards D L. Evaluation of pixel-scale tunable Fabry-Perot filters for optical imaging[EB/OL]. (2019-08-02)[2021-04-05]. <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=11310&context=theses>.
- [9] Antoszewski J, Dell J M, Shivakumar T, et al. Towards MEMS-based infrared tunable microspectrometers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4935: 148-155.
- [10] Dell J M, Keating A J, Milne J, et al. Microelectromechanical systems-based microspectrometers covering wavelengths from 1500 nm to 5000 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6765: 67650L.
- [11] Milne J S, Dell J M, Keating A J, et al. Widely tunable MEMS-based Fabry-Perot filter[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(4): 905-913.
- [12] Tripathi D K, Mao H F, Silva K K M B D, et al. Large-area MEMS-based distributed Bragg reflectors for short-wave and mid-wave infrared hyperspectral imaging applications[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(6): 2136-2144.
- [13] Mao H F, Silva K K M B D, Martyniuk M, et al. MEMS-based tunable Fabry-Perot filters for adaptive multispectral thermal imaging[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, 25(1): 227-235.
- [14] Mao H F, Tripathi D K, Ren Y L, et al. Large-area MEMS tunable Fabry-Perot filters for multi/hyperspectral infrared imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 45-52.
- [15] Huber C, Liu P F, Krämmer C, et al. MEMS Fabry-Pérot interferometers with double membrane mirrors for improved mirror parallelism[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27(5): 836-843.
- [16] Krämmer C, Rödel R, Huber C, et al. Tunable broadband mems Fabry-Pérot near infrared filter based on double-membrane silicon/air mirrors[C]// 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS

- XXXIII), June 23-27, 2019, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 1522-1525.
- [17] Ebermann M, Neumann N, Hiller K, et al. Recent advances in expanding the spectral range of MEMS Fabry-Perot filters[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7594: 75940V.
- [18] Schröter J R, Lehmann S, Ebermann M, et al. Wavelength stabilization of electrostatically actuated micromechanical infrared Fabry-Pérot filters[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8868: 88680J.
- [19] Ebermann M, Neumann N, Hiller K, et al. Resolution and speed improvements of mid-infrared Fabry-Perot microspectrometers for the analysis of hydrocarbon gases[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8977: 89770T.
- [20] Kurth S, Hiller K, Neumann N, et al. Subwavelength structures for infrared filtering[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7713: 77131S.
- [21] Rupprecht J, Kurth S, Hiller K, et al. Subwavelength grating reflectors for fabrication cost reduction of Fabry-Perot infrared filters[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(8): 4280-4288.
- [22] Kurth S, Hiller K, Meinig M, et al. Subwavelength grating reflectors in MEMS tunable Fabry-Perot infrared filters with large aperture[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8995: 89950I.
- [23] Meinig M, Ebermann M, Neumann N, et al. Dual-band MEMS Fabry-Pérot filter with two movable reflectors for mid- and long-wave infrared microspectrometers[C]//2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, June 5-9, 2011, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2011: 2538-2541.
- [24] Ebermann M, Neumann N, Hiller K, et al. Widely tunable Fabry-Perot filter based MWIR and LWIR microspectrometers[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8374: 83740X.
- [25] Ebermann M, Neumann N, Binder S, et al. A fast MEMS infrared microspectrometer for the measurement of hydrocarbon gases[C]//2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), June 21-25, 2015, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2015: 2037-2040.
- [26] Ebermann M, Neumann N, Hoppe S, et al. Next generation of highly miniaturized bulk-mems Fabry-Pérot filters for infrared microspectrometers[C]//2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSensors XXXIII), June 23-27, 2019, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 470-473.
- [27] Keraenen K, Karioja P, Rusanen O, et al. Electrically tunable NIR spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3099: 181-184.
- [28] Blomberg M, Kattelus H, Miranto A. Electrically tunable surface micromachined Fabry-Perot interferometer for visible light[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 162(2): 184-188.
- [29] Antila J, Miranto A, Mäkynen J, et al. MEMS and piezo actuator-based Fabry-Perot interferometer technologies and applications at VTT[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7680: 76800U.
- [30] Tuohiniemi M, Blomberg M. Surface-micromachined silicon air-gap Bragg reflector for thermal infrared[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(7): 075014.
- [31] Rissanen A, Kantojärvi U, Blomberg M, et al. Monolithically integrated microspectrometer-on-chip based on tunable visible light MEMS FPI[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 182: 130-135.
- [32] Antila J, Mannila R, Kantojärvi U, et al. Spectral imaging device based on a tuneable MEMS Fabry-Perot interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8374: 83740F.
- [33] Rissanen A, Mannila R, Antila J. Bragg reflectors for large optical aperture MEMS Fabry-Perot interferometers[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8373: 83732R.
- [34] Mannila R, Tuohiniemi M, Mäkynen J, et al. Hydrocarbon gas detection with microelectromechanical Fabry-Perot interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8726: 872608.
- [35] Mannila R, Näsälä A, Viherkanto K, et al. Spectral imager based on Fabry-Perot interferometer for aalto-1 nanosatellite[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8870: 887002.
- [36] Mäkynen J H, Tuohiniemi M, Näsälä A, et al. MEMS Fabry-Perot interferometer-based spectrometer demonstrator for 7.5 μm to 9.5 μm wavelength range [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8977: 89770U.
- [37] Kantojärvi U, Varpula A, Antila T, et al. Compact large-aperture Fabry-Perot interferometer modules for gas spectroscopy at mid-IR[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8992: 89920C.
- [38] Mannila R, Hyypiö R, Korkalainen M, et al. Gas

- detection with microelectromechanical Fabry-Perot interferometer technology in cell phone[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9482: 94820P.
- [39] Rivas A O. Tunable micro-electro mechanical fabry perot etalon[M]. Rochester Institute of Technology, 2011.
- [40] Kim T S. Design, simulation, fabrication, and characterization of MEMS-based, tunable FABRY-PEROT interferometer filter in the long wavelength infrared region[D]. Santa Cruz: University of California, Santa Cruz, 2019.
- [41] Levin P, Ashkenazy E, Raz A, et al. A wafer level packaged fully integrated hyperspectral Fabry-Perot filter with extended optical range[C]//2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, January 27-31, 2019, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 270-273.
- [42] Levin P, Ashkenazy E, Raz A, et al. A wafer level packaged fully integrated tunable Fabry-Pérot filter with extended optical range for multispectral and hyperspectral imaging[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(3): 357-369.
- [43] 李元元. 微F-P腔可调谐滤波器的设计与工艺制备[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
Li Y Y. Design and fabrication of micro F-P cavity tunable filter[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [44] 李元元, 蒙庆华, 陈四海, 等. 基于MEMS技术的F-P腔滤波器分析与设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(8): 69-71, 74.
Li Y Y, Meng Q H, Chen S H, et al. Analysis and design of MEMS-based F-P cavity filter[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(8): 69-71, 74.
- [45] 任浩杰, 侯海港, 朱丽慧, 等. 低电压驱动F-P腔可调谐滤波器的仿真和设计[J]. 半导体光电, 2020, 41(2): 182-186, 216.
Ren H J, Hou H G, Zhu L H, et al. Simulation and design of low voltage driven F-P cavity tunable filter [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 182-186, 216.