

光学学报

MEMS 法布里-珀罗滤波芯片及其光谱探测应用研究进展

周奎^{1,2}, 单政^{1,2}, 张倩^{1,2}, 王谢君^{1,2}, 周健³, 邓宸伟⁴, 虞益挺^{1,2*}

¹西北工业大学宁波研究院, 深圳研究院, 机电学院, 陕西 西安 710072;

²西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西省微纳机电系统重点实验室, 陕西 西安 710072;

³西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065;

⁴北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

摘要 光谱探测技术在未来智能装备中发挥着视觉检测、理化分析和过程控制等智能识别的作用, 广泛应用于食品安全、医学诊断、环境监测、防伪鉴别、植物病害抑制、预警侦察等领域。传统光谱探测系统因受限于分光元件而存在体积大、成本高和定制化能力有限等问题。基于微机电系统(MEMS)技术的法布里-珀罗(FP)滤波芯片为微型化、低成本和定制化的光谱探测系统提供了新的解决途径。近三十年来, 针对实用化 MEMS-FP 滤波芯片的研究已取得长足的进展, 并已应用于实际的微小型光谱探测系统中, 但在芯片制造、器件性能和系统集成方面仍面临诸多要攻克的难题。对 MEMS-FP 滤波芯片的原理和性能、器件分类、实用化研究进展进行了综述, 并分析了目前存在的问题和未来的发展趋势。

关键词 光学器件; 法布里-珀罗滤波芯片; 光谱探测; 光谱成像; 分光元件

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0800001

Research Progresses of MEMS Fabry-Perot Filtering Chips and Their Applications for Spectral Detection

Zhou Kui^{1,2}, Shan Zheng^{1,2}, Zhang Qian^{1,2}, Wang Xiejun^{1,2}, Zhou Jian³,
Deng Chenwei⁴, Yu Yiting^{1,2*}

¹Ningbo Institute, Research & Development Institute in Shenzhen, School of Mechanical and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

²Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace (Ministry of Education), Key Laboratory of Micro and Nano Electro-Mechanical Systems of Shaanxi Province, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

³Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

⁴School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Spectral detection technology plays important roles in intelligent identification of next-generation smart equipment, such as visual inspection, physico-chemical analysis, and process control, which can be widely used in the fields of food safety, medical diagnosis, environmental monitoring, anti-counterfeiting identification, plant disease suppression, and military reconnaissance and early warning. Traditional spectral detection systems are limited by dispersion elements, which suffer from large volume, high cost, and poor customization capability.

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-10-07; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(51975483)、军科委基础加强项目、陕西省重点研发计划(2020ZDLGY01-03)、深圳学科布局项目(JCYJ20180508151936092)、宁波市自然科学基金(202003N4033)

通信作者: *yyt@nwpu.edu.cn

Fabry-Perot (FP) filtering chips based on micro-electro-mechanical system (MEMS) technology provide a new solution for the miniaturized, low-cost, and customizable spectral detection systems. In recent three decades, considerable progresses have been achieved in the area of practical MEMS-FP filtering chips, which have been widely applied to miniaturized spectral detection systems. However, many problems need to be solved in the aspects of chip manufacturing, performance improvement, and system integration. In this paper, the principle and performance, device classification, and application progresses of MEMS-FP filtering chips are reviewed. And also, the existing problems and development trends in the future are discussed.

Key words optical devices; Fabry-Perot filtering chips; spectral detection; spectral imaging; dispersion elements

1 引 言

自 19 世纪 60 年代德国科学家 Kirchhoff 和 Bunsen 提出实用光谱学以来,光谱探测技术已被广泛应用于众多现代科学领域,如光谱成像^[1]、现代天文学^[2]、遥感遥测^[3]、物质检测与分析^[4]等。随着 5G 浪潮来袭,建设智慧生态地球和智慧城市成为关注热点,基于光谱探测技术的智能识别系统为生态地球和智慧城市的发展提供了动力引擎,尤其是融合了光谱技术和成像技术的光谱成像技术以其克服传统光学成像信息缺失、可实现智慧识别和态势感知的优势,在未来各种人工智能系统中充当“火眼金睛”的角色。在民用领域,搭载光谱成像系统的对地观测卫星、气象卫星和无人机等探测平台,可用于智慧农业/林业^[5-8]、资源勘测^[9-10]、环境监测^[11-12]、生物医学^[13-15]和智慧城市^[16]等领域,构成智慧生态地球的重要部分,实现感知与识别双重功能。以智能手机为代表的消费类电子产品搭载滤波芯片后具备光谱成像功能,为食品安全检测^[17]、防伪鉴别^[18]等智能家居提供服务。在军事领域,光谱成像技术主要用于机载和星载光电探测系统、制导武器的导引系统,提升战场态势分析、战术战略预警和目标精确打击等作战效能^[19-24]。随着搭载平台小型化、无人化和智能化的发展,为满足各方面的应用需求,光谱探测系统的微型化、集成化和定制化成为必然的发展趋势。

分光元件是光谱探测系统的核心元件之一,主要实现对目标光谱特征的采集。分光元件不仅决定了光谱探测系统的探测模式、谱段范围和分辨率等光学性能,同时也在很大程度上决定了系统的整机构架、体积、质量等指标^[25]。目前常用的分光技术主要有色散型、干涉型和可调滤波型^[26]。色散型分光元件主要以棱镜和光栅最为常见^[27-29];干涉型分光元件主要基于傅里叶变换原理实现滤波功能,如迈克耳孙干涉仪^[30]、马赫-曾德尔干涉仪^[31];可调滤波型分光元件主要包括多通道滤波轮^[32]、以液晶可调谐滤波器(LCTF)和声光可调谐滤波器(AOTF)

为代表的可调谐滤波器^[33-34]。上述分光元件虽已实用化和商用化,但存在定制化能力差、结构复杂、体积大、成本高等缺点,难以满足下一代光谱探测系统的需求。因此,开发微型化、性能可定制和高分辨率的分光元件是构建微型光谱探测系统的关键。

随着微机电系统(MEMS)技术的发展,采用微纳加工技术制作的各种 MEMS 光功能芯片,不仅克服了传统光学元件体积大、定制化能力差和成本高的缺点,且实现了光学元件由静到动的质的跨越^[35-37]。基于 MEMS 技术制作的静态和动态滤波芯片,采用微纳结构调控干涉、衍射和色散等光学参量的原理实现滤波功效,通过改变微纳结构尺寸、形状和材料等特征则可实现滤波性能的定制^[38-43]。随着探测目标的多样化、复杂化和隐蔽化,高精度识别、高分辨率成为光谱探测系统发展的必然趋势。静态滤波芯片受限于滤波通道有限、空间分辨率损失大等缺陷而难以满足未来光谱探测系统的需求,而基于 MEMS 技术的可调谐法布里-珀罗(FP)滤波芯片以其滤波性能定制化能力强、结构简单、空间分辨率高等优点,在光谱探测方面展现出显著优势。

基于多光束干涉的 FP 滤波原理最早于 1897 年由法国物理学家 Fabry 和 Perot 提出。基于传统加工方式制作的 FP 标准具和基于传统调控方式的 FP 滤波器的光学性能和调控性能较差,难以满足现代光谱滤波需求^[44]。MEMS 技术为 FP 滤波器件的芯片化、微型化和集成化提供了技术支撑。本综述从实用化的角度出发,对 MEMS-FP 滤波芯片的基本原理、性能参数和类别进行了阐述,并对其发展及光谱探测应用现状进行了归纳,最后对其目前存在的问题和未来的发展趋势进行了总结。

2 MEMS-FP 滤波芯片工作机理

最早的 MEMS-FP 滤波芯片是 Mallinson 等^[45-46]于 1987 年提出的,经过三十余年的发展,已形成较为完善的理论、制造和应用体系。通常情况下, MEMS-FP 滤波芯片的基本结构和工作原理如

图 1 所示,其结构由两个带有半透半反镜的平板镜体组成,其中一个镜体固定,另一个镜体可动,从而实现 FP 腔长的可控变化。当入射光通过其中一个镜体进入 FP 干涉腔内,且满足

$$\lambda_m = \frac{2nd \cos \theta}{m}, \quad (1)$$

式中: λ_m 为入射光波长; d 为 FP 腔长; n 为 FP 腔介质折射率; m 为干涉级次, $m=1,2,\dots$; θ 为入射角。波长为 λ_m 的入射光可在 FP 腔内发生稳定的多光

束谐振,并以较高的能量从 FP 腔透射,其余波长的入射光则逐渐在 FP 腔中衰减。假设 FP 腔介质为空气,入射光垂直入射时,(1)式可简化为

$$\lambda_m = \frac{2d}{m}, \quad (2)$$

即 FP 腔长 d 为半波长的整数倍($m\lambda_m/2$)时,入射光可经 FP 腔透射。通过设计 MEMS 驱动机构实现可动镜体平动,此时 FP 腔长 d 发生改变时,透射光波长 λ_m 发生变化,从而实现可调谐滤波。

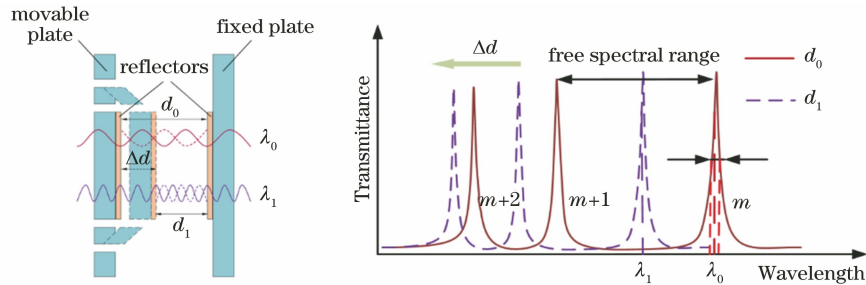


图 1 MEMS-FP 滤波芯片的基本结构及工作原理

Fig. 1 Basic structure and working principle of MEMS-FP filtering chips

MEMS-FP 滤波芯片作为一种光功能芯片,需考虑透过率(T)、半峰全宽(FWHM,其值可表示为 W_{FWHM})、自由谱范围(FSR,其值可表示为 R_{FSR})和精细因子(F)等关键性能参数。根据多光束干涉原理和艾里公式,当不考虑材料对光强的吸收时,FP 腔的光学透过率 T 为

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (3)$$

式中: R 为半透半反镜的反射率; φ 为相邻光波间的相位差。当相位差 φ 恒定时,FP 腔的透过率 T 取决于镜面反射率 R , R 越大, T 越小。FWHM 是衡量光谱分辨率的重要参量,其大小取决于反射率 R 和干涉等级 m :

$$W_{\text{FWHM}} = \frac{\lambda(1-R)}{m\pi\sqrt{R}}, \quad (4)$$

当镜面反射率 R 增大时,透射特征峰的 FWHM 减小。选择较高的镜面反射率对提升滤波芯片的光谱分辨率有益,但会导致透过率 T 的下降。

FSR 决定了光谱探测系统的适用光谱范围。通常情况下,将 MEMS-FP 滤波芯片的相邻两干涉等级滤波峰值之间的光谱范围定义为 FSR,其主要取决于 MEMS-FP 滤波芯片工作时的干涉等级 m ,在第 m 级和第 $m+1$ 级干涉峰之间,自由谱范围为

$$R_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_m}{m+1}. \quad (5)$$

因此,对于工作在较低干涉等级的 MEMS-FP 滤波芯片,其 FSR 越大,可供调节的光谱范围越大。当 MEMS-FP 滤波芯片的 FSR 和 FWHM 确定时,其透射光谱的精细因子 F 为

$$F = \frac{R_{\text{FSR}}}{W_{\text{FWHM}}} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (6)$$

其用于描述自由谱范围内两相邻滤波峰值之间的相位差与半峰全宽之间的比值,主要受到镜面反射率 R 的影响: R 越大, F 越大,光谱曲线的精细程度越高。

此外,通光孔径也是衡量 MEMS-FP 滤波芯片光通量的重要参量,其决定了滤波芯片的光学信息和能量通量。对于理想的 MEMS-FP 滤波芯片,其通光孔径越大,所透过的光学信息量和能量越多,然而受限于当前的 MEMS 工艺水平,很难将通光孔径做大。

由此可见,镜面反射率 R 和干涉等级 m 是影响 MEMS-FP 滤波芯片的光谱透过率 T 、半峰全宽 FWHM、自由谱范围 FSR 和精细因子 F 等关键参数的两个重要因素^[47-48],MEMS-FP 滤波芯片的定制则主要通过设计特定的镜面反射率 R 和干涉等级 m 来对其光学性能进行定制。不同用途的 MEMS-FP 滤波芯片对各方面光谱性能参数的要求存在差异,因此在设计时需针对不同的使用需求进行性能定制。通信应用领域(如波分多路复用)的 MEMS-FP 滤波芯片需要较小的 FWHM,且对 FSR

要求不高,可根据(4)和(5)式提高干涉等级 m 和反射率 R ,获得理想的光谱;而对于理想的用于光谱成像的 MEMS-FP 滤波芯片,需要大范围的 FSR、较高的透过率 T 、合适的 FWHM 和较大的通光孔径,因此需选用合适的反射率 R ,以平衡透过率 T 和半峰全宽 FWHM^[48]。

3 MEMS-FP 滤波芯片的分类

3.1 基于不同加工方法的分类

现有的 MEMS-FP 滤波芯片按照加工方法可以分为两大类:基于体加工技术的 MEMS-FP 滤波芯片和基于表面微加工技术的 MEMS-FP 滤波芯片。采用两种加工技术制作的 MEMS-FP 滤波芯片各有优缺点^[47],如表 1 所示。图 2 为基于两种加工技术的 MEMS-FP 滤波芯片的示意图,基于体加

工的 MEMS-FP 滤波芯片通常采用两片及两片以上的基底,采用光刻、刻蚀和薄膜沉积制作 FP 腔结构和可动结构,MEMS-FP 滤波芯片的 FP 腔的间距通过键合的方式来确定,在设计上具有更高的灵活性,然而实际的加工过程比较复杂,且键合层厚度通常难以精确控制,造成多级次滤波。因采用了较厚的基底结构,MEMS-FP 滤波芯片的应力敏感性较低,比较适用于制作大孔径的滤波芯片,但其本身具有较大的质量,呈现明显的外力敏感性。基于表面微加工的 MEMS-FP 滤波芯片通常采用一片基底制作,通过薄膜沉积、光刻和牺牲层等技术制作,设计灵活性较低且制作工艺难度较大。由于薄膜 FP 腔结构质量较小,因此其外力敏感性可忽略,但因薄膜应力的存在,应力敏感性较高,不适宜制作大孔径的 MEMS-FP 滤波芯片。

表 1 基于体加工技术和表面微加工技术的 MEMS-FP 滤波芯片对比

Table 1 Comparison of MEMS-FP filtering chips based on bulk micromachining and surface micromachining

Characteristic	Bulk micromachining	Surface micromachining
Number of substrates	No less than two	Normally one
Flexibility of design	High	Low
Complexity of fabrication	High	High
Sensitivity to external force	High	Low
Chip size (aperture size)	Large	Small

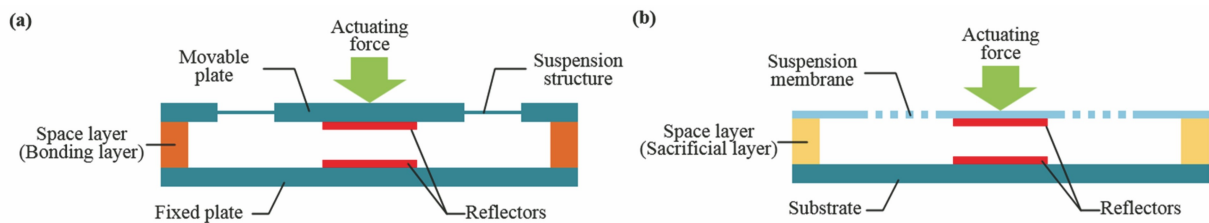


图 2 基于体加工技术和表面微加工技术的 MEMS-FP 滤波芯片对比。(a)体加工;(b)表面微加工

Fig. 2 Comparison of MEMS-FP filtering chips based on bulk micromachining and surface micromachining.

(a) Bulk micromachining; (b) surface micromachining

3.2 基于不同驱动方式的分类

MEMS 驱动技术是实现 MEMS-FP 滤波芯片可调滤波功能的根本技术保障,常用的 MEMS 驱动技术主要有静电驱动、压电驱动、热驱动和电磁驱动。目前基于不同驱动技术的 MEMS-FP 滤波芯片均有报道,其示意图如图 3 所示,主要性能对比如表 2 所示。

静电驱动是 MEMS-FP 滤波芯片最早也是最常用的驱动方式,如图 3(a)所示,采用通过在驱动电极上施加电压产生的静电力驱动镜体移动改变 FP 腔长,实现可调光谱滤波功能^[45]。静电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片的优势在于设计灵活性高、结构简单易制作和响应速度快,可采用成熟的 MEMS

工艺制作驱动电极,并可通过制作多组传感电极来实时检测 FP 腔间距和进行闭环控制,因此静电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片具有较高的工艺兼容性。静电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片的最大缺点是其 pull-in 现象,和其他由两平板电极组成的静电驱动式 MEMS 器件相同,其电极移动范围仅为两电极初始间距的 1/3 左右,若继续增大调节电压,则可能导致器件瞬间吸合而失效^[49-51]。此外,静电驱动响应通常为非线性响应,因此采用静电驱动方式的 MEMS-FP 滤波芯片的调节范围通常有限,尤其是采用分布式布拉格反射镜(DBR)的 MEMS-FP 滤波芯片^[48]。

表 2 基于不同驱动方式的 MEMS-FP 滤波芯片性能对比

Table 2 Performance comparison of MEMS-FP filtering chips based on different actuation strategies

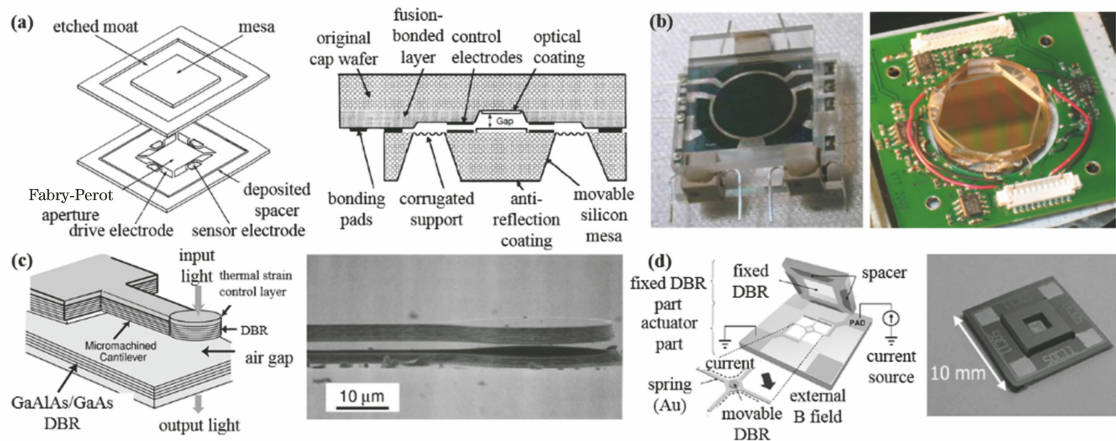
Actuation strategy	Advantage	Disadvantage
Electrostatic actuation	High design flexibility, simple structure, rapid response, high process compatibility	Non-linear response, pull-in phenomenon, limited tuning range (1/3 of FP cavity length)
Piezoelectric actuation	Large aperture (up to 19 mm)	Low fabrication efficiency, high actuating voltage
Thermal actuation	Large tuning range	Slow response, high power consumption
Electromagnetic actuation	Large tuning range (up to 5 μm), linear response (linearity better than 80%)	Thermal drift

图 3(b)所示为芬兰国家技术研究中心(VTT)提出的采用压电驱动技术的 MEMS-FP 滤波芯片,其原理是利用压电材料的逆压电效应,通过对压电材料施加电压发生形变,从而改变 FP 腔长度,实现光谱调控。压电驱动 MEMS-FP 滤波芯片的优点是孔径大(最大可达 19 mm),可满足大视场光谱成像的应用需求^[52]。但压电材料难以采用 MEMS 技术进行加工,因此会影响滤波芯片的批量化、高效率生产。

采用热驱动的 MEMS-FP 滤波芯片通过材料的热电效应驱动可动镜体运动,当停止施加电压,热量逐渐消散使 FP 腔复位。图 3(c)所示为一种热驱动 MEMS-FP 滤波芯片,通过对制作在悬臂梁结构上的热应力膜层加热,产生热应变,实现 FP 腔长的大范围变化和可调滤波^[53]。采用热驱动的 MEMS-FP 滤波芯片需要较长时间的加热与散热,存在响应速度慢、功耗大的缺点,难以满足快速光谱探测的应用领域。

采用以上驱动方式的 MEMS-FP 滤波芯片可动镜均是单向调节,这限制了滤波芯片的光谱调节范围及其应用,且存在非线性、功耗高等缺点。为满足大范围光谱调制的需要, Lee 等^[54]于 2004 年开发了一款采用电磁驱动方式的 MEMS-FP 滤波芯片,如图 3(d)所示,采用通电电磁线圈在磁场中受洛伦兹力运动的机制实现双向调节,并根据洛伦兹力与电流成正比的关系,设计合理的折叠梁和波纹梁结构,在较小的驱动电流下实现了芯片的大范围线性调制,但电磁驱动本身存在热漂移特点,可能影响器件的稳定性。

随着应用领域对 MEMS-FP 滤波芯片各方面性能的要求越来越高,基于压电驱动和热驱动技术的 MEMS-FP 滤波芯片已难以适应发展要求,采用静电驱动技术的 MEMS-FP 滤波芯片仍然是主流,而基于电磁驱动技术的 MEMS-FP 滤波芯片则以其线性大范围调制的优势,在未来具有较大的发展潜力。

图 3 基于不同驱动方式的 MEMS-FP 滤波芯片。(a)静电驱动^[45];(b)压电驱动^[52];(c)热驱动^[53];(d)电磁驱动^[54]Fig. 3 MEMS-FP filtering chips based on different actuation strategies. (a) Electrostatic actuation^[45];(b) piezoelectric actuation^[52]; (c) thermal actuation^[53]; (d) electromagnetic actuation^[54]

3.3 基于不同镜面类型的分类

反射镜面是 MEMS-FP 滤波芯片实现多光束干涉滤波的关键结构,其参数直接影响 FWHM、 T

等。按照所采用的镜面类型, MEMS-FP 滤波芯片主要分为两大类:基于金属反射镜的 MEMS-FP 滤波芯片和基于分布式布拉格反射镜(DBR)的

MEMS-FP 滤波芯片。两种镜面的特点如表 3 所示。

光学领域中常用的金属反射镜主要有 Au、Ag 和 Al 薄膜,图 4 所示为不同厚度的金属薄膜对各波段的反射率(仿真值)。在可见光波段,Ag 和 Al 薄膜具有较高的反射率,可用作 MEMS-FP 滤波芯片的反射镜;在红外波段,金属膜均具有较高的反射

率,但金属膜对红外光具有较强的吸收作用,因此很少用于红外波段 MEMS-FP 滤波芯片的制作。金属镜通常厚度小、无带宽限制、制作工艺简单成熟,但较大的吸收损耗会造成较大的光能和分辨率损失^[55]。此外金属膜在空气中存在氧化或硫化现象,导致 MEMS-FP 滤波芯片功能失效,可通过在镜面上镀制保护层的方式防止其氧化或硫化。

表 3 金属反射镜及 DBR 特点对比

Table 3 Characteristic comparison of metallic mirror and DBR

Mirror type	Advantage	Disadvantage
Metallic mirror	Thin film thickness, wide band range, simple fabrication process	High absorption loss, oxidization/sulfurization phenomenon
DBR	High customization capability, low absorption loss, high spectral resolution	Limited band range, high film stress, phase-shift phenomenon

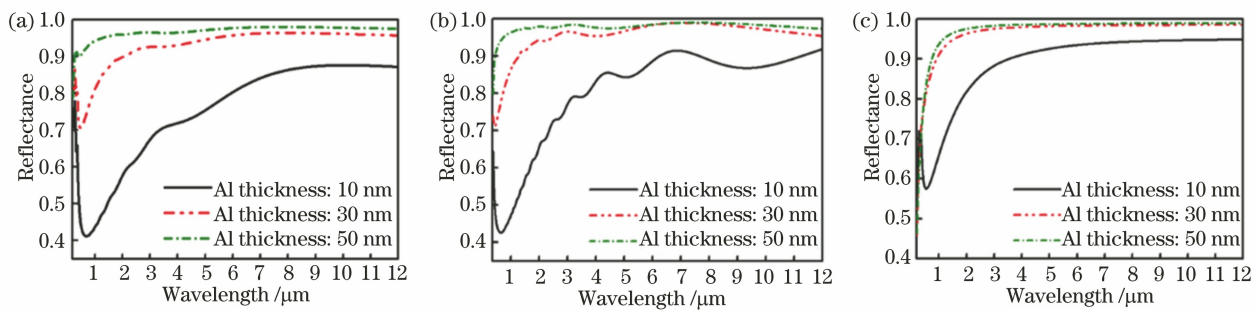


图 4 不同厚度金属薄膜的反射率。(a)金膜;(b)银膜;(c)铝膜

Fig. 4 Reflectance of different metallic films with different thicknesses. (a) Au film; (b) Ag film; (c) Al film

MEMS-FP 滤波芯片中另一种常用的镜面是基于电介质薄膜的 DBR,是由一种高折射率(n_H)电介质材料和另一种低折射率(n_L)电介质材料交替叠加构成的堆栈式周期性薄膜结构,如图 5(a)所示。DBR 层数通常为奇数,高、低折射率膜层的单层厚度均为 $1/4$ 波长厚度,其反射率为^[56]

$$R = \left[\frac{1 - n_s \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N}}{1 + n_s \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N}} \right]^2, \quad (7)$$

式中: n_s 为基底折射率; N 为布拉格周期。通过选用不同折射率比值的薄膜材料和布拉格周期 N 进行反射率的定制。以中心波长 $\lambda_m = 550 \text{ nm}$ 的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ($n_H:n_L = 2.24:1.42$) 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ($n_H:n_L = 2.24:1.67$) 为例,不同折射率比值和不同层数的 DBR 的反射率曲线如图 5(b)和 5(c)所示。折射率比值和布拉格周期 N 越大时,反射率 R 越大,且高反射区域越宽;通过增大布拉格周期 N 可使反射率 R 无限接近 100%。因此基于 DBR 的 MEMS-FP 滤波芯片设计须考虑滤波性能、膜层材

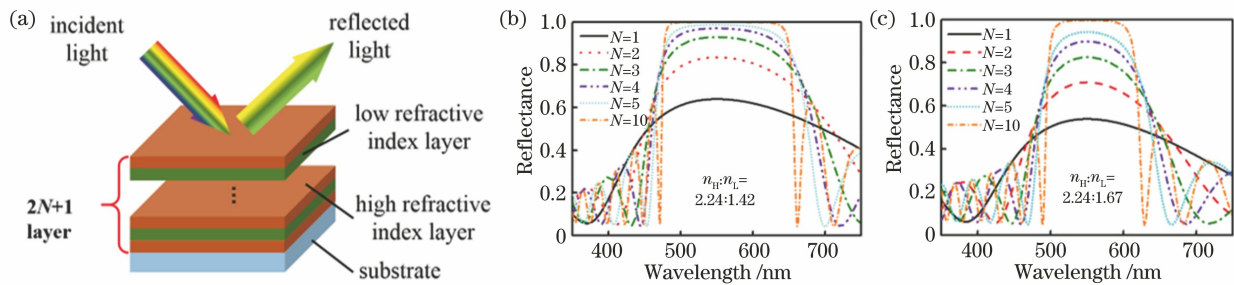


图 5 不同膜系 DBR 的反射率。(a)原理结构;(b) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系;(c) $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系

Fig. 5 Reflectance of DBR with different film compositions. (a) Schematic structure; (b) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ film; (c) $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ film

料和厚度等综合因素。受各波段可选用的 DBR 材料和膜层厚度的限制, MEMS-FP 滤波芯片所使用的 DBR 种类也受到限制, 在可见光至近红外波段, MEMS-FP 滤波芯片通常选用 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 等膜系; 而对于长波红外波段, 最常用的 DBR 为 Ge/ZnS 膜系, 短波和中波红外波段也可采用 Ge/SiO_2 和 Si/SiO_2 等膜系^[57-58]。

通常 DBR 所采用的介质材料的吸收率可忽略不计, 因此基于 DBR 的 MEMS-FP 滤波芯片具有可定制化能力强、低损耗、光谱分辨率高的优势, 但受到本身带宽的限制, 其光谱范围较小, 且膜较厚可能引入薄膜应力, 导致镜面弯曲。此外, 采用 DBR 的 MEMS-FP 滤波芯片存在相移问题。图 6 为采用金属镜和 DBR 的两种 MEMS-FP 滤波芯片的滤波效果。当 FP 腔改变相同的距离时, 基于金属反射镜的 MEMS-FP 滤波芯片的 FP 腔长和滤波峰值之间的变化关系较好地满足(1)式, 而基于 DBR 的 MEMS-FP 滤波芯片受光波在膜层界面之间相移的影响, 出现滤波峰值向中心波长方向靠拢的现象。DBR 膜层数量越多, 该现象越明显, 这种现象在一定程度上限制了基于 DBR 的 MEMS-FP 滤波芯片的光谱调谐范围^[48]。

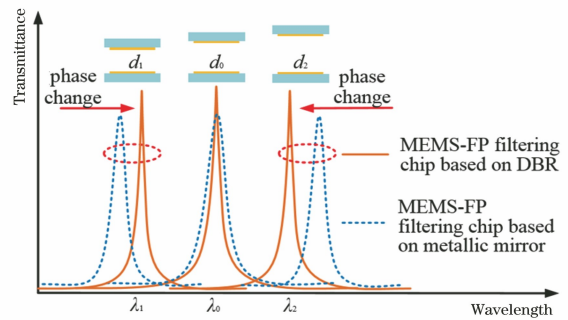


图 6 基于 DBR 的 MEMS-FP 滤波芯片的相移
Fig. 6 Phase shift of MEMS-FP filtering chip based on DBR

除了以上两种反射镜, 也有部分研究采用了基于亚波长周期性微纳结构的反射型表面, 如纳米孔、纳米柱等^[59-61]。图 7 所示为一种用于 MEMS-FP 滤波芯片的亚波长孔阵列光子晶体反射镜。在硅基底上沉积 $1\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 , 并采用光刻、刻蚀等工艺在 SiO_2 薄膜上制作周期性亚波长纳米孔阵列, 最后释放 SiO_2 薄膜, 形成二维光子晶体反射镜, 实现对特定波段的反射。这种镜面相比于以上两种反射镜, 具有低应力、低吸收的优势, 在未来的 MEMS-FP 滤波芯片的研制中具有一定的应用潜力。

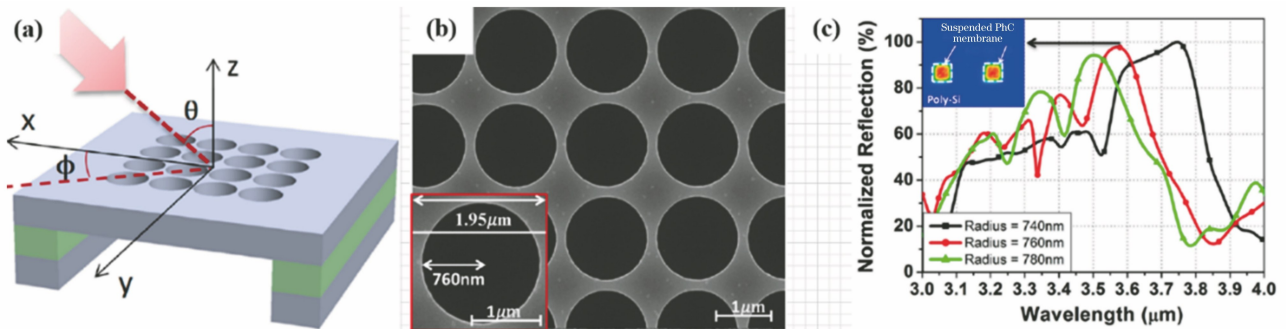


图 7 亚波长周期性孔阵列光子晶体反射镜^[60]。(a)原理结构;(b)扫描电子显微镜(SEM)图;(c)实测反射率
Fig. 7 Photonic-crystal reflector based on sub-wavelength periodic hole-array^[60]. (a) Schematic structure; (b) SEM picture; (c) measured reflectance

4 典型 MEMS-FP 滤波芯片及其应用

随着无人机、微小卫星和智能移动设备等现代无人化、小型化平台在民用和军事领域中的应用, 基于 MEMS-FP 滤波芯片的光谱探测系统的低成本、微型化和定制化的优势日益凸显。全球范围内多个国家的研究机构投入了大量的研究资源以研制可投入实际应用的 MEMS-FP 滤波芯片, 其中以美国国家航空航天局(NASA)和陆军实验室、德国英福泰克(InfraTec GmbH)、芬兰 VTT 取得的成果最为

突出。

4.1 美国

美国作为全球科技领军者, 其民用、军用和天文等方面对光谱探测的需求巨大, 最早开始了对 MEMS-FP 滤波芯片的研发, 并持续投入了大量的研究资源。除 Mallinson 等^[45]于 1987 年制作出用于波分多路复用的 MEMS-FP 滤波芯片外, NASA 于 2003 年开发了一款用于大视场红外天文成像的硅基静电驱动 MEMS-FP 滤波芯片^[62-63], 如图 8 所示, 通光孔径达到 $11\ \text{mm}$, 这是目前已报道的采用

硅基材料制作的最大的 MEMS-FP 滤波芯片。这款芯片采用 MEMS 体加工技术制作,并通过各组反馈电极之间的电容差检测两镜体的平行度和 FP 腔间距,从而实现闭环控制。经封装后测试可得,在 40 V 的驱动电压下可实现最大约为 $7.5 \mu\text{m}$ 的移动距离,透过率约为 90%。然而键合层厚度大和氮化硅支撑薄膜弯曲,导致工作波段内出现多级次滤波。此外,这种滤波芯片采用单片键合方式制作,加工效率较低,难以实现大规模批量化制造。

美国陆军实验室在 2011—2013 年采用体加工技术制作了一款静电驱动 MEMS-FP 滤波芯

片^[64-66],如图 9 所示。这款芯片以高透过率熔融石英为基底,其悬臂梁结构采用氟化氢(HF)湿法刻蚀工艺制作,以银膜作为反射镜,并在银膜表面镀制 ITO 保护层以防止氧化和硫化,最后采用金-金热压键合进行 FP 腔的构建。该芯片的通光孔径为 6 mm,可在 60 V 的电压下实现 395 nm 的位移,滤波峰值透过率范围为 5%~30%。由于残余应力的影响,悬臂梁发生翘曲,FP 腔初始间距过大导致出现多级次滤波峰值。这款滤波芯片主要用于光谱成像,通过结合 AOTF、光阑等光学元件构建了光谱成像系统,实现了一定的光谱成像效果。

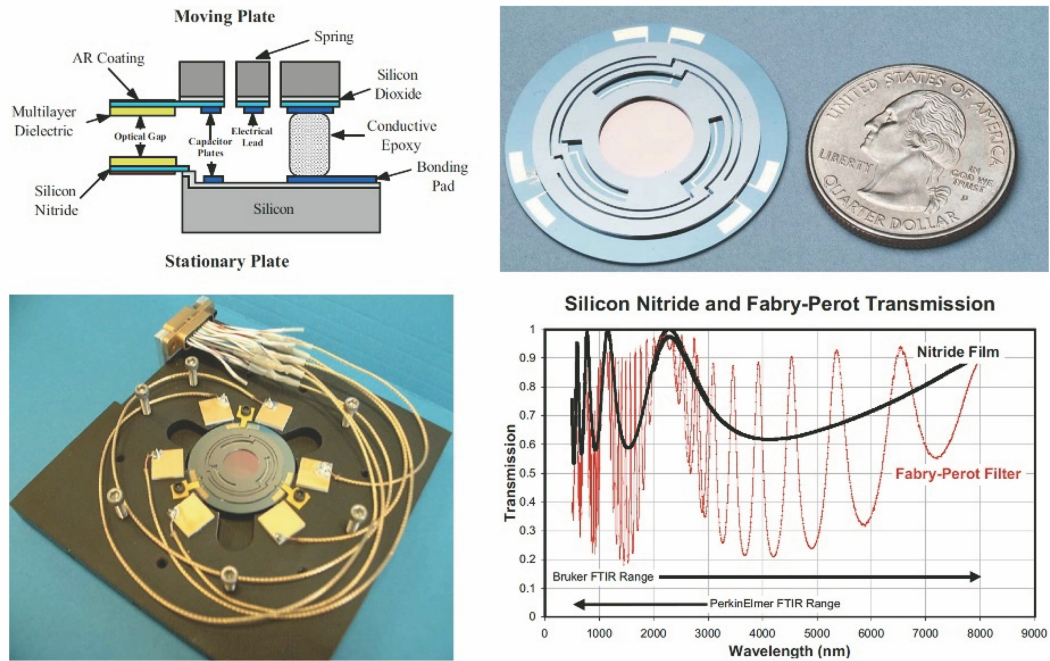


图 8 美国 NASA 研制的中波红外静电驱动 MEMS-FP 滤波芯片^[62]

Fig. 8 Electrostatically tunable MEMS-FP filtering chip working in mid-infrared wavelength developed by NASA in US^[62]

4.2 德国

据相关文献,德国关于 MEMS-FP 滤波芯片的最早报道是 1995 年慕尼黑工业大学 Rossberg^[67]提出的一种用于红外光谱学的硅基静电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片,其采用干/湿法刻蚀工艺制得,可在 $1.5\sim 7.5 \mu\text{m}$ 的红外波段实现光谱调制,滤波带宽小于 25 nm。2008 年,德国 InfraTec 的 Neumann 等^[68-69]联合费劳恩霍夫研究所、开姆尼兹工业大学研究人员开发出一款用于气体探测的 MEMS-FP 滤波芯片,这款芯片采用体加工技术制作,如图 10 所示,通过优化设计可动镜悬臂梁结构来减小重力等外力的影响,可在 $3\sim 4.3 \mu\text{m}$ 或 $3.7\sim 5 \mu\text{m}$ 的红外波段实现近 1000 nm 的光谱调制(FWHM:60~120 nm)。后续通过 TO8 封装工

艺对 MEMS-FP 滤波芯片进行了封装,构建了一款可调热电探测器模组。

为进一步减小外力影响,该合作团队提出一种双可动镜结构的 MEMS-FP 滤波芯片,如图 11 所示,上、下双可动镜体结构相同。当受到外界加速度干扰时,两镜体产生相同的形变,以此抵消单个可动镜体因受外力出现的 FP 腔变形^[43, 70-72]。此外,通过设计的多膜层反射镜,可在中波红外波段和长波红外波段同时实现光谱调制,其中在中波红外波段的调制范围为 $3.9\sim 4.8 \mu\text{m}$ (FWHM:50~80 nm),在长波红外波段的调制范围为 $8\sim 10.5 \mu\text{m}$ (FWHM:105~230 nm)。该团队以双波段 MEMS-FP 滤波芯片为核心,结合二元分光镜、中波红外探测器和长波红外探测器,设计了一款可同时工作中波和长

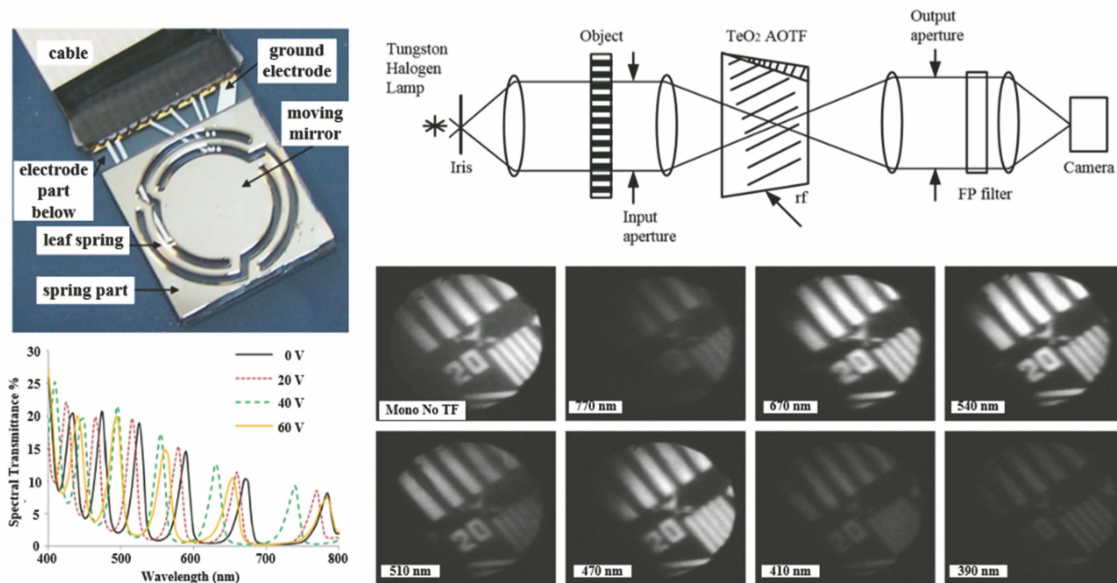


图 9 美国陆军实验室研制的可见光波段静电驱动 MEMS-FP 滤波芯片及光谱成像系统^[64-66]

Fig. 9 Electrostatically tunable MEMS-FP filtering chip working in visible wavelength and spectral imaging system developed by US Army Research Laboratory^[64-66]

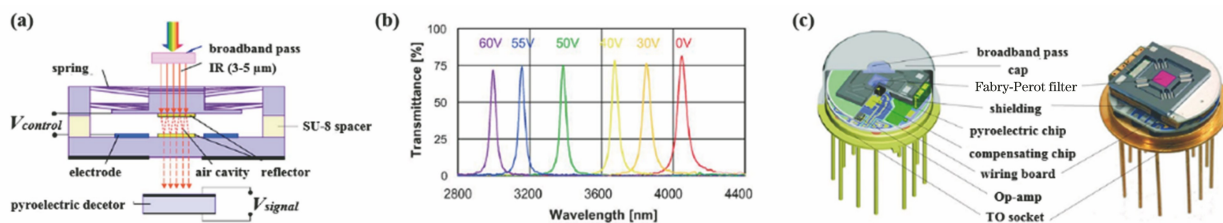


图 10 红外 MEMS-FP 滤波芯片及可调热电探测器^[68]。(a)原理结构;(b)光学性能;(c)可调热电探测器

Fig. 10 Infrared MEMS-FP filtering chip and tunable pyroelectric detector^[68]. (a) Schematic structure; (b) optical performance; (c) tunable pyroelectric detector

波红外波段的探测器模组,如图 11(b)所示。

为实现在可见光波段的应用,2016 年该团队开发了一款用于表面增强拉曼光谱的 MEMS-FP 滤波芯片,如图 12 所示,其采用体加工技术制作,通过在晶圆表面沉积氮化硅薄膜,将背面晶圆刻穿以释放氮化硅薄膜,并采用硼硅玻璃制作固定镜基底,最后采用 SU-8 键合工艺形成 FP 腔^[73]。这款滤波芯片采用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 膜系的 DBR,其通光孔径为 2 mm,光谱透过率在 52%~74%之间,可在 75 V 的驱动电压下实现 30 nm 的单级次光谱调制。该滤波芯片受 SU-8 键合工艺的限制,初始 FP 腔距离较大,出现多级次滤波。2018 年,该团队采用相同的工艺研制出一款基于 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系 DBR 的滤波芯片,拓宽了光谱调制范围^[74]。此外,为了克服金属反射镜和 DBR 的固有缺陷,该团队研制出了一款基于反射型光子晶体薄膜的 MEMS-FP 滤波芯片,如图 13 所示,通过电子束曝光和纳米压印技

术,在 Si_3N_4 薄膜上制作亚微米周期性圆孔阵列,在特定波段实现了高达 99% 的反射率,并基于该反射镜制作出了通光孔径为 0.5 mm 和 1 mm 的滤波芯片^[75]。

4.3 芬兰

芬兰 VTT 是研究和应用 MEMS-FP 滤波芯片较多的机构。Blomberg 等^[76]于 1997 年开发了一款用于 CO_2 红外检测的采用表面加工技术制作的静电驱动 MEMS-FP 滤波芯片。在后续的研究中,VTT 根据不同的应用需求,主要开发了两种 MEMS-FP 滤波芯片:一种是上述面向微小型光谱仪的采用表面加工技术制作的静电驱动 MEMS-FP 滤波芯片;另一种是用于光谱成像的大孔径压电驱动 MEMS-FP 滤波芯片^[52, 77]。

2009 年,VTT 报道了一款可见光 MEMS-FP 滤波芯片,如图 14 所示,这款芯片采用原子层沉积技术(ALD)制作 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系的 DBR,在 30 V

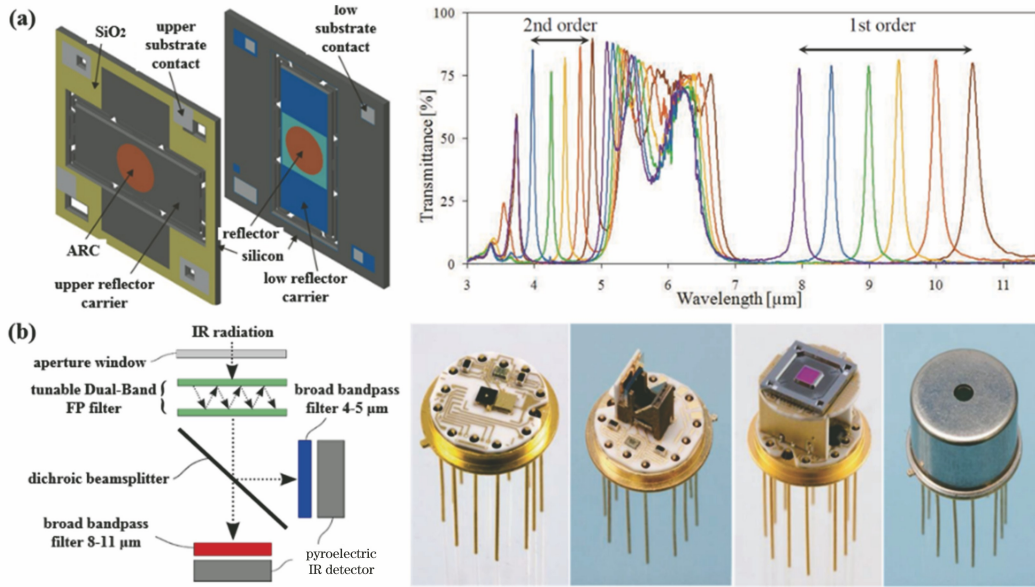


图 11 双波段 MEMS-FP 滤波芯片及探测器模组^[43,70-72]。(a) 滤波芯片结构及其光谱性能；(b) 探测器结构设计及组装过程
 Fig. 11 Dual-band MEMS-FP filtering chip and detector module^[43,70-72]. (a) Schematic structure and spectral performance of filtering chip; (b) optical design and assemble process of detector module

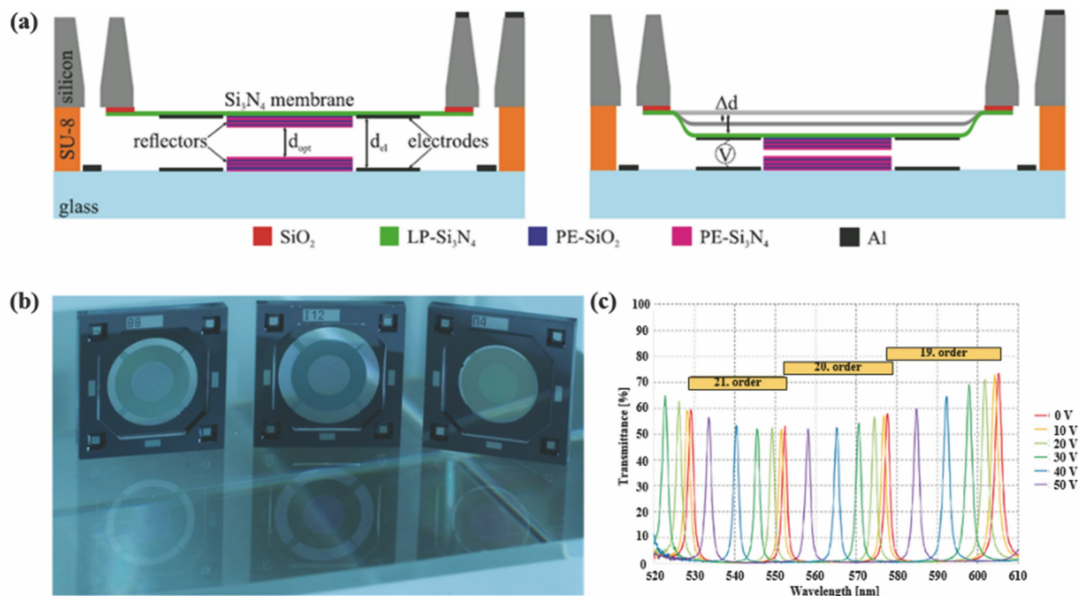


图 12 基于 Si_3N_4 薄膜的可见光 MEMS-FP 滤波芯片^[73]。(a) 结构及工作原理；(b) 不同孔径的滤波芯片样件；(c) 光学性能
 Fig. 12 Visible light MEMS-FP filtering chip based on Si_3N_4 film^[73]. (a) Schematic structure and working principle; (b) filtering chips with different aperture size; (c) optical performance

的驱动电压下可在 460~550 nm 的光谱范围进行调制,在 500 nm 波长处的透过率约为 67% (FWHM 为 5.4 nm)^[78]。这种滤波芯片能否制作成功(牺牲层能否释放成功),很大程度上取决于 ALD 多层膜的薄膜应力和粗糙度。对于在高温条件下沉积的 TiO_2 和 Al_2O_3 ,其薄膜应力较大且晶粒粗大,难以释放成功^[79]。为提高工艺的成功率,VTT 对 ALD 的工艺参数进行调节,在 110 °C 的条

件下沉积低应力 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系 DBR,以用于较大孔径滤波芯片的制作^[80]。基于上述低应力 ALD 薄膜工艺,VTT 采用表面加工技术成功制作出了透光孔径为 2 mm^[81] 和 4 mm^[82] 的 MEMS-FP 滤波芯片。

为了克服 DBR 截止带宽对自由谱范围的限制,VTT 采用表面工艺制作了一款基于 Ag 反射镜的宽波段 MEMS-FP 滤波芯片,如图 15 所示,其通光

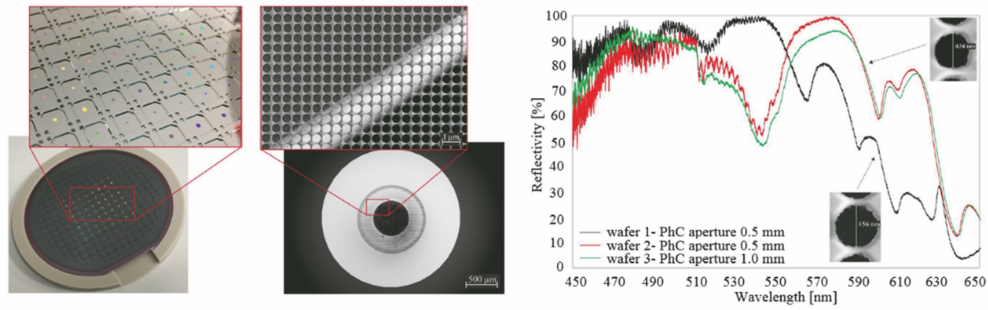


图 13 基于光子晶体反射镜的 MEMS-FP 滤波芯片^[75]

Fig. 13 MEMS-FP filtering chip based on photonic-crystal reflector^[75]

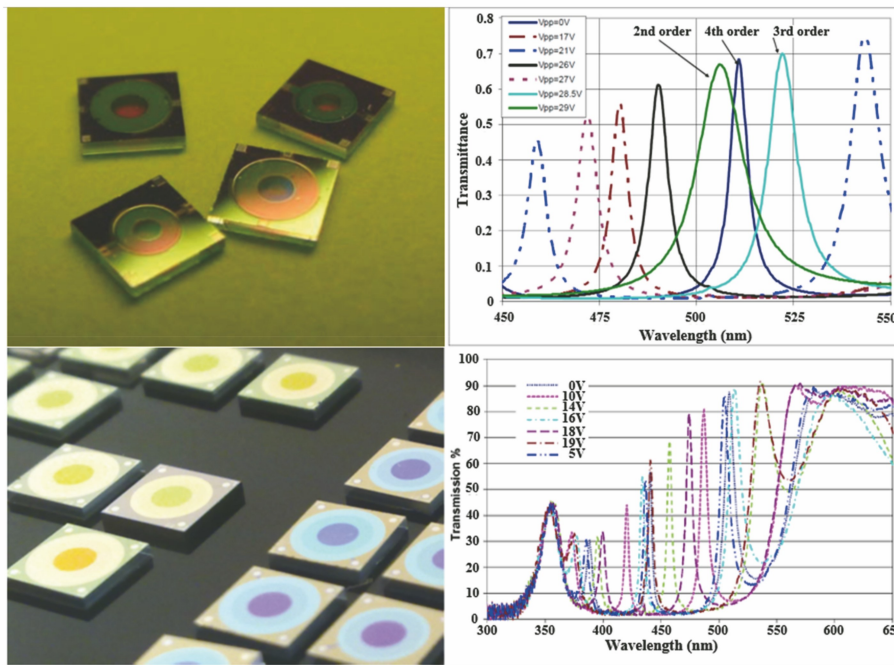


图 14 表面工艺制作的可见光 MEMS-FP 滤波芯片^[78]

Fig. 14 Surface-machined MEMS-FP filtering chip working in visible light^[78]

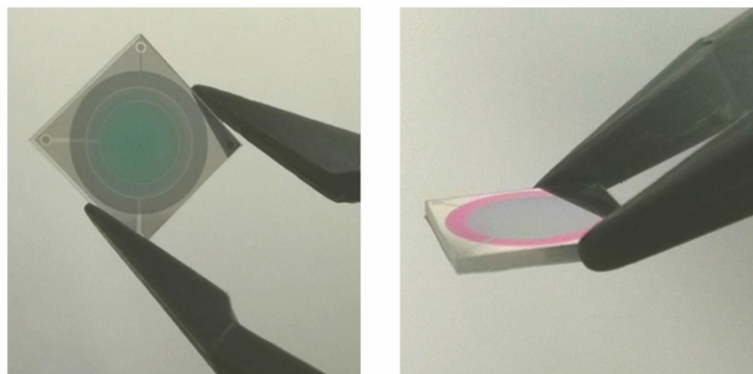


图 15 基于银反射镜的表面工艺 MEMS-FP 滤波芯片^[83]

Fig. 15 Surface-machined MEMS-FP filtering chip based on Ag mirror^[83]

孔径为 2 mm 和 3 mm,可覆盖 450~900 nm 的可见光和近红外波段。在 12.5 V 电压下 FP 腔可实现 318 nm 的移动距离,FWHM 为 11~20 nm,但

由于 Ag 膜的吸收作用,其透过率仅为 12%~45%^[83]。

VTT 开发的另外一种芯片是采用压电驱动技

术的 MEMS-FP 滤波芯片,其适用于加工大孔径芯片,因此主要用于光谱成像领域。关于压电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片的最早报道,是 2009 年 VTT 开发的一款用于无人机载光谱成像系统的可见光至

近红外波段的 MEMS-FP 滤波芯片。经过十余年发展,面向不同的光谱成像应用场景,VTT 已开发了覆盖紫外至近红外波段的 MEMS-FP 滤波芯片^[77],如图 16 所示。

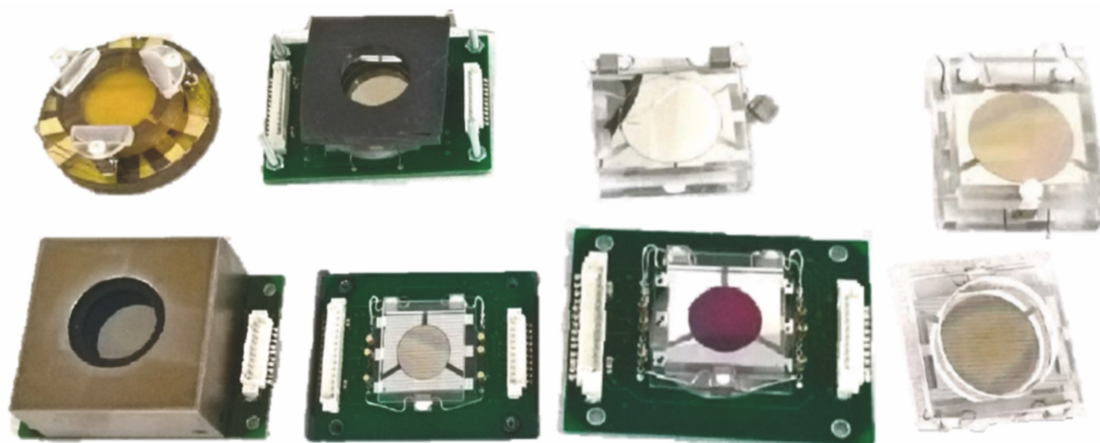


图 16 VTT 压电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片系列^[77]

Fig. 16 Piezo-actuated MEMS-FP filtering chip series developed by VTT^[77]

VTT 是将 MEMS-FP 滤波芯片投入实际应用较成熟的研究机构之一,基于其开发的两类滤波芯片,VTT 分别研制了搭载于无人机、手机和微小卫星等的小型化平台和手持式的微型光谱成像系统及光谱仪。2009 年,VTT 以其压电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片为核心,开发了一款搭载在无人机上的

微型光谱相机,如图 17 所示,将芯片置于光学透镜和 RGB 图像传感器之间,采用带通滤光片屏蔽冗余波段,通过特定机械装置和外壳封装构建了基本的光谱成像系统样机,采用特定的夹持装置将其固定在无人机机身上,从而可在 500~900 nm 波段实现光谱成像探测^[77, 84-86]。

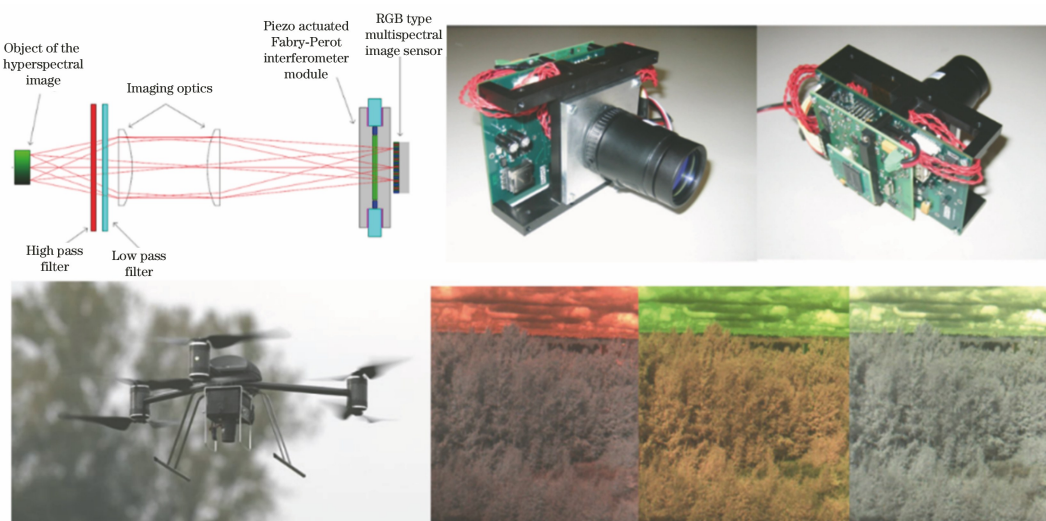


图 17 用于无人机(UAV)的光谱成像相机^[84-86]

Fig. 17 Spectral imager used for UAV^[84-86]

2015 年,VTT 开发了一款用于手机端的 CO₂ 气体传感器,其基本光学结构和实物如图 18 所示,由红外发射器、蓝宝石透镜、长波通滤光片、中波红外 MEMS-FP 滤波芯片和 PbSe 探测器组成,手机为 LG Nexus 5 型号。气体传感器安装在手机保护

壳外部,其控制模块安装在保护壳内部,采用蓝牙模式与手机端 APP 连接,在手机 APP 界面控制气体传感器工作并进行 CO₂ 浓度检测^[77,87]。

2016 年,VTT 以可见光 MEMS-FP 滤波芯片为核心,构建了一款用于 iPhone 5s 手机光谱成像

的小型化光谱成像模组^[88],如图 19 所示。这款光谱成像模组同样是将控制模块和光学模块置于手机外部,通过手机蓝牙功能控制光谱成像模组工作,主要工作波段为 450~550 nm,通过串联多个 MEMS-

FP 滤波芯片可拓宽光谱范围。这款光谱成像模组在工作波段内可实现较好的光谱成像效果,为未来移动电子设备与光谱成像或探测系统的集成提供了技术支持。

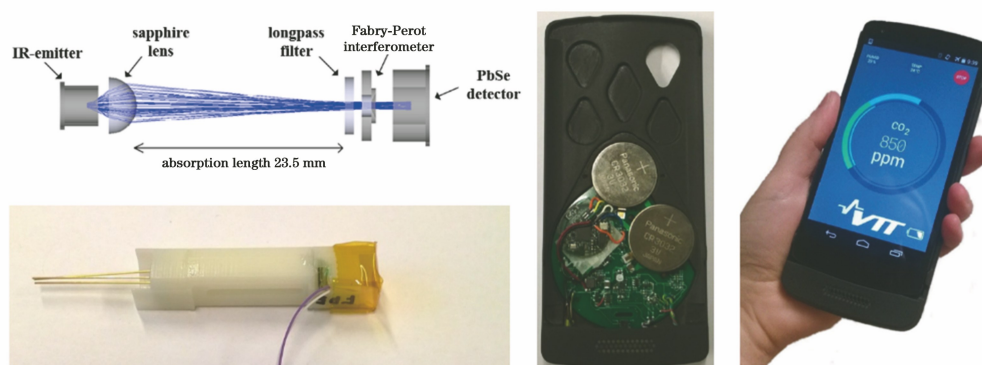


图 18 用于手机端气体探测的光谱传感器^[87]

Fig. 18 Spectral sensor for mobile gas detection^[87]

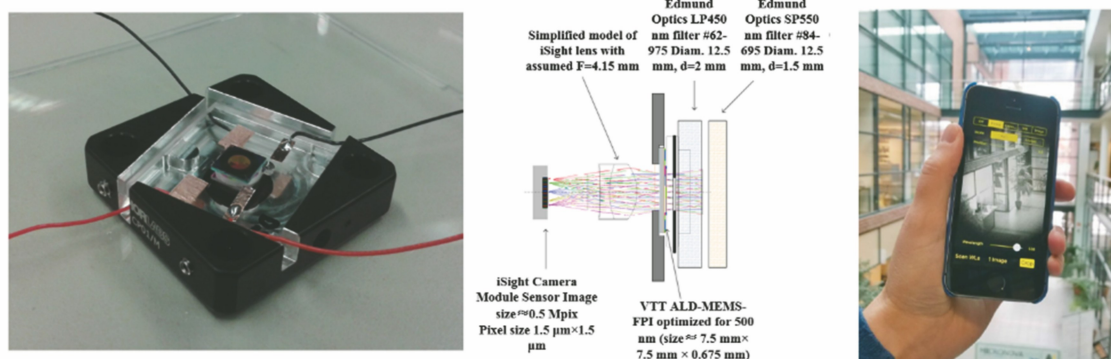


图 19 与 iPhone 5s 一体化集成的光谱成像模组^[88]

Fig. 19 Spectral imaging module assembled with iPhone 5s^[88]

VTT 在太空装备的设计、制造和测试领域中具有丰富的经验,曾多次参与欧洲航天局、欧盟、NASA 和俄罗斯太空计划的任务^[77]。2010 年, VTT 参与了由阿尔托大学、赫尔辛基大学和芬兰气象研究所联合提出的“Aalto-1 卫星计划”,旨在发射一颗包含在轨光谱成像、高能粒子探测和静电等离子体致动的多任务有效载荷的立方体微小卫星,卫星体积为 10 cm×10 cm×34 cm,质量约为 4 kg^[89-91]。VTT 主要为其设计微小型光谱成像系统 AaSI (Aalto Spectral Imager)^[92-93],如图 20 所示。AaSI 包含两个成像模块:光谱成像相机和可见光 RGB 相机。光谱成像相机采用的是压电驱动式 MEMS-FP 滤波芯片(500~900 nm),光谱分辨率为 10~15 nm,空间分辨率为 512 pixel×512 pixel,视场角为 10°×10°;可见光 RGB 相机的分辨率为 2480 pixel×1280 pixel,视场角为 15°×10°。制作完成的 AaSI 整机尺寸为 97 mm×97 mm×

48 mm,质量约为 600 g。Aalto-1 于 2017 年 6 月搭乘印度 PSLV-C38 火箭发射升空,进入距离地球 486~518 km 的椭圆形太阳同步轨道,其光谱成像相机可实现在轨 240~310 m 的对地观测分辨率。

2010 年,VTT 基于其无人机载微小型光谱相机设计经验,设计了一款手持式的显微光谱成像相机,如图 21(a)所示,其主要光学元件包含显微目镜、高/低带通滤波片、MEMS-FP 滤波芯片和 RGB 图像传感器,这款光谱相机的工作波段为 400~700 nm 可见光波段,成像分辨率为 480 pixel×750 pixel。由于采用压电驱动 MEMS-FP 滤波芯片,相机整体较大,尺寸为 50 mm×65 mm×140 mm,质量约为 350 g^[94]。为了减小尺寸和质量,2012 年 VTT 采用 1~2 mm 孔径的 MEMS-FP 滤波芯片,设计制作了一款微小型成像光谱仪,如图 21(b)所示,这款成像光谱仪的工作波段为 430~580 nm,以 20 欧元为目标,可实现明显的光谱成像

效果^[81, 95]。此外, VTT 还采用同样的技术设计了一款手持式的点源微型光谱仪, 其体积如钢笔大小, 如图 21(c) 所示。这类微小型的手持式光谱探测系

统有望在未来实现家庭便携式的食品安全检测、疾病诊疗和防伪鉴别等应用。

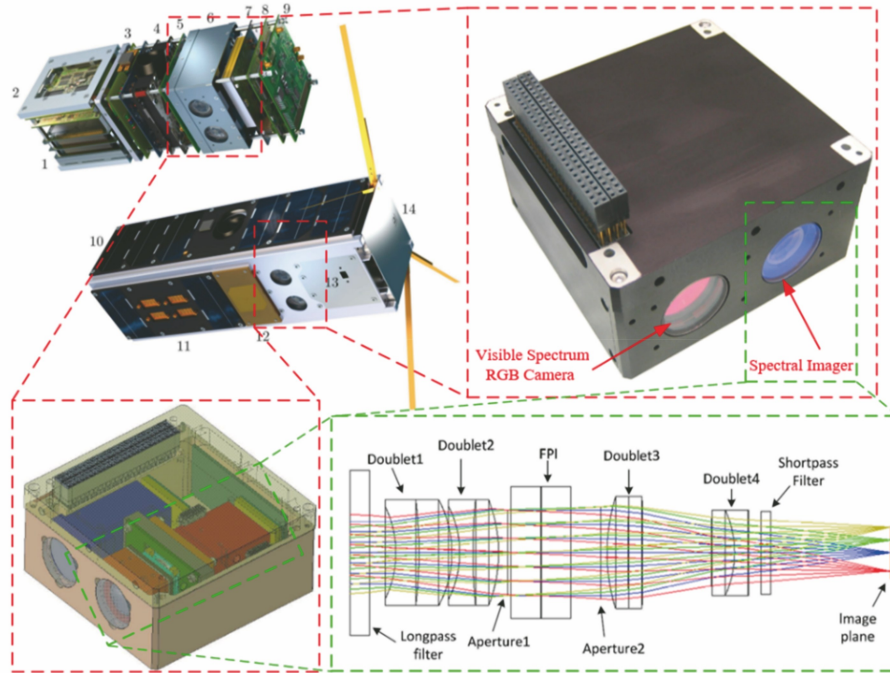


图 20 Aalto-1 立方卫星及其微小型光谱相机载荷 (AaSI)^[92-93]

Fig. 20 Aalto-1 cube nanosatellite and its miniaturized spectral imager payload (AaSI)^[92-93]

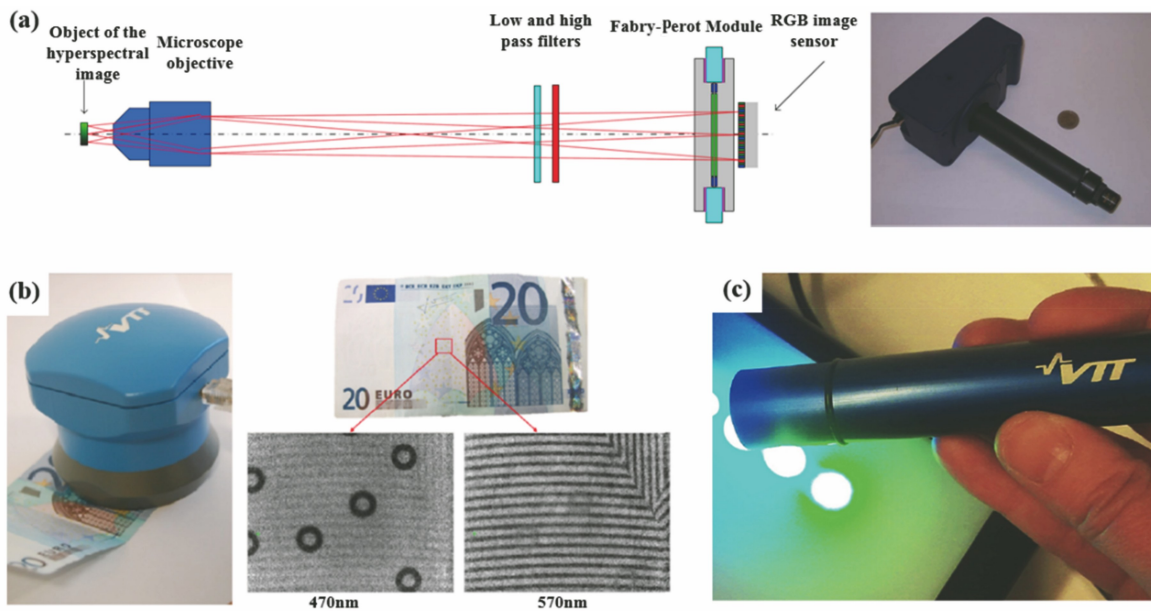


图 21 基于 MEMS-FP 滤波芯片的手持式光谱探测系统^[81]。(a)手持式光谱成像相机^[94];

(b)微小型成像光谱仪^[95]; (c)点源式微小型光谱仪

Fig. 21 Hand-held spectral detection systems based on MEMS-FP filtering chips^[81]. (a) Hand-held spectral imager^[94]; (b) miniaturized spectral imager^[95]; (c) point source type miniaturized spectrometer

4.4 国内

国内对于 MEMS-FP 滤波芯片的研究起步较晚, 且相关报道较少。2012 年, 中国科学院上海微

系统与信息技术研究所提出一种热驱动的 MEMS-FP 滤波芯片^[96], 如图 22(a) 所示, 通过热电阻改变硅的折射率, 从而改变透射光谱, 经测试可得这种热

驱动的 MEMS-FP 滤波芯片可实现 21.9 nm 的光谱调谐(FWHM 约为 0.29 nm),热响应时间约为 50 ms。2013 年,该所又基于 SOI 硅片键合工艺研制出一种 FP 腔与镜面驱动平板分离的 MEMS-FP 滤波芯片^[97],如图 22(b)所示,其有效光学孔径为 850 μm ,在 15 V 的驱动电压下可实现 40 nm 的光谱调谐。与通过改变 FP 腔实现调谐滤波的机制不同,华中科技大学研发了一种以液晶材料作为 FP 腔介质的电调红外 MEMS-FP 滤波芯片,利用液晶分子在电场下发生偏转导致液晶材料折射率发生变

化的原理实现可调滤波^[98],如图 22(c)所示。该器件在 19.8 V 的驱动电压下实现了 2.5~11.5 μm 范围内的光谱调谐,但出现了多级次滤波。2018 年,华中科技大学又研发了一款 128 \times 128 阵列的静电驱动 MEMS-FP 滤波芯片^[99],如图 22(d)所示,其单个器件尺寸为 80 $\mu\text{m}\times$ 80 μm ,在 8 V 的电压下可在 2.8~4.7 μm 范围内进行光谱调谐,FWHM 约为 364 nm。国内以上相关研究大都停留在器件层面,器件性能较难满足光谱探测的应用需求。

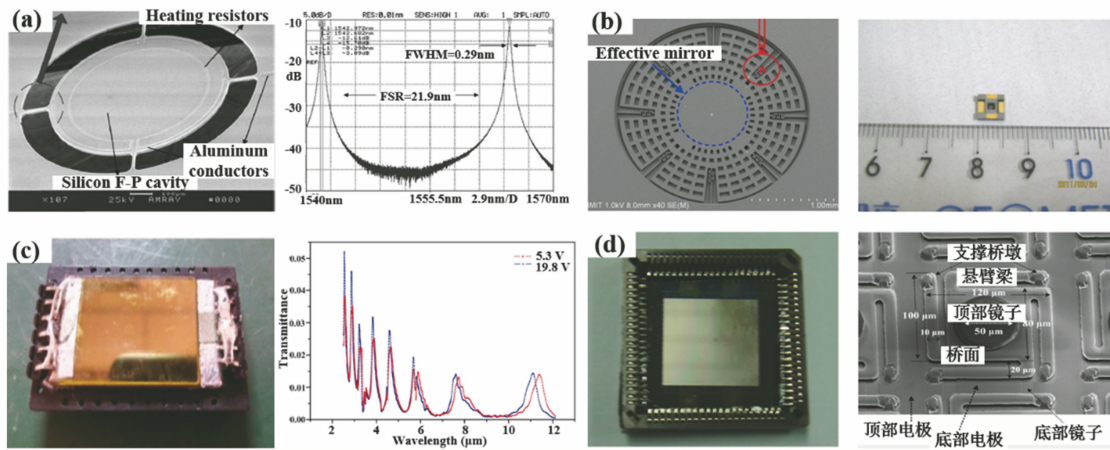


图 22 国内不同研究机构研发的 MEMS-FP 滤波芯片。(a)(b)中国科学院上海微系统与信息技术研究所^[96-97];
(c)(d)华中科技大学^[98-99]

Fig. 22 MEMS-FP filtering chips developed by domestic different research institutes. (a)(b) Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences^[96-97]; (c)(d) Huazhong University of Science and Technology^[98-99]

近年来,西北工业大学虞益挺教授课题组面向典型场景光谱探测应用,开发了两款大孔径电磁驱动 MEMS-FP 滤波芯片,分别将其应用在可见光波段(6 mm 孔径)和长波红外波段(10 mm 孔径),如图 23(a)和(b)所示,两种芯片可在较小的驱动电流

下实现双向调谐,其中长波红外 MEMS-FP 滤波芯片在-600~600 mA 的驱动电流下可实现 7.5~12.5 μm 的大范围光谱调谐。基于以上两款 MEMS-FP 滤波芯片,分别构建了两款微小型动态可调光谱成像样机,其已在实际的场景中进行了有

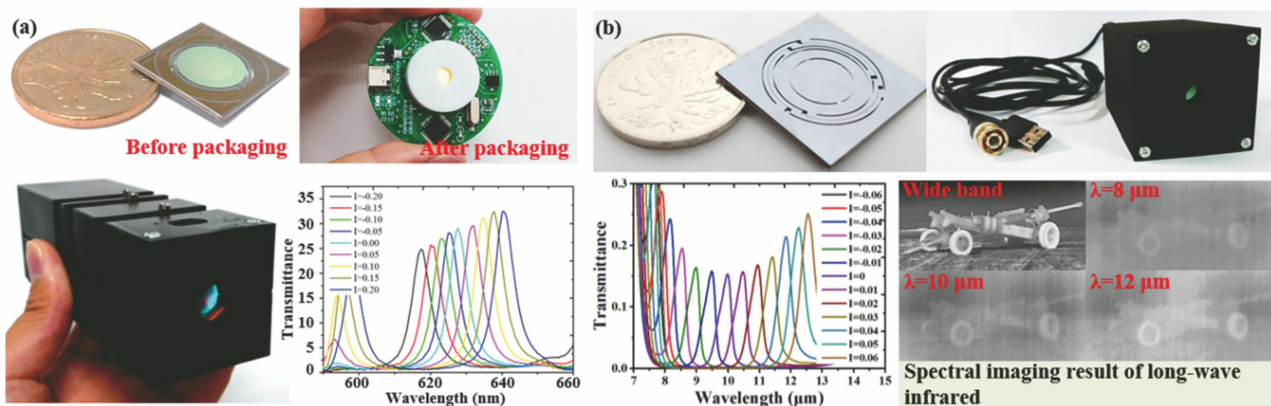


图 23 西北工业大学开发的不同波段电磁驱动 MEMS-FP 滤波芯片及微小型光谱成像相机。(a)可见光波段;(b)长波红外波段
Fig. 23 Electromagnetic actuation MEMS-FP filtering chips and miniature spectral imagers applied to different wavebands developed by Northwestern Polytechnical University. (a) Visible light waveband;(b) long-wave infrared waveband

效的光谱成像应用验证。

5 目前存在的问题

多光束干涉及其他相关的理论目前已发展得很成熟,现代光学设计方法也日趋先进。然而,目前却鲜有理想的 MEMS-FP 滤波芯片被制作出来,其最主要的原因是材料选择有限、加工方法有限和加工误差难以避免。

5.1 MEMS-FP 滤波芯片的材料局限

用于 MEMS-FP 滤波芯片的基底材料至关重要,其直接决定了器件能否加工成功和最终的性能上限。采用表面加工技术制作 MEMS-FP 滤波芯片时无需对基底材料进行去除,仅需考虑基底在工作波段的本征透过率。而采用体加工技术制作 MEMS-FP 滤波芯片时不仅需考虑基底材料的适用波段及其本征透过率,还要考虑基底的加工性。

图 24 所示为部分光学材料的透射波段和红外透过率曲线。MEMS 领域最常用的基底是硅,已形成完善的加工体系,因此常采用体加工技术制作 MEMS-FP 滤波芯片的可动镜体。硅晶圆的透过率主要受掺杂浓度的影响,掺杂浓度越低(电阻率越高),透过率越高,最大透过率在 50%~55%之间,因此低掺杂的硅晶圆可作为短波和中波红外

MEMS-FP 滤波芯片的基底。但在长波红外波段,采用直拉法制作的硅晶圆(CZ-Si)由于含氧量较高,在 9 μm 处有较强的吸收峰,无法作为长波红外 MEMS-FP 滤波芯片的基底。采用区熔法制作的硅晶圆(FZ-Si)可降低含氧量、消除吸收峰,现已有部分长波红外 MEMS-FP 滤波芯片采用区熔硅基底制得^[100]。此外,由于硅晶圆本征光学透过率不高,器件的最终透过率将受到限制,因此采用硅晶圆制作 MEMS-FP 滤波芯片时可采用刻蚀方法将通光孔部位的硅基底进行减薄或移除^[62,74]。

当采用表面工艺制作 MEMS-FP 滤波芯片时,可选用的材料相对广泛。在现有红外光学材料中,透过率较高的为 ZnS 和 ZnSe 基底,其透过率可达 70%以上,是良好的红外基底材料。在可见光和近红外波段,光学透过率较高的基底为石英和玻璃,其透过率通常可达 90%以上。玻璃基底广泛用于光学 MEMS 器件的加工中,如 Corning Pyrex、Schott Borofloat 系列,部分型号可直接与硅片进行硅键合。因此基于表面工艺的 MEMS-FP 滤波芯片的基底可选用此类透过率较高的材料,基于体加工技术制作 MEMS-FP 滤波芯片的固定镜基底时也可选用此类材料。

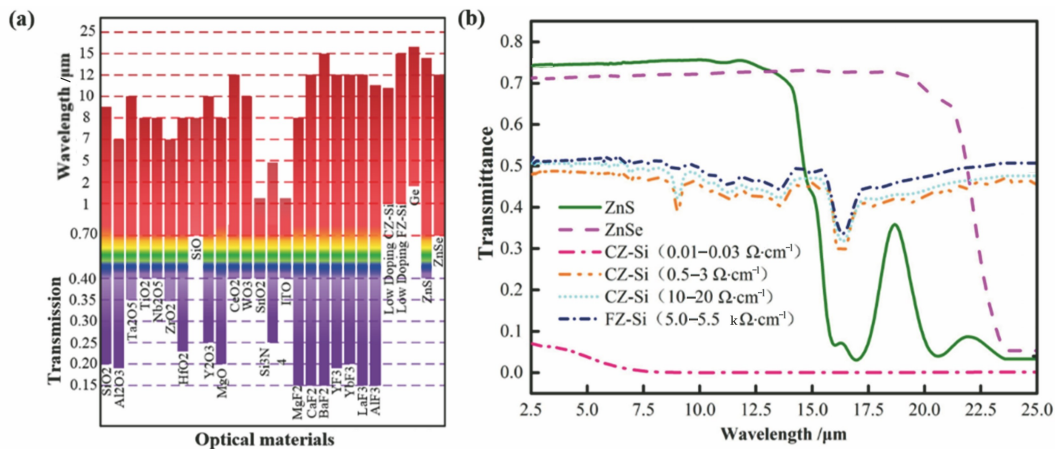


图 24 常见的光学材料及其特性。(a)透射区间;(b)典型红外光学材料的透过率曲线

Fig. 24 Common optical materials and their properties. (a) Transmission range; (b) transmittance of typical infrared optical materials

5.2 MEMS-FP 滤波芯片加工方法的局限

目前, MEMS-FP 滤波芯片所采用的 MEMS 加工技术主要源于集成电路(IC)工艺,且主要以硅基为主。作为现在主流 IC 工艺,互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺已实现标准化,其采用的薄膜技术也日臻成熟,但由于薄膜残余应力的影响,相关的表面加工技术很难应用于大孔径 MEMS-FP 滤波芯

片的加工,且器件性能受到很大的限制。MEMS 工艺的出现大大促进了体硅工艺的发展,但基于 MEMS 体加工技术的器件往往自身外力敏感性较高,需增加基底厚度以提高结构刚度。此外,现有的硅基 MEMS 加工技术在一定程度上限制了 MEMS-FP 滤波芯片的设计灵活性和性能,用于特定波段的高性能基底和薄膜材料往往难以全部兼容

到传统的 MEMS 工艺线中,因此主要以非标准的高度定制化加工为主,这限制了 MEMS-FP 滤波芯片的高效加工。

MEMS-FP 滤波芯片的加工过程涉及光刻、镀膜和刻蚀等工艺,加工结果会受到各工艺步骤中的方法、参数和材料等因素的影响,最终直接或间接地反映到 FP 腔和镜面质量上。FP 腔和反射镜面是实现芯片滤波的最重要功能结构,两者的质量是能否实现均匀可控滤波的关键,理想的 MEMS-FP 滤波芯片具有平行的标准长度 FP 腔、平整光滑的反射镜面。因此,FP 腔和镜面质量的加工控制技术是制造高性能滤波芯片的关键点和难点。

FP 腔滤波效果的主要影响因素包括 FP 腔长度、镜面倾斜度、镜面弯曲和微观粗糙度。FP 腔长度对滤波效果的影响主要在于:腔长大于或小于设计值时,会导致中心波长产生偏移,这限制了芯片的调谐范围;MEMS-FP 滤波芯片两镜面不平行(倾斜、弯曲等)和微观表面粗糙时,会影响半峰全宽 FWHM、自由谱范围 FSR 和精细因子 F 等关键性能,其具体的影响机理已有完善的数值方法进行描述^[48,101]。

因此,提高加工质量、降低残余应力是获得性能良好的 MEMS-FP 滤波芯片的关键。首先,需选用高平整度的基底,通常其平整度要求标准为 $\lambda/20$ ^[66],以减小基底本身的影响。现有 MEMS-FP 滤波芯片的反射镜通常采用蒸发镀膜方法(镀膜方向性较好)结合溶脱剥离工艺制作而成,其成膜均匀性较差、成膜密度较低,因此镜面微观粗糙度较大,影响

器件最终性能。为了提高成膜质量,VTT 采用 ALD 方法制作反射镜,并开发低温 ALD 镀膜工艺,以降低薄膜热应力^[80],但 ALD 受本身工艺特点的限制,沉积速率较慢,因此加工效率较低。此外,MEMS-FP 滤波芯片的可动结构制作好后通常会存在加工应力,造成镜面不平行或影响驱动范围,可采取增大基底厚度和薄膜应力补偿的方法以减小加工应力的影响^[100]。

6 未来发展趋势

6.1 新型 MEMS-FP 滤波芯片的发展趋势

纵观 MEMS-FP 滤波芯片的发展历史,虽然国内外对其研究已历时三十余年,能满足实际光谱探测使用要求的各方面性能良好的器件却仍是少之又少。随着探测目标多样化、复杂化和隐蔽化的发展,以及超光谱成像概念的提出,实际应用对 MEMS-FP 滤波芯片的各方面性能提出更高的要求。因此,如何制作高性能的 MEMS-FP 滤波芯片仍然是今后一段时间研究人员研究的重点和难点问题。

近些年,一些基于新材料的 MEMS-FP 滤波芯片逐渐崭露头角,其中相变材料的发展为 MEMS-FP 滤波芯片的设计和制造提供了新的方法和思路^[102]。根据(1)式,基于相变材料的 MEMS-FP 滤波芯片的工作原理为:当 FP 腔间距不变时,通过热或电激励方法改变相变材料的分子序列,进而实现折射率变化,因此该方法可进行光谱调制,目前已有报道采用 As_2S_3 ^[103] 和 GST(GeSbTe)^[104-105] 材料制作的 MEMS-FP 滤波芯片。图 25(a)和(b)所示为

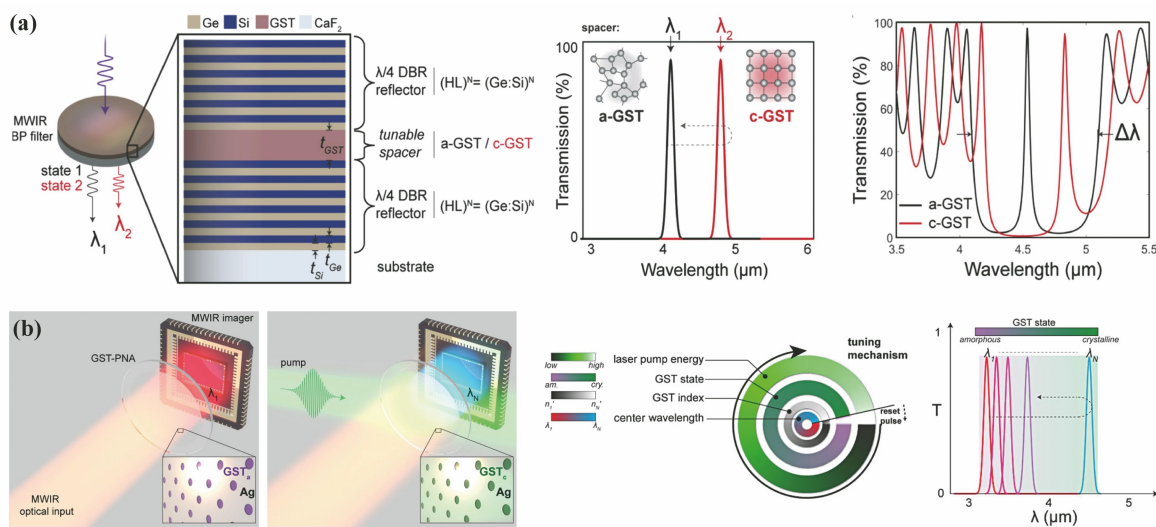


图 25 基于 GST 相变材料的 MEMS-FP 滤波结构。(a)FP 可调滤波结构^[104]; (b)金属超表面滤波结构^[105]
 Fig. 25 MEMS-FP filtering structures based on GST phase-change material. (a) FP tunable filtering structure^[104]; (b) metasurface filtering structure^[105]

采用 GST 材料制作的 FP 可调滤波结构和金属超表面滤波结构,在外部能量的激励下,GTS 膜层折射率改变,从而实现可调滤波。基于相变材料的 MEMS-FP 滤波芯片有望解决传统 MEMS-FP 滤波芯片制作过程中存在的大孔径芯片制造难、残余应力、加工误差等问题。

6.2 基于 MEMS-FP 滤波芯片的光谱智能识别系统

随着 5G 时代智慧城市、智慧地球概念的提出,基于光谱探测技术的智能识别将在人工智能系统中发挥不可或缺的作用。光谱探测系统在智能系统中将发挥“火眼金睛”的作用,传统的探测模式无法满足探测目标多样化、数据海量、处理快速化和识别智能化的需求。在未来,基于 MEMS-FP 滤波芯片的微型光谱探测系统将融合边缘计算、深度学习、机器视觉和物联网等技术^[106-107],组成光谱智能识别系统,实现在各个不同应用场景中的自主探测和智慧识别。

参 考 文 献

- [1] Garini Y, Young I T, McNamara G. Spectral imaging: principles and applications[J]. *Cytometry Part A*, 2006, 69(8): 735-747.
- [2] Guainazzi M, Osuna P. Astronomical spectroscopy and virtual observatory [J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2008, 128(3): 389-396.
- [3] Aichi H, Fouad Y, Chabaane Z L, et al. Soil total carbon mapping, in Djerid Arid area, using ASTER multispectral remote sensing data combined with laboratory spectral proximal sensing data [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(5): 1-12.
- [4] Li G L, Deng H, Liu Q C, et al. Terahertz characteristic absorption spectral analysis of metronidazole [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 173001.
李桂琳, 邓琥, 刘泉澄, 等. 甲硝唑的太赫兹特征吸收光谱分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 173001.
- [5] Rao L B, Pang T, Ji R S, et al. Firmness detection for apples based on hyperspectral imaging technology combined with stack autoencoder-extreme learning machine method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 113001.
饶利波, 庞涛, 纪然仕, 等. 基于高光谱成像技术结合堆栈自动编码器-极限学习机方法的苹果硬度检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 113001.
- [6] Liu D, Zeng X A, Sun D W. Recent developments and applications of hyperspectral imaging for quality evaluation of agricultural products: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(12): 1744-1757.
- [7] He H J, Sun D W. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 46(1): 99-109.
- [8] Gao S, Wang Q H, Fu D D, et al. Nondestructive detection of sugar content and firmness of red globe grape by hyperspectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1030004.
高升, 王巧华, 付丹丹, 等. 红提糖度和硬度的高光谱成像无损检测[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1030004.
- [9] Li C L, Liu C Y, Jin J, et al. Spectral measurement of minerals and gases based on airborne thermal-infrared hyperspectral imaging system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 767-777.
李春来, 刘成玉, 金健, 等. 热红外高光谱成像仪 (ATHIS)对矿物和气体的实验室光谱测量[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(6): 767-777.
- [10] Kirsch M, Lorenz S, Zimmermann R, et al. Integration of terrestrial and drone-borne hyperspectral and photogrammetric sensing methods for exploration mapping and mining monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1366.
- [11] Han Z Z, Wan J H, Li Y P, et al. Detection method of marine oil spilling and emulsified oil based on hyperspectral imaging under UV induction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0130002.
韩仲志, 万剑华, 李永平, 等. 紫外诱导高光谱成像的海洋溢油及乳化探测方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0130002.
- [12] Ozturk S, Artan Y, Esin Y E, et al. Semi-supervised gas detection in hyperspectral imaging [C] // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 26-31, 2015, Milan, Italy. New York: IEEE Press, 2015: 469-472.
- [13] Chen J W, Gong H, Yuan J. Multispectral imaging technology and its applications in biomedicine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0400001.
陈键伟, 龚辉, 袁菁. 多光谱成像技术及其在生物医学中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0400001.
- [14] Clancy N T, Jones G, Maier-Hein L, et al. Surgical spectral imaging [J]. *Medical Image Analysis*,

- 2020, 63: 101699.
- [15] He H, Yan S, Lyu D Y, et al. Deep learning for biospectroscopy and biospectral imaging: state-of-the-art and perspectives[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(8): 3653-3665.
- [16] Chang H, Koschan A, Abidi M, et al. Multispectral visible and infrared imaging for face recognition [C] // 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 23-28, 2008, Anchorage, AK. New York: IEEE Press, 2008: 10104386.
- [17] Zhao J W, Hui Z, Huang L, et al. Quantitative detection of TVB-N content in chicken meat with hyperspectral imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 073003.
赵杰文, 惠喆, 黄林, 等. 高光谱成像技术检测鸡肉中挥发性盐基氮含量[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 073003.
- [18] Chen Q, Yang Z C, Sun Y, et al. Research on identification of the authenticity of currency by fluorescence spectral imaging [J]. *Forensic Science and Technology*, 2012(2): 16-21.
陈强, 杨志超, 孙阳, 等. 发光光谱成像检验人民币真伪研究[J]. *刑事技术*, 2012(2): 16-21.
- [19] Makki I, Younes R, Francis C, et al. A survey of landmine detection using hyperspectral imaging[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 124: 40-53.
- [20] Tiwari K C, Arora M K, Singh D. An assessment of independent component analysis for detection of military targets from hyperspectral images [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(5): 730-740.
- [21] Yang S, Song Z Y, Yuan H Y, et al. Fast high-order matched filter for hyperspectral image target detection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 94: 151-155.
- [22] Shimoni M, Haelterman R, Perneel C. Hyperspectral imaging for military and security applications: combining myriad processing and sensing techniques [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(2): 101-117.
- [23] Ke C. Military object detection using multiple information extracted from hyperspectral imagery [C] // 2017 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), December 15-17, 2017, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2017: 124-128.
- [24] Farrell M D, Mersereau R M. On the impact of PCA dimension reduction for hyperspectral detection of difficult targets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 192-195.
- [25] Jia J X, Wang Y M, Chen J S, et al. Status and application of advanced airborne hyperspectral imaging technology: a review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103115.
- [26] Sellar R G, Boreman G D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(1): 013602.
- [27] Brazile J, Neville R A, Staenz K, et al. Scene-based spectral response function shape discernibility for the APEX imaging spectrometer [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(3): 414-418.
- [28] Xue Q S, Tian Z T, Yang B, et al. Underwater hyperspectral imaging system using a prism-grating-prism structure[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): 894-900.
- [29] Wen M X, Wang Y M, Yao Y, et al. Design and performance of curved prism-based mid-wave infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95: 5-11.
- [30] Protopopov V. Imaging Fourier spectrometer in visible domain: design concept[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(21): 6252-6264.
- [31] Naik D N, Pedrini G, Takeda M, et al. Spectrally resolved incoherent holography: 3D spatial and spectral imaging using a Mach-Zehnder radial-shearing interferometer[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1857-1860.
- [32] Shen H L, Zou Z, Zhu Y F, et al. Block-based multispectral image registration with application to spectral color measurement [J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 46-54.
- [33] He Z P, Wang B Y, Lü G, et al. Operating principles and detection characteristics of the visible and near-infrared imaging spectrometer in the Chang'e-3[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1567-1577.
- [34] He Z P, Wang B Y, Lü G, et al. Visible and near-infrared imaging spectrometer and its preliminary results from the Chang'e 3 project[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 083104.
- [35] Joshi P. Advances in development of MOEMS devices: a review[J]. *HELIX*, 2019, 9(6): 5868-5873.
- [36] Martinez J A, Liu T, Panepucci R R. Micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS) for microstructure manipulation and optical characterization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6645: 664525.

- [37] Ollier E, Mottier P L. Micro-opto-electro-mechanical systems: recent developments and LETI's activities [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4075: 12-21.
- [38] Xiong K L, Tordera D, Emilsson G, et al. Switchable plasmonic metasurfaces with high chromaticity containing only abundant metals [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(11): 7033-7039.
- [39] Kaplan A F, Xu T, Guo L J. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(14): 143111.
- [40] Greybush N J, Liberal I, Malassis L, et al. Plasmon resonances in self-assembled two-dimensional Au nanocrystal metamolecules [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(3): 2917-2927.
- [41] Zhao J C, Qiu M, Yu X C, et al. Defining deep-subwavelength-resolution, wide-color-gamut, and large-viewing-angle flexible subtractive colors with an ultrathin asymmetric Fabry-Perot lossy cavity [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(23): 1900646.
- [42] Yu Y T, Yuan W Z, Sun R K, et al. A strategy to efficiently extend the change rate of period for comb-drive micromechanical pitch-tunable gratings [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(5): 1180-1185.
- [43] Ebermann M, Neumann N, Hoppe S, et al. Tiny mid- and long-wave infrared spectrometer module with a MEMS dual-band Fabry-Pérot filter [C] // *Proceedings IRS² 2011*, June 7-9, 2011, Nürnberg, Germany. Nürnberg: AMA Association for Sensors and Measurement, 2011: 94-99.
- [44] Atherton P D, Reay N K, Ring J, et al. Tunable Fabry-Perot filters [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(6): 206806.
- [45] Mallinson S R, Jerman J H. Miniature micromachined Fabry-Perot interferometers in silicon [J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(20): 1041-1043.
- [46] Vaughan J M. *The Fabry-Perot interferometer: history, theory, practice and applications* [M]. Boca Raton: Routledge, 2017.
- [47] Ebermann M, Neumann N, Hiller K, et al. Tunable MEMS Fabry-Pérot filters for infrared microspectrometers: a review [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9760: 97600H.
- [48] Schuler L P, Milne J S, Dell J M, et al. MEMS-based microspectrometer technologies for NIR and MIR wavelengths [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(13): 133001.
- [49] Cheng J, Zhe J, Wu X T. Analytical and finite element model pull-in study of rigid and deformable electrostatic microactuators [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(1): 57-68.
- [50] Milne J, Dell J, Keating A, et al. Extended tuning range Fabry-Perot etalon with doubly-supported beam actuators [C] // *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Their Applications Conference*, 2006, August 21-24, 2006, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2006: 134-135.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Amano T, Koyama F, Hino T, et al. Design and fabrication of GaAs-GaAlAs micromachined tunable filter with thermal strain control [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(3): 596-601.
- [54] Lee H K, Kim K S, Yoon E. A wide-range linearly tunable optical filter using Lorentz force [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(9): 2087-2089.
- [55] Wolffenbuttel R F. State-of-the-art in integrated optical microspectrometers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(1): 197-202.
- [56] Garmire E. Theory of quarter-wave-stack dielectric mirrors used in a thin Fabry-Perot filter [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(27): 5442-5449.
- [57] Cho Y J, Cho H M, Lee Y W, et al. Optical characterization of silicon dioxide layers grown on silicon under different growth conditions [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 313/314: 292-297.
- [58] Sandner T, Kenda A, Drabe C, et al. Miniaturized FTIR-spectrometer based on an optical MEMS translatory actuator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6466: 646602.
- [59] Kerber M, Dick B, Fralick M, et al. Design of highly reflective subwavelength diffraction gratings for use in a tunable spectrometer [C] // *SENSORS*, 2009 IEEE, October 25-28, 2009, Christchurch, New Zealand. New York: IEEE Press, 2009: 1984-1987.
- [60] Ho C P, Pitchappa P, Kropelnicki P, et al.

- Characterization of polycrystalline silicon-based photonic crystal-suspended membrane for high temperature applications [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2014, 8(1): 084096.
- [61] Chadha A S, Zhao D Y, Chuwongin S, et al. Polarization- and angle-dependent characteristics in two dimensional photonic crystal membrane reflectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(21): 211107.
- [62] Mott D B, Barclay R B, Bier A, et al. Micromachined tunable Fabry-Perot filters for infrared astronomy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4841: 578-585.
- [63] Palmer J A, Hsieh W T, Quijada M, et al. Design, characterization, and control of a large aperture MOEMS Fabry-Perot tunable infrared filter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6114: 61140G.
- [64] Gupta N, Tan S S, Zander D R. MEMS-based tunable Fabry-Perot filters [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8032: 803205.
- [65] Gupta N, Tan S S. Spectral imaging characterization of quartz MOEM tunable Fabry-Perot filter[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, 11(3): 033002.
- [66] Gupta N, Tan S S, Zander D R. Microelectromechanical systems-based visible-near infrared Fabry-Perot tunable filters using quartz substrate[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 074007.
- [67] 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.
- [68] Neumann N, Ebermann M, Kurth S, et al. Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter [J]. *Journal of Microlithography Microfabrication & Microsystems*, 2008, 7(2): 021004.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] Meinig M, Kurth S, Hiller K, et al. Tunable mid-infrared filter based on Fabry-Perot interferometer with two movable reflectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7930: 79300K.
- [72] 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.
- [73] Helke C, Meinig M, Seifert M, et al. VIS Fabry-Pérot-interferometer with $(\text{HL})_4$ PE-Si₃N₄/PE-SiO₂ reflectors on freestanding LP-Si₃N₄ membranes for surface enhanced Raman spectroscopy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9760: 97600I.
- [74] Helke C, Hiller K, Seiler J, et al. VIS Fabry-Pérot Interferometer with structured $(\text{TiO}_2/\text{PE-SiO}_2)^3$ Bragg-reflectors on 5 mm large LP-Si₃N₄ membranes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10931: 109310Q.
- [75] Helke C, Hiller K, Werner T, et al. Large-scale fabrication of LP-CVD Si₃N₄ photonic crystal structures as freestanding reflectors with 1 mm aperture for Fabry-Pérot interferometers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10354: 1035403.
- [76] Blomberg M, Torkkeli A, Lehto A, et al. Electrically tuneable micromachined Fabry-Perot interferometer in gas analysis[J]. *Physica Scripta*, 1997, T69: 119-121.
- [77] Rissanen A, Guo B, Saari H, et al. VTT's Fabry-Perot interferometer technologies for hyperspectral imaging and mobile sensing applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10116: 101160I.
- [78] Blomberg M, Kattelus H, Miranto A. Electrically tunable surface micromachined Fabry-Perot interferometer for visible light [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1(1): 552-555.
- [79] Puurunen R L, Saari lahti J, Kattelus H. Implementing ALD layers in MEMS processing[J]. *ECS Transactions*, 2019, 11(7): 3-14.
- [80] Rissanen A, Puurunen R L. Use of ALD thin film Bragg mirror stacks in tuneable visible light MEMS Fabry-Perot interferometers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8249: 82491A.
- [81] Rissanen A, Akujärvi A, Antila J E, et al. MOEMS miniature spectrometers using tuneable Fabry-Perot interferometers [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, 11(2): 023003.
- [82] Rissanen A, Langner A, Viherkanto K H, et al. Large-aperture MOEMS Fabry-Perot interferometer for miniaturized spectral imagers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9375: 93570J.
- [83] Guo B, Näsilä A, Trops R, et al. Wide-band large-aperture Ag surface-micro-machined MEMS Fabry-

- Perot interferometers (AgMFPIs) for miniaturized hyperspectral imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10545: 105450U.
- [84] Jussi M. A lightweight hyperspectral imager [D]. Finland: Helsinki University of Technology, 2009.
- [85] Saari H, Aallos V V, Holmlund C, et al. Novel hyperspectral imager for lightweight UAVs [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7668: 766805.
- [86] Saari H, Aallos V V, Akujärvi A, et al. Novel miniaturized hyperspectral sensor for UAV and space applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7474: 74741M.
- [87] 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.
- [88] Rissanen A, Saari H, Rainio K, et al. MEMS FPI-based smartphone hyperspectral imager [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9855: 985507.
- [89] Kestilä A, Tikka T, Peitso P, et al. Aalto-1 nanosatellite-technical description and mission objectives [J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2013, 2(1): 121-130.
- [90] Praks J, Kestilä A, Niemelä P, et al. Aalto-1 nanosatellite mission status and initial observations [EB/OL]. [2021-08-03]. https://www.researchgate.net/publication/322251443_Aalto-1_nanosatellite_mission_status_and_initial_observations.
- [91] Praks J, Mughal M R, Vainio R, et al. Aalto-1, multi-payload CubeSat: design, integration and launch [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 187: 370-383.
- [92] 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.
- [93] Mannila R, Näsälä A, Praks J, et al. Miniaturized spectral imager for Aalto-1 nanosatellite [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8176: 817628.
- [94] Saari H, Aallos V V, Holmlund C, et al. Handheld hyperspectral imager [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7680: 76800D.
- [95] Anttila 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.
- [96] Li S H, Zhong S L, Xu J, et al. Fabrication and characterization of a thermal tunable bulk-micromachined optical filter [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 188: 298-304.
- [97] Zhai L Y, Xu J, Wu Y M. Design and fabrication of independent-cavity FP tunable filter [J]. *Optics Communications*, 2013, 297: 154-164.
- [98] Liu K, Li H, Zhang X Y, et al. Development and characterization of an electrically tunable liquid-crystal Fabry-Pérot hyperspectral imaging device [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053539.
- [99] Meng Q H. Design and fabrication of the F-P cavity tunable infrared filter with 128×128 array based on MEMS technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. 蒙庆华. 基于 MEMS 技术的 128×128 阵列 F-P 腔可调谐红外滤波器设计与制备研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [100] Mao H F, Silva K K M B D, Martyniuk M, et al. Ge/ZnS-based micromachined Fabry-Perot filters for optical MEMS in the longwave infrared [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(6): 2109-2116.
- [101] Velicu S, Buurma C, Bergeson J D, et al. Miniaturized imaging spectrometer based on Fabry-Perot MOEMS filters and HgCdTe infrared focal plane arrays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9100: 91000F.
- [102] Hosseini P, Wright C D, Bhaskaran H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films [J]. *Nature*, 2014, 511(7508): 206-211.
- [103] Bourgade A, Lumeau J. Large aperture, highly uniform narrow bandpass Fabry-Perot filter using photosensitive As_2S_3 thin films [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 351-354.
- [104] Williams C, Hong N, Julian M, et al. Tunable mid-wave infrared Fabry-Perot bandpass filters using phase-change GeSbTe [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10583-10594.
- [105] Julian M N, Williams C, Borg S, et al. Reversible optical tuning of GeSbTe phase-change metasurface spectral filters for mid-wave infrared imaging [J]. *Optica*, 2020, 7(7): 746-754.
- [106] Manifold B, Men S, Hu R, et al. A versatile deep learning architecture for classification and label-free prediction of hyperspectral images [J]. *Nature Machine Intelligence*, 2021, 3: 306-315.
- [107] Liu P, Zhang H, Eom K B. Active deep learning for classification of hyperspectral images [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(2): 712-724.