

## 片上光谱成像系统研究进展及应用综述

王飞<sup>1,2,3,4</sup>, 余晓畅<sup>1,2,3,4</sup>, 罗青伶<sup>5</sup>, 周晨阳<sup>5</sup>, 虞益挺<sup>1,2,3,4,6\*</sup><sup>1</sup>西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057;<sup>2</sup>西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072;<sup>3</sup>西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;<sup>4</sup>西北工业大学陕西省微纳机电系统重点实验室, 陕西 西安 710072;<sup>5</sup>西北工业大学教育实验学院, 陕西 西安 710072;<sup>6</sup>西北工业大学宁波研究院, 浙江 宁波 315103

**摘要** 片上光谱成像系统具有结构紧凑、轻量便携等诸多优点,可灵活搭载于无人机、立方星等平台,具有广阔的应用前景。本文综述了近年来片上光谱成像系统的研究进展及应用情况,梳理了片上光谱成像系统的分光原理、集成方式,展示了片上光谱成像系统在生物医疗、环境监测、军事装备和智能消费电子等领域的应用前景,揭示了片上光谱成像系统目前所面临的挑战和未来发展方向。

**关键词** 集成光学; 片上光谱成像系统; 分光原理; 集成方式

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2000002

## Research Progress and Applications of Spectral Imaging System on Chip

Wang Fei<sup>1,2,3,4</sup>, Yu Xiaochang<sup>1,2,3,4</sup>, Luo Qingling<sup>5</sup>, Zhou Chengyang<sup>5</sup>, Yu Yiting<sup>1,2,3,4,6\*</sup><sup>1</sup>Shenzhen Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen, Guangdong 518057, China;<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;<sup>4</sup>Key Laboratory of Micro- and Nano-Electro-Mechanical Systems of Shaanxi Province, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;<sup>5</sup>Honors College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;<sup>6</sup>Ningbo Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo, Zhejiang 315103, China

**Abstract** The spectral imaging system on chip has many advantages, such as compact structure, light weight and portability. It can be flexibly mounted on unmanned aerial vehicle and cubic star platform, showing broad application prospects. This paper reviews the research progress and applications of spectral imaging system on chip in recent years, also summarizes the spectrum achieving principle and integration mode of chip-scale spectral imaging system. In addition, some key applications of spectral imaging system on chip in biomedical, environmental monitoring, military equipment, intelligent consumer electronics and other fields are shown in the paper. This paper reveals that the on-chip spectral imaging system is currently facing challenges and development direction in the future.

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2020-12-17; 录用日期: 2021-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(51975483)、中央高校基本科研业务费项目(31020190504001)、深圳市学科布局项目(JCYJ20180508151936092)、西北工业大学高峰体验计划(201912)

通信作者: \*yyt@nwpu.edu.cn

**Key words** integrated optics; spectral imaging system on chip; spectrum achieving principle; integration mode

**OCIS codes** 130.3120; 120.4820; 130.3990

## 1 引 言

光谱成像技术将光谱技术与成像技术融为一体,可同时获取物质空间信息和光谱信息,具有采集更高维度信息的能力,因此自诞生以来就广泛应用于军事侦察、环境监测和资源勘探等领域。2019 年美国国防高级研究计划局(DARPA)启动“弧形红外成像仪焦阵列”项目<sup>[1]</sup>,试图突破高性能红外焦平面阵列(IRFPA)小型化关键技术,推动国防装备向着小型化方向进一步发展,该项目将进一步巩固美军在情报、监视和侦察等领域的领先优势,再一次推动光谱成像相关技术成为各军事大国争相抢占的技术高地。

传统光谱成像系统一般采用分光系统与探测模块分立的布局方式,体积较大、工作环境要求严苛,极大地限制了其在轻小型无人机、微小卫星、消费电子产品等平台上的使用。因此微型化光谱成像系统一直以来都受到相关研究人员的广泛关注<sup>[2]</sup>。片上光谱成像系统将光学元件、探测器以及控制电路全部集成在一个芯片上,结构上超紧凑、布局上芯片化、功能上更集成。近年来,片上光谱成像系统已经在多个领域展现出其独特的优越性和诱人的发展前景。目前光谱成像设备正朝着“掌上应用”方向飞速发展,这也对片上光谱成像系统的研究提出了迫切需求。

本文对片上光谱成像系统在分光与成像元件的研究现状进行了详细综述,介绍了片上光谱成像系

统分光模块与成像模块分立制造再集成、一体化制造两种主要集成方法,以及片上光谱成像系统的实际应用,阐明了片上光谱成像系统亟待解决的问题,并探讨了该领域的未来发展方向。

## 2 片上光谱成像系统的分光与成像元件

### 2.1 分光系统

#### 2.1.1 色散式分光系统

色散式分光系统主要使用棱镜、光栅等光学器件<sup>[3]</sup>。棱镜体积较大,难以集成到芯片上。光栅的一维线性结构,使其具有易于成像系统片上集成的潜力。随着微纳加工技术的不断发展,刻蚀衍射光栅(EDG)和阵列波导光栅(AWG)成为两种典型的易于片上集成的微纳光栅<sup>[4-5]</sup>。

EDG 和 AWG 大多基于绝缘衬底硅(SOI),芯片分辨率与狭缝数目成正比,因此芯片在尺寸和分辨率上存在矛盾。图 1(a)为 2013 年浙江大学基于 EDG 设计的一种片上光谱仪<sup>[5]</sup>,该 EDG 芯片具有 510 个光栅齿,理论分辨率为 0.05 nm,其与互补金属氧化物半导体器件(CMOS)工艺兼容的集成光电探测器阵列可为 1100 nm 以内波段的高分辨、超紧凑片上光谱分析提供解决方案。图 1(b)为 AWG 芯片含  $32 \times 32$  个通道,自由光谱范围(FSR)为 52.56 nm,尺寸仅有  $520 \mu\text{m} \times 620 \mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>,具备片上分光的能力。

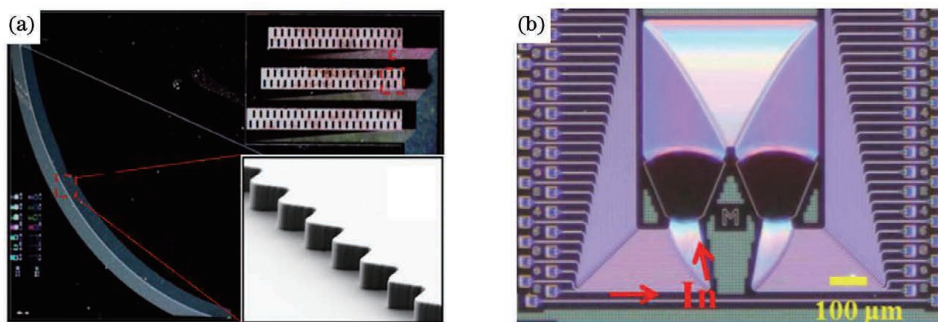


图 1 EDG 和 AWG 的示意图。(a) EDG 光栅显微图<sup>[5]</sup>; (b) AWG 光栅原理图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Schematic diagrams of EDG and AWG. (a) Micrograph of EDG<sup>[5]</sup>; (b) schematic diagram of AWG<sup>[6]</sup>

#### 2.1.2 干涉式分光系统

干涉式分光系统主要采用傅里叶变换分光,包括静态傅里叶变换、驻波傅里叶变换、热调傅里叶变换、数字傅里叶变换和硅基 MEMS 傅里叶变换等类

型<sup>[7-11]</sup>。如图 2(a)所示,一种由 32 个马赫-曾德尔干涉仪(MZI)构成的静态傅里叶片上分光系统<sup>[4]</sup>,其 FSR 为 0.75 nm,分辨率可达 0.04 nm。由于波导具有较强双折射性,目前大多数 SOI 上 MZI 都对

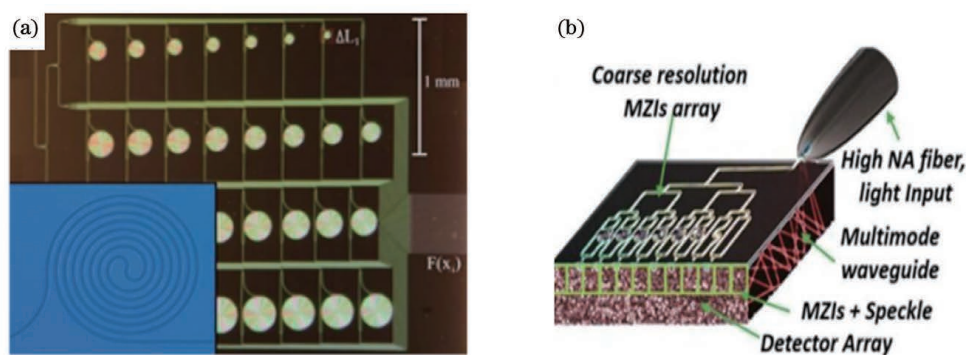


图 2 傅里叶变换分光元件图。(a) 傅里叶变换分光芯片显微图<sup>[4]</sup>；(b) 混合式散斑片上傅里叶变换增强系统<sup>[13]</sup>  
Fig. 2 Fourier-transform spectral element diagram. (a) Micrograph of Fourier-transform chip-scale spectrometer<sup>[4]</sup> ;  
(b) chip-scale speckle enhanced Fourier-transform spectrometer<sup>[13]</sup>

偏振敏感,所构成的傅里叶变换分光系统易受到光偏振影响且 FSR 较小,通过将 MZI 阵列与二维光栅耦合,在消除偏振对系统影响的同时还可以扩大系统的光入射狭缝<sup>[12]</sup>。

大多数傅里叶变换干涉式分光系统虽然具有较高的分辨率,但是其工作谱段过窄,还不太适合宽波段光谱成像。近期一种新型无源混合式散斑片上傅里叶变换增强系统<sup>[13]</sup>[图 2(b)],创造性地将离散傅里叶变换光谱仪和散斑光谱仪集成到一个芯片上,在实现较高分辨率的同时也大大拓宽了系统的工作波段范围,为基于傅里叶变换干涉式分光系统在片上成像方面的应用提供了一种新的思路。

### 2.1.3 基于微纳滤波芯片的分光系统

色散式分光系统和干涉式分光系统的光路较为复杂、元件体积较大、可靠性不高,因此不太适合于片上光谱成像系统,目前片上光谱成像系统大多采用基于各种微纳滤波结构的滤波芯片进行分光<sup>[14]</sup>,可分为可调滤波芯片、多通道滤波芯片以及渐变滤波芯片等多种类型。

大量可调滤波芯片的研究主要围绕法布里-珀

罗(FP)滤波结构展开。一般来说,相比于色散式和干涉式分光系统,基于 FP 滤波器的成像系统体积更小,更加具备片上集成的可行性。图 3(a)所示为一种通过微表面加工技术制造的  $128 \times 128$  的 FP 滤波阵列<sup>[15]</sup>,工作波段为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,该 FP 滤波阵列可在低温 ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$  以下) 环境下制造,这使其与 IRFPA 片上一体化集成制造成为了可能。

相比于空气腔 FP 滤波器,液晶填充的 FP 滤波器(LC-FP)则具有更加灵活的性能。一种基于聚合物稳定蓝相液晶的非偏振电调谐 FP 滤波器<sup>[16]</sup>[图 3(b)],其在可见光范围内调节性能为  $0.092 \text{ nm/V}$ ,FSR 为  $16 \text{ nm}$ ,在近红外范围内调节性能为  $0.12 \text{ nm/V}$ ,FSR 为  $97 \text{ nm}$ 。如何在工作谱段内消除多级透射峰的影响,是 FP 可调谐滤波器能否在光谱成像技术中顺利获得应用的关键<sup>[17]</sup>。为克服 LC-FP 透射峰数目过多,偏移范围过小的困难,研究人员设计出一种基于级联液晶法布里-珀罗结构的电调谐红外滤波器<sup>[18]</sup>,该结构由两个 FP 腔紧密堆叠而成,腔内分别填充不同深度的向列型液晶材料,工作范围为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

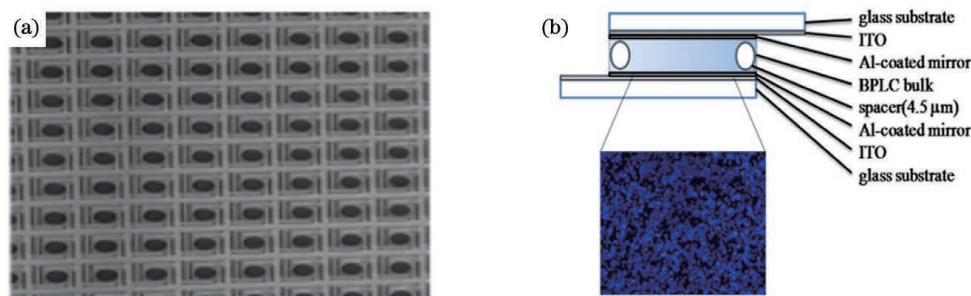


图 3 FP 滤波器。(a)微表面加工技术制造的  $128 \times 128$  的 FP 滤波阵列显微图<sup>[15]</sup>；(b)基于聚合物稳定蓝相液晶 FP 滤波器结构图<sup>[16]</sup>

Fig. 3 FP filter. (a) Micrograph of  $128 \times 128$  FP filter array produced by surface micro-machining<sup>[15]</sup> ;  
(b) configuration of FP filter based on polymer-stabilized blue phase liquid crystals<sup>[16]</sup>



多通道滤光片<sup>[19]</sup> [图 4(a)]和渐变滤光片<sup>[20]</sup>也大量应用于片上光谱成像系统。渐变滤光片以线性渐变滤光片为主,图 4(b)所示为一种工作在 450~900 nm 波段范围内的线性渐变滤光片。

本课题组于 2017 年采用电子束曝光、电子束蒸镀等工艺制备了一种新型正六边形纳米盘/孔复合滤波结构<sup>[21]</sup> [图 5(a)],具备片上集成的潜力。通过改变结构边长和阵列周期可实现对黄色-洋红-兰青(CMY)色域波段的精细调控<sup>[14]</sup>,基于此方法,我们制作了直径只有 400  $\mu\text{m}$  的西北工业大学彩色校徽,单像素尺寸仅为 330 nm [图 5(b)]。

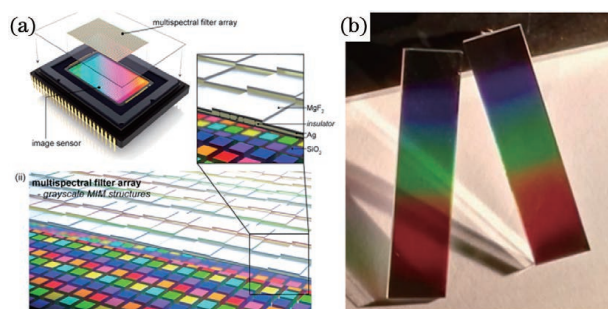
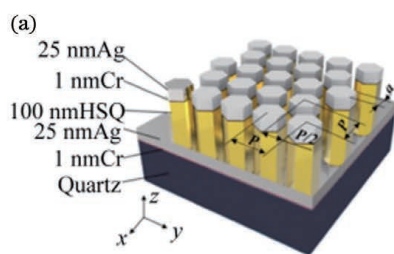


图 4 滤光片结构。(a)多通道滤光片结构示意图<sup>[19]</sup>;  
(b) 450~900 nm 线性渐变滤光片实物图<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Filter structures. (a) Multispectral filter array structures<sup>[19]</sup>; (b) true image of a linear variable filter working in 450–900 nm<sup>[20]</sup>

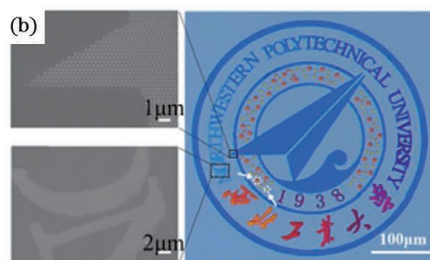


图 5 滤波结构。(a)纳米盘/孔复合结构阵列;(b)超精细光谱调制<sup>[21]</sup>

Fig. 5 Filtering structures. (a) Nanodisk-nanohole hybrid structure arrays; (b) ultrafine spectrum tunability<sup>[21]</sup>

## 2.2 探测器

探测器的小型化和高分辨率也推动了片上光谱成像系统的发展。目前,法国 ULIS 公司、英国 BAE 系统公司、国内高德红外<sup>[22]</sup>和艾睿光电<sup>[23]</sup>等公司都已经拥有了成熟的非制冷红外焦平面探测器产品。这些产品的像元尺寸以 17  $\mu\text{m}$  为主,15  $\mu\text{m}$  和 12  $\mu\text{m}$  产品也已经在生产<sup>[24]</sup>。索尼公司 2019 年推出了一种新型 InGaAs 图像传感器<sup>[25]</sup>,其光电二极管阵列每个像素通过 Cu—Cu 键直接连接到硅读出集成电路(ROIC),像素间距缩小为 5  $\mu\text{m}$  并且有望实现缩小到 1.5  $\mu\text{m}$ ,该方法为下一代高像素密度短波红外传感器的制造提供了一种解决方案,为实现片上短波红外光谱成像铺平了道路。

## 3 集成方式

### 3.1 分立制造再集成

2013 年,索尼公司联合加州理工大学提出一种基于表面等离子激元的纳米铝孔滤波阵列<sup>[27]</sup> [图 7(a)],为了实现该滤波结构与探测器片上集成,研究人员采用像素大小为 2.8  $\mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$ 、尺寸为 1920 pixel  $\times$  1920 pixel 的 CMOS 探测器,在显微镜下通过人工操作的方式实现了该滤波结构与探测

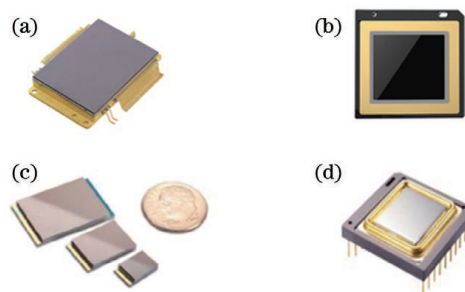


图 6 国内外探测器产品图。(a)武汉高德红外 GST1212M 探测器<sup>[22]</sup>;(b)艾睿光电陶瓷封装探测器<sup>[23]</sup>;(c)美国 L-3 通信公司晶圆级封装探测器<sup>[24]</sup>;(d)法国 ULIS 公司 UL03262 探测器<sup>[26]</sup>

Fig. 6 Products of detectors at home and abroad. (a) GST1212M detector of Wuhan Guide Infrared<sup>[22]</sup>; (b) ceramic package detector of IRay Technology<sup>[23]</sup>; (c) wafer level packaged detector of L-3 communications in America<sup>[24]</sup>; (d) UL03262 detector of ULIS in France<sup>[26]</sup>

器焦平面的对准贴合。近年来,各种综合利用显微视觉<sup>[28-29]</sup>、微型操作手<sup>[30]</sup>等技术手段的精密装配平台取得了长足的发展,装配精度已达几十微米到几微米,可用于滤波结构与探测器的像素级对准装配。

2017 年,浙江大学报道了一种基于 MZI 的光

谱成像仪<sup>[31]</sup>,其分光芯片[图 7(b)]通过晶片粘接技术集成到一起<sup>[32]</sup>,整个分光系统集成到片上尺寸仅为 11 mm×15 mm。更大尺寸的 FP 滤波结构可通

过垫片或焊盘与 IRFPA 粘接集成[图 7(c)]<sup>[33]</sup>,解决了滤波器与探测器集成制造过程中由于温度敏感性不同带来的工艺难题<sup>[34]</sup>。

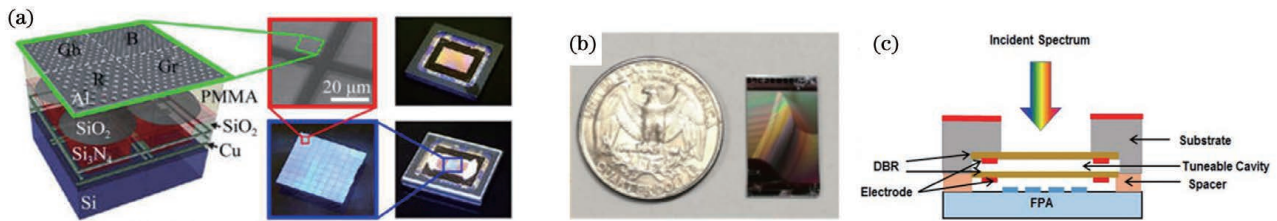


图 7 分立制造再集成方法。(a) 索尼公司通过显微镜下人工操作方式实现纳米铝孔滤波阵列与探测器集成<sup>[27]</sup>; (b) 浙江大学基于晶片粘接技术制造的分光芯片实物图<sup>[31]</sup>; (c) FP 滤波结构与焦平面阵列通过粘接集成示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 7 Methods of discrete-manufacturing-then-integrating. (a) Sony realized the integration of nano aluminum hole filter arrays and detector through manual operation under microscope<sup>[27]</sup>; (b) spectral chip manufactured by Zhejiang University based on wafer bonding technology<sup>[31]</sup>; (c) schematic diagram of FP filter structure and focal plane arrays integration through bonding<sup>[33]</sup>

欧洲微电子研究中心 (IMEC) 研制了一种由一组 FP 干涉仪集成得到的滤波片,呈阶梯状结构<sup>[35]</sup>(图 8),其不同厚度的滤光带是通过光刻工艺和蚀

刻工艺制作而成的,最后采用 die-to-die 混集成工艺实现与探测器的片上集成,光谱探测范围为 1100~1650 nm,具有 128 个波段,分辨率小于 10 nm。

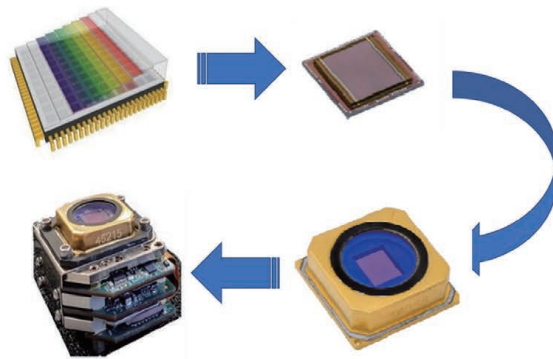
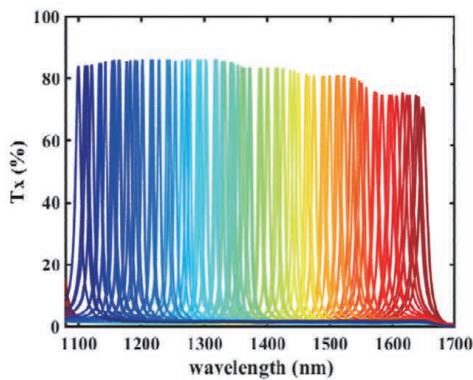


图 8 IMEC 基于 FP 干涉滤波芯片搭建超紧凑集成式光谱成像系统<sup>[35]</sup>

Fig. 8 IMEC builds an extremely compact spectral imaging system based on FP interference filter chip<sup>[35]</sup>

### 3.2 一体化制造

DARPA 于 2004 年启动“自适应焦平面阵列”项目<sup>[36]</sup>。如图 9(a)所示,该项目提出在碲镉汞探测

器单像元上集成可调 FP 滤波器,在滤波器与探测器之间布置支撑结构以及读出电路,对片上光谱成像系统一体化制造进行了前瞻性的探索。

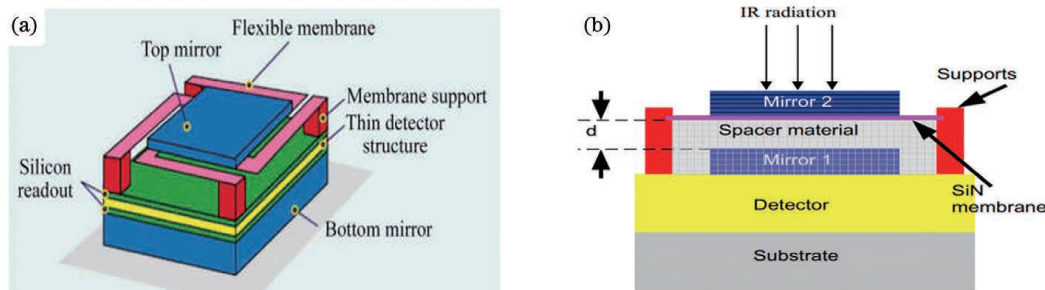


图 9 自适应焦平面阵列。(a) DARPA 自适应焦平面阵列概念图<sup>[36]</sup>; (b) 探测器与 FP 滤波结构集成概念图<sup>[37]</sup>

Fig. 9 Integration of detector and filter. (a) Concept diagram of DARPA's adaptive focal plane arrays<sup>[36]</sup>; (b) integration of detector and FP filter structure<sup>[37]</sup>

早期集成制造方法中提到<sup>[37-38]</sup>,可先在 HgCdTe 上制作探测器[图 9(b)],然后在特定温度环境下利用热蒸发法沉积底部的布拉格镜面再依次沉积间隔层、支撑结构、氮化硅。沉积完成后利用光刻技术确定上镜面形状,然后采用干法蚀刻工艺确定氮化硅膜。最后通过光刻胶显影剂和临界点干燥技术将间隔层中间层去除,完成探测器与 FP 滤波结构的一体化制造,无需再装配,但由于探测器和滤波器对温

度敏感性不同,因此制造过程需要严格控制温度,工艺较为复杂。

2014 年,IMEC 将拜耳彩色成像概念扩展到多光谱成像,通过直接在焦平面上周期性沉积 FP 干涉薄膜[图 10(a)],摒弃了传统光谱成像系统所需要的前置光学元件,极大地提高了成像系统紧凑性的同时也大大降低了系统的质量和尺寸<sup>[39]</sup>。

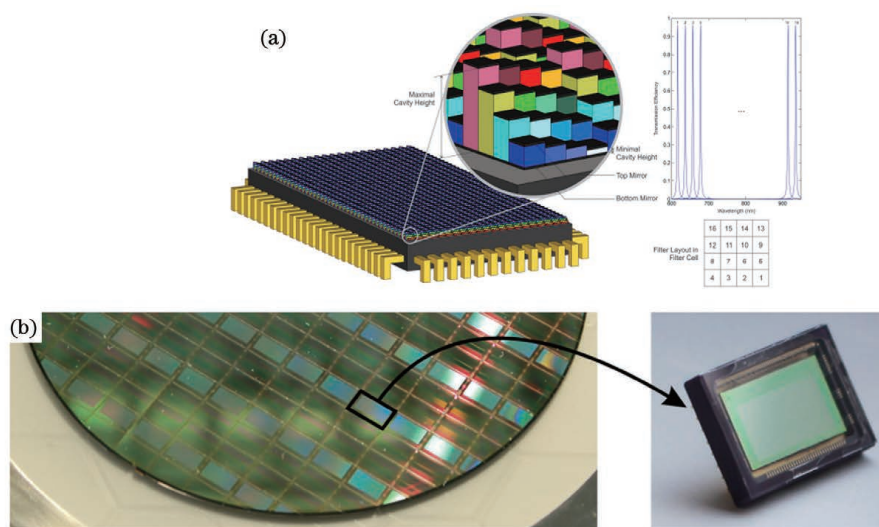


图 10 IMEC 集成滤波成像器件。(a) IMEC 像元镀膜工艺制造的滤波成像器件;(b) IMEC 集成滤波 CMOS 图像传感器(左)及封装(右)<sup>[39]</sup>

Fig. 10 Integrated filtering image sensor by IMEC. (a) Chip-scale multispectral imager through integrated per-pixel filtering by IMEC; (b) IMEC integrated filtering CMOS image sensor (left) and package (right)<sup>[39]</sup>

## 4 片上光谱成像系统的应用

2016 年芬兰国家技术研究中心(VTT)成功开发出了世界首款高光谱移动应用设备<sup>[40]</sup>,如图 11(a)所示,研究人员通过在 iPhone 5s 镜头上集成超薄电可调微光机电结构(MOEMS),成功实现光谱成像系统的片上集成<sup>[41]</sup>,将 iPhone 转换成一台便携式高光谱成像设备,让高光谱成像技术从实验室正式步入移动应用时代。近年来,片上光谱成像系统已在生物医学、军事装备、食品检测、农林监测等多个领域崭露头角,为传统光谱成像技术开拓了崭新的应用前景。

### 4.1 生物医学

多光谱成像技术在生物医学领域的应用由来已久<sup>[42-43]</sup>,但是一般临床多光谱成像设备存在体积大、不易放置、流动性差等缺点,严重限制了其在现场急救、野外作业、移动健康等场景下的使用。片上光谱成像系统则为这些问题的解决带来了希望。

早在 2012 年,集成式的光谱成像系统就已成功

应用于黑色素瘤的筛查<sup>[44]</sup>。除了临床以外,医疗设备的小型化、便携化对于移动健康也具有重要意义。常规人体血红蛋白含量检测方法所需要仪器体积庞大且无法实现连续实时监测,与手机镜头前集成 MOEMS<sup>[41]</sup>不同,美国普渡大学研究人员通过光谱超分辨率技术将手机普通 RGB 摄像头转换成一个高光谱成像仪,成功实现一个非侵入性、低成本、移动式的人体血红蛋白含量监测设备<sup>[45]</sup>,这为片上光谱成像系统在移动健康领域的应用打开了一个新的思路,未来片上光谱成像系统将和各种智能算法深度结合,在更多更复杂疾病的筛查、监测等方面发挥更大的作用。

### 4.2 军事装备

光谱成像技术在军事上应用也相当广泛。近年来随着智能化战争理念<sup>[46]</sup>的提出,微型化、芯片化光谱成像系统在单兵装备、情报侦察等方面的意义愈加凸显。

早在 2015 年美军就计划部署一种体积小、成本低的多光谱、具有较小焦平面阵列的第三代红外成



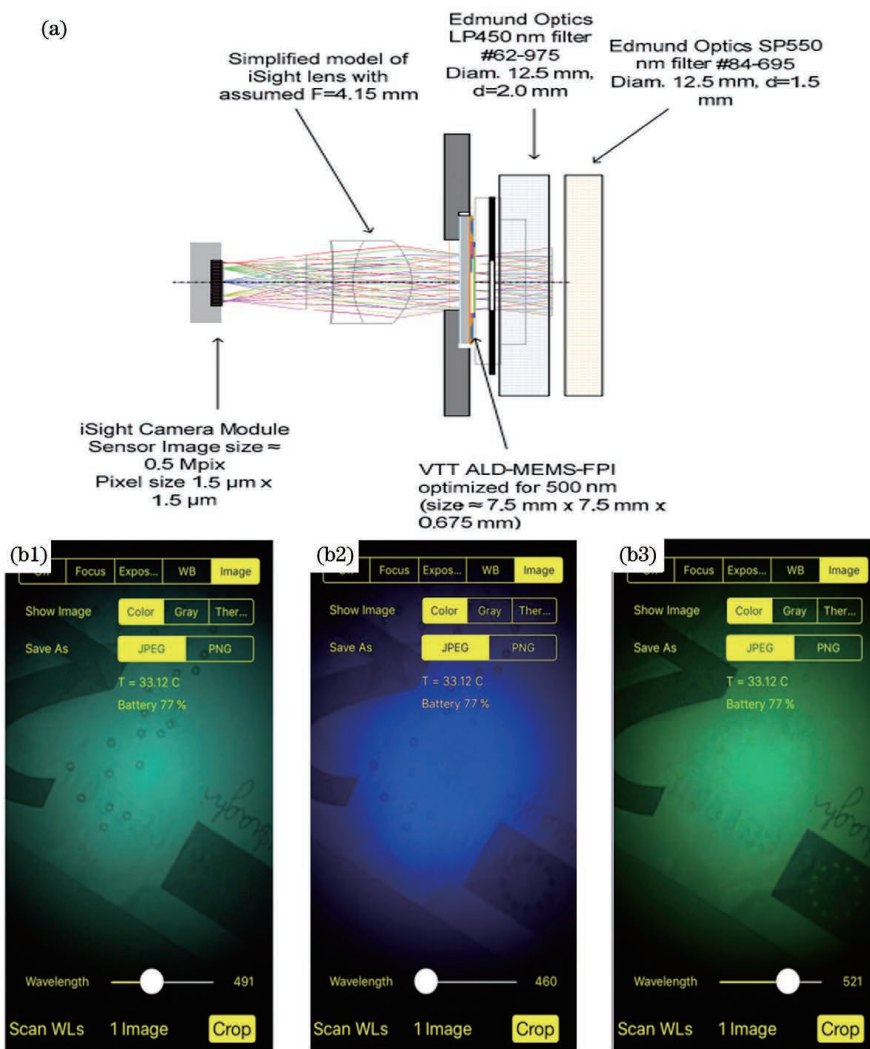


图 11 高光谱移动应用设备。(a) VTT iPhone 5s 高光谱成像仪光学概念图;(b) 基于 iPhone 5s 高光谱成像仪的钞票识别应用;(b1)~(b3)钞票在 491 nm,460 nm 和 521 nm 波长处的图像,其上“小圆圈”图案在 460 nm 和 491 nm 处可见,而在 521 nm 处不可见<sup>[41]</sup>

Fig. 11 Hyperspectral mobile application equipments. (a) Optical concept map of VTT iPhone 5s hyperspectral imager; (b) banknote recognition application based on iPhone 5s hyperspectral imager; (b1)-(b3) images of banknotes at 491 nm, 460 nm, and 521 nm, respectively, and the “tiny circle” pattern on the images is visible at 460 nm and 491 nm, but not at 521 nm<sup>[41]</sup>

像仪<sup>[47]</sup>。这种焦平面器件在同一阵列中集成了多光谱成像探测器、信号处理元件和微透镜光学元件等,满足单兵装备的要求,对于提高美军在战场上识别伪装的能力具有重要意义。

随着科技进一步发展,未来微型侦察装备将会成为各国在情报侦察领域角逐的技术关键点。2017 年美国国家航空航天局在“小型企业技术转移计划”中就将立方星超光谱成像仪列为十九项重要技术之一<sup>[48]</sup>。2018 年一颗体积仅为  $22.7 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ,质量约为 2.4 kg 的芬兰微小卫星已经搭载世界上最小的红外高光谱相机顺利升空<sup>[49]</sup>。为了全面争夺太空信息优势,掌握战争主动权,目前世

界上的航空航天大国都在积极探索新一代侦察技术,片上光谱成像系统大大缩小了光谱成像设备的体积,有助于微小光学侦察卫星的实现。这些微小卫星可以通过“集群编队”的方式捕获高分辨率、大空间维度的图像,为传统遥感技术注入新的活力。

掌握信息就掌握了战争的主动权,可以预见的是未来基于片上光谱成像系统的微型光谱成像设备将会颠覆传统的作战模式。

### 4.3 其他领域

近年来食品、农业和工业等领域对片上光谱成像的需求也在不断攀升,国际上占据技术优势的组

织、企业也在加紧对片上光谱成像相关产品的研发。图 12 为 IMEC 基于一种阶梯状结构 FP 滤波芯片与探测器片上集成搭建的超紧凑光谱成像系统。2015 年,IMEC 设计了一款直接在 CMOS 传感器上整体集成像素级 FP 滤波结构的多光谱相机 Ximea xiQ<sup>[50]</sup>,该相机可在可见光(VIS, 470 ~ 620 nm)

16 个波段上获得 272 pixel×512 pixel 的图像立方体,机身非常紧凑,整机尺寸仅为 26 mm×26 mm×30 mm。如图 13 所示,实验结果证明该相机能够分辨视觉所不能分辨的颜色光谱特征,未来能够应用在诸如材料识别、药物区分、真伪鉴别、光学分选等多种场景之中。

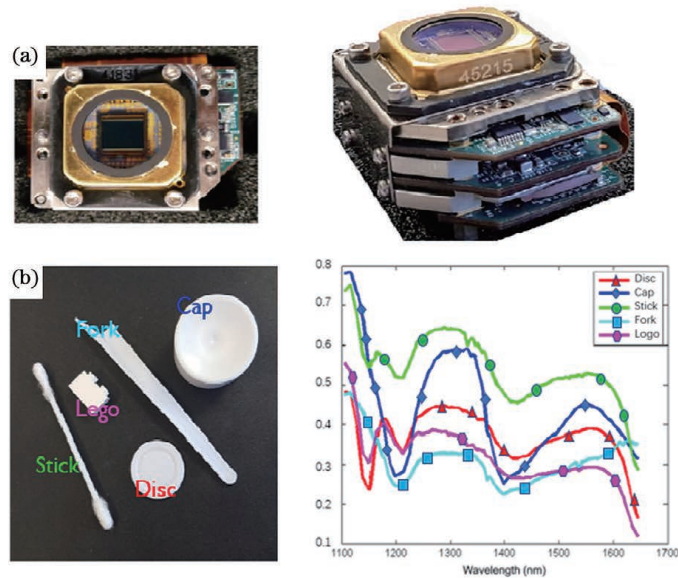


图 12 片上光谱成像产品。(a) IMEC 超紧凑光谱成像系统(左侧为俯视图,右侧为轴测图);(b)白色塑料物品组(左侧为实物图,右侧为通过超紧凑光谱成像系统获得的光谱图)<sup>[35]</sup>

Fig. 12 On-chip spectral imaging products. (a) Compact spectral imaging system of IMEC (top view at left and axonometric view at right); (b) white plastic articles group (left side is physical image, right side is spectrum obtained by the compact spectral imaging system)<sup>[35]</sup>

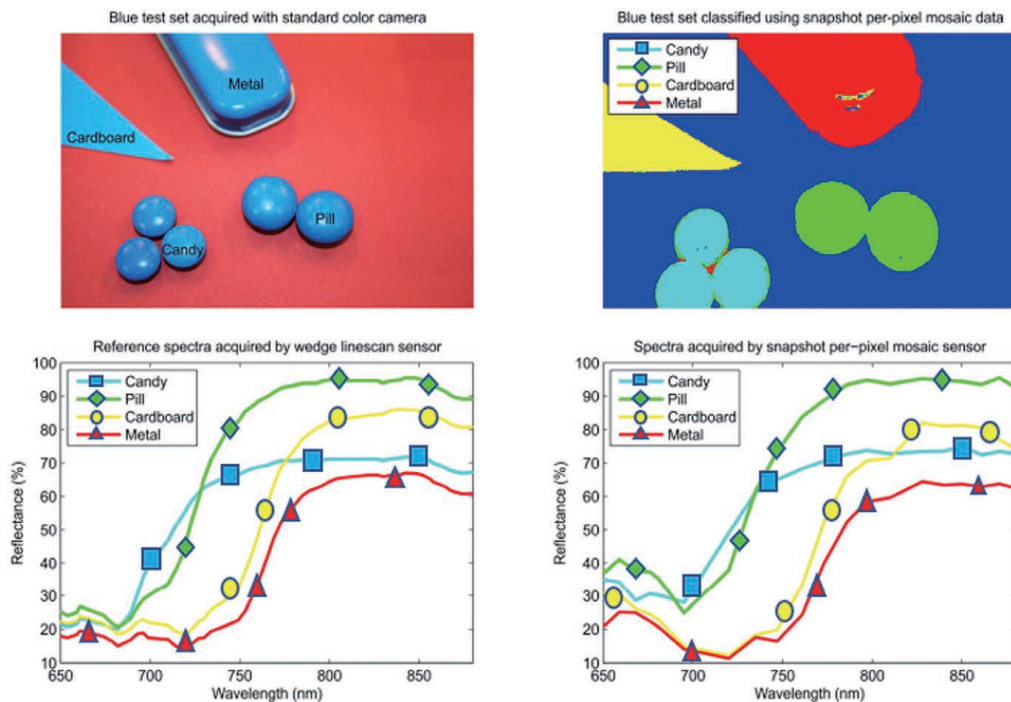


图 13 Ximea xiQ 多光谱相机进行光学分选<sup>[50]</sup>

Fig. 13 Optical sorting by Ximea xiQ multispectral camera<sup>[50]</sup>



2017 年芬兰 SPECIM 公司也发布了一款智能型、超紧凑、轻量级的高光谱相机 SPECIM IQ (图 14)。该相机覆盖 400~1000 nm 波段范围,分辨率可达 3 nm,整机质量为 1.3 kg,集高光谱数据采集、分析处理和数据可视化等功能于一体<sup>[51]</sup>,在现场检测、实时数据分析等实际应用中具有重要意

义。研究人员已经成功利用 SPECIM IQ 精确测量拟南芥叶绿素含量以及准确评估大麦植株白粉病的严重性<sup>[52]</sup>,展现了便携式光谱成像设备在农林行业的广阔应用前景。除此之外,SPECIM 公司还展示了该相机在刑侦、艺术品研究等领域的应用,均取得了良好效果。



图 14 Specim IQ 多光谱相机说明和尺寸(左)及相机渲染图(右)<sup>[52]</sup>

Fig. 14 Description and size of Specim IQ multi-spectral camera (left) and camera rendering (right)<sup>[52]</sup>

## 5 结束语

虽然片上光谱成像系统的发展已经取得了令人瞩目的成果,但是在分光原理、集成工艺等方面还面临着诸多挑战<sup>[53]</sup>。目前片上光谱成像系统大多是深度耦合的,器件通用性差、互换性弱,缺少标准化,阻碍了片上光谱成像设备市场化的进程。

未来的片上光谱成像系统有三大发展方向:1)向着“系统内紧耦合,系统外弱耦合”的模块化方向发展;2)向着标准化、通用化方向迈进;3)物理尺寸进一步缩小,功能进一步集成,同时将与物联网深度融合,解决传统物联网感知层对于物质成分信息获取和感知能力匮乏的缺陷<sup>[54]</sup>,在智慧城市、智能制造、智能家居等领域获得广泛应用。未来,基于片上光谱成像系统的各种光谱成像设备将会真正进入掌上时代,深度融入个人日常生活,在食品安全<sup>[55-56]</sup>、移动健康等方面展现出其独特的魅力。

## 参 考 文 献

- [1] DARPA launched the Arc Infrared Imager Focal Array program [EB/OL]. (2019-08-16) [2020-08-15]. <http://www.dsti.net/Information/News/116362>.
- [2] DARPA 推出“弧形红外成像仪焦阵列”项目 [EB/OL]. (2019-08-16) [2020-08-15]. <http://www.dsti.net/Information/News/116362>.
- [3] Dash J P, Watt M S, Pearse G D, et al. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 131: 1-14.
- [4] Wang Y, Gong Y. Design of multispectral imaging spectrometer using linear variable filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013003. 王颖, 巩岩. 线性渐变滤光片型多光谱成像光谱仪设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013003.
- [5] Velasco A V, Cheben P, Bock P J, et al. High-resolution Fourier-transform spectrometer chip with microphotonic silicon spiral waveguides[J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 706-708.
- [6] Ma X, Li M Y, He J J. CMOS-compatible integrated spectrometer based on echelle diffraction grating and MSM photodetector array [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 6600807.
- [7] Zou J, Ma X, Xia X, et al. High resolution and ultra-compact on-chip spectrometer using bidirectional edge-input arrayed waveguide grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4447-4453.
- [8] Heidari E, Xu X C, Chung C J, et al. On-chip Fourier transform spectrometer on silicon-on-sapphire [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2883-2886.
- [9] Herrero-Bermello A, Li J, Khazaei M, et al. On-chip Fourier-transform spectrometers and machine learning: a new route to smart photonic sensors[J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5840-5843.
- [10] Ma X, Zou J, Li W H, et al. Miniature spectrometer based on a Fourier transform spectrometer chip and a

- commercial photodetector array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(12): 123001.
- [10] Podmore H, Scott A, Cheben P, et al. Demonstration of a compressive-sensing Fourier-transform on-chip spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1440-1443.
- [11] Wang W P, Jin L. Research progress of on-chip spectrometer based on the silicon photonics platform [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 333-342.  
王伟平, 金里. 芯片级硅基光谱仪研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(2): 333-342.
- [12] Wang H J, Li Q F, Shi W. On-chip polarization-insensitive Fourier transform spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1479-1482.
- [13] Paudel U, Rose T. Ultra-high resolution and broadband chip-scale speckle enhanced Fourier-transform spectrometer [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16469-16485.
- [14] Yu X C, Zhao J C, Yu Y T. Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 999-1012.  
余晓畅, 赵建村, 虞益挺. 像素级光学滤波-探测集成器件的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 999-1012.
- [15] Meng Q H, Huang G H, Lai J J, et al. Fabrication of  $128 \times 128$  MEMS tunable F-P cavity optical filter array with surface micromachining [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103199.
- [16] Chen Y H, Wang C T, Yu C P, et al. Polarization independent Fabry-Pérot filter based on polymer-stabilized blue phase liquid crystals with fast response time[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25441-25446.
- [17] Cong R, Wang Y K, Chen G, et al. Methods for suppressing multi-order transmission peaks of tunable Fabry-Perot filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0323003.  
丛蕊, 王义坤, 陈刚, 等. Fabry-Perot 可调谐滤波器多级透射峰的抑制方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0323003.
- [18] Lin J N, Tong Q, Lei Y, et al. Electrically tunable infrared filter based on a cascaded liquid-crystal Fabry-Perot for spectral imaging detection[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(7): 1925-1929.
- [19] Williams C, Gordon G S D, Wilkinson T D, et al. Grayscale-to-color: scalable fabrication of custom multispectral filter arrays[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3132-3141.
- [20] Song S G, Gibson D, Ahmadzadeh S, et al. Low-cost hyper-spectral imaging system using a linear variable bandpass filter for agritech applications[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(5): A167-A175.
- [21] Zhao J C, Yu X C, Yang X M, et al. Polarization independent subtractive color printing based on ultrathin hexagonal nanodisk-nanohole hybrid structure arrays[J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 23137-23145.
- [22] Wuhan gold infrared co., LTD[EB/OL]. (2020-08-08)[2020-08-08]. <https://www.wuhan-guide.com>.  
高德红外[EB/OL]. (2020-08-08)[2020-08-08]. <https://www.wuhan-guide.com>.
- [23] iRay[EB/OL]. (2020-08-08)[2020-08-08]. <http://www.iraytek.com>.  
艾瑞光电[EB/OL]. (2020-08-08)[2020-08-08]. <http://www.iraytek.com>.
- [24] Feng T, Jin W Q, Si J J. Uncooled infrared FPA: a review and forecast[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 177-184.  
冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. *红外技术*, 2015, 37(3): 177-184.
- [25] Manda S, Matsumoto R, Saito S, et al. High-definition visible-SWIR InGaAs image sensor using Cu-Cu bonding of III-V to silicon wafer[C]//2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), December 7-11, 2019, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 16.7.1-16.7.4.
- [26] French Lynred company product page [EB/OL]. (2020-09-03)[2020-09-03]. <https://www.lynred.com/products/pico640gen2>.  
法国 Lynred 公司产品网页[EB/OL]. (2020-09-03)[2020-09-03]. <https://www.lynred.com/products/pico640gen2>.
- [27] Burgos S P, Yokogawa S, Atwater H A. Color imaging via nearest neighbor hole coupling in plasmonic color filters integrated onto a complementary metal-oxide semiconductor image sensor[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 10038-10047.
- [28] Ma L, Zhao Z J, Zhou F J, et al. Assembly system for miniature optical parts and experimental study [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1462-1469.  
马立, 赵志杰, 周辅君, 等. 微小光学器件装配系统与实验研究[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1462-1469.
- [29] Huang H T. Research on key technologies of micro vision in micro assembly [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.  
黄海亭. 微装配中显微视觉关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

- [30] Jain R K, Majumder S, Ghosh B, et al. Design and manufacturing of mobile micro manipulation system with a compliant piezoelectric actuator based micro gripper [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 35: 76-91.
- [31] Yang M Y, Li M Y, He J J. Static FT imaging spectrometer based on a modified waveguide MZI array[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2675-2678.
- [32] Lamponi M, Keyvaninia S, Jany C, et al. Low-threshold heterogeneously integrated InP/SOI lasers with a double adiabatic taper coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(1): 76-78.
- [33] Tripathi D K, Jiang F, Rafiei R, et al. Suspended large-area MEMS-based optical filters for multispectral shortwave infrared imaging applications [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(4): 1102-1110.
- [34] Antoszewski J, Milne J, Dell J M, et al. Recent developments in MEMS-based tunable IR detectors [C]//*SENSORS*, 2008 IEEE, October 26-29, 2008, Lecce, Italy. New York: IEEE Press, 2008: 942-944.
- [35] Gonzalez P, Pichette J, Vereecke B, et al. An extremely compact and high-speed line-scan hyperspectral imager covering the SWIR range [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10656: 106560L.
- [36] Carrano J, Brown J, Perconti P, et al. Tuning in to detection [EB/OL]. (2004-08-01) [2020-11-05]. <https://spie.org/news/tuning-in-to-detection?SSO=1>.
- [37] Faraone L. MEMS based tunable short-wavelength infrared sensors [C] // 2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, October 22-28, 2005, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2005: 249-250.
- [38] Musca C A, Antoszewski J, Winchester K J, et al. Monolithic integration of an infrared photon detector with a MEMS-based tunable filter[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2005, 26(12): 888-890.
- [39] Geelen B, Tack N, Lambrechts A. A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8974: 89740L.
- [40] Ministry of Science and Technology, PRC. Finland has successfully developed the world's first hyperspectral mobile device [EB/OL]. (2017-01-13) [2020-09-17]. [http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201701/t20170113\\_130452.htm](http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201701/t20170113_130452.htm).  
中华人民共和国科学技术部. 芬兰成功开发世界首款高光谱移动设备 [EB/OL]. (2017-01-13) [2020-09-17]. [http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201701/t20170113\\_130452.htm](http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201701/t20170113_130452.htm).
- [41] Rissanen A, Saari H, Rainio K, et al. MEMS FPI-based smartphone hyperspectral imager [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9855: 985507.
- [42] Ma X J, Liu R, Li C X, et al. Hyperspectral imaging of *in vivo* tissues: a review [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(8): 080002.  
马雪洁, 刘蓉, 李晨曦, 等. 高光谱在体组织成像方法的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(8): 080002.
- [43] Sun W, Chen R L, Luo J X. A review of research on hyperspectral imaging technology in bloodstain detection applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0600007.  
孙威, 陈蕊丽, 骆建新. 高光谱成像技术在血迹检测应用的研究综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0600007.
- [44] Nagaoka T, Nakamura A, Kiyohara Y, et al. Melanoma screening system using hyperspectral imager attached to imaging fiberscope [C] // 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 28-September 1, 2012, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 3728-3731.
- [45] Park S M, Visbal-Onufrak M A, Haque M M, et al. mHealth spectroscopy of blood hemoglobin with spectral super-resolution [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 563-573.
- [46] Ge Y, Jia Z Z. The concept of future combat and combat style under the revolution in military affairs [J]. *Military Digest*, 2020(15): 55-58.  
葛妍, 贾珍珍. 军事变革下的未来作战概念与作战样式 [J]. *军事文摘*, 2020(15): 55-58.
- [47] A brief analysis of the defense advanced research projects agency's "wafer level infrared detector" [EB/OL]. (2016-04-18) [2020-09-22]. [http://www.360doc.com/content/16/0408/13/32196507\\_548846108.shtml](http://www.360doc.com/content/16/0408/13/32196507_548846108.shtml).  
美国国防高级研究计划局“晶片级红外探测器”目简析 [EB/OL]. (2016-04-18) [2020-09-22]. [http://www.360doc.com/content/16/0408/13/32196507\\_548846108.shtml](http://www.360doc.com/content/16/0408/13/32196507_548846108.shtml).
- [48] NASA 2016 STTR program phase II selections-topic list [EB/OL]. (2017-07-31) [2020-09-22]. [https://sbir.nasa.gov/award\\_topic\\_list/selection\\_nid/58789](https://sbir.nasa.gov/award_topic_list/selection_nid/58789).
- [49] Xu Y C. Finnish nanosatellite carries the world's smallest infrared hyperspectral camera [EB/OL]. (2018-12-23) [2020-09-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1620613396680949110&wfr=sp>.  
徐宙超. 芬兰纳米卫星搭载世界最小红外高光谱相机 [EB/OL]. (2018-12-23) [2020-09-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1620613396680949110&wfr=sp>.



- [50] Geelen B, Blanch C, Gonzalez P, et al. A tiny VIS-NIR snapshot multispectral camera[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9374: 937414.
- [51] Hand-held intelligent hyperspectral camera-SPECIM IQ[EB/OL]. [2020-10-08]. <http://www.qd-china.com/zh/pro/detail/1912091765746>.  
手持智能型高光谱相机-SPECIM IQ [EB/OL]. [2020-10-08]. <http://www.qd-china.com/zh/pro/detail/1912091765746>.
- [52] Behmann J, Acebron K, Emin D, et al. Specim IQ: evaluation of a new, miniaturized handheld hyperspectral camera and its application for plant phenotyping and disease detection[J]. Sensors, 2018, 18(2): 441.
- [53] Zhao Y Q, Liu X Y, Tang C L. Progress in spectral filter arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190004.  
赵永强, 刘芯羽, 汤超龙. 光谱滤光片阵列进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190004.
- [54] Wang X Q, Huang S L, Yu Y H, et al. A compact long-wavelength near-infrared IOT node and its performance experiments[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(1): 42-46.  
王绪泉, 黄松奎, 于月华, 等. 微型长波近红外物联网节点及实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(1): 42-46.
- [55] 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.
- [56] Fang Y M, Yang F, Li X Q. Detection of damage on the surface of Korla fragrant pear using hyperspectral images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141017.  
方益明, 杨帆, 李晓勤. 库尔勒香梨表面损伤的高光谱图像检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141017.