

光谱滤光片阵列进展

赵永强*, 刘芯羽, 汤超龙

西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 成像光谱技术可以获取所观测目标的空间和光谱信息,能有效辨别目标表面的物质组成,在军民领域应用广泛。近年来,基于滤光片阵列的成像光谱设备由于其结构紧凑、成像速度快、覆盖波段范围大等优势受到广泛关注。而滤光片阵列作为确定该类设备光谱性能的核心元件,其结构设计一直以来都是研究热点。为此,总结了光谱滤光片阵列的主要进展,分析了不同结构光谱滤光片阵列的优缺点及适用范围,并展望了光谱滤光片阵列的发展趋势。

关键词 光学器件; 成像光谱; 滤光片阵列; 亚波长光栅; 超平面; 法布里-珀罗腔

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.190004

Progress in Spectral Filter Arrays

Zhao Yongqiang*, Liu Xinyu, Tang Chaolong

Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen,
Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract The imaging spectroscopy technology can obtain the spatial and spectral information of the observed object, and effectively distinguish the material composition of the object surface. It is widely used in the military and civilian fields. In recent years, the imaging spectroscopy devices based on filter arrays have received extensive attention due to their compact structure, fast imaging speed, and large coverage band. As a core component to determine the spectral performance of such devices, the filter array is a research hotspot. In this paper, by summarizing the main progress of spectral filter arrays, the advantages and disadvantages of different spectral filter arrays and their application range are analyzed, and the development trend of spectral filter arrays is prospected.

Key words optical devices; imaging spectrum; filter array; subwavelength grating; metasurface; Fabry-Perot

OCIS codes 230.1950; 300.3700; 050.2230

1 引言

由于不同目标物质组成成分的差异,目标在反射/辐射电磁波的过程中会产生携带物质组成成分的光谱信息,用成像光谱技术可以有效获取这些信息,并可进一步反演出目标的物质组成成分。成像光谱技术已广泛应用于环境监测、食品安全、医学疾病诊断、化合物的成分鉴定等领域^[1-4]。成像光谱仪的光谱分辨率主要由分光设备确定^[5],而不同的分光方式也决定了光谱图像的获取方式。

按分光原理分类,分光设备可以分为色散型、滤光片型和干涉型^[6]。色散型和干涉型光谱成像技术通过一次曝光就可以获得多个谱段的光谱信息,但色散型光谱分光技术由于狭缝的存在使得光通量与光谱分辨率互相制约,无法同时获得较高的光谱分辨率和光通量^[7]。而干涉型光谱成像系统虽然能够同时满足高通量和高光谱分辨率的需求,但是其独特的干涉数据获取方式对搭载平台的稳定性及光谱图像反演提出了很高的要求^[8]。调谐型滤光片相比于色散型滤光片,无需机械转轮调谐衍射波长,而采

收稿日期: 2019-11-21; 修回日期: 2019-12-19; 录用日期: 2020-01-17

基金项目: 深圳市科技创新委员会基础研究项目(JCYJ20180306171146740)、深圳市科技创新委员会基础研究(学科布局)项目(JCYJ20170815162956949)

* E-mail: zhaoyq@nwpu.edu.cn

用电调谐和液晶调谐的方式代替,在加快调谐速度的同时减小了机械误差,但需要多次曝光才可以得到数据立方体^[9]。而滤光片轮会带来机械结构误差或图像配准问题^[10]。

滤光片阵列是指由一个基元重复排列构成的结构,这种基元中包含多个区域,其中每个区域可以透射/反射特定的中心波长,将滤光片阵列与探测器像元对准,能够在一次快门时间内同时获取空间信息和光谱信息,从而避免了扫描器件带来的机械误差和伪影。因此滤光片阵列作为快照式光谱成像技术中的一种,具有结构紧凑、易集成和实时的特点^[11]。不同结构的滤光片阵列对光谱分辨率和设备的紧凑程度有着重要的影响。

滤光片阵列结构具有多样性,通过设计特定结构能够在获取高的光谱分辨率的同时获得高光通量^[12]。但首先,滤光片阵列的每个区域相对微小,对微纳制备工艺的要求较高。其次,滤光片阵列与探测器的配准也存在一定的难度,因为每个区域过于微小,所以在对准时如果误差较大,也会影响最终的光谱成像结果。

早期的滤光片阵列主要是彩色滤光片阵列,但由于其光谱带宽较大、光谱波段数较少,使得光谱成像设备对目标的区分和识别能力较弱^[13-14]。学者们依据 Fabry-Perot 光谱带宽较小、透射率较高以及波长可调谐的特性,基于 Fabry-Perot 薄膜型滤光片阵列进行光谱分光,Geelen 等^[15-17]在 2013 年成功制备 IMEC 多通道多光谱相机。但中长波红外波段的 Fabry-Perot 膜系复杂且层数较多,在制备过程中膜层厚度的增加会导致应力变形,给制备工艺带来了难度,最终会导致误差增大^[11]。随着亚波长概念的提出,通过激发亚波长光栅结构的导模共振或等离子激元现象可以使光谱曲线具有窄带宽、高透射的特性^[18-20],相比 Fabry-Perot,它具有更简单的膜系,适用于更多波段,2017 年 Mauser 等^[21]在 Nature Nanotechnology 发表文章,将亚波长一维(1D)光栅和热电学结合,该结构不仅具有更小的结构尺寸,并且能够实现可见光至中红外(VIS-MIR)波段的光电探测。应用亚波长概念,学者们突破传统光栅结构,设计符合特定需求的超平面阵列,2018~2019 年研究人员连续在 Nature 和 Science 上发表关于超平面阵列在光谱成像技术中的应用^[22-24]。国内学者也不断研究基于滤光片阵列的光谱成像设备,2018 年曹丛峰等^[25]将多个独立的滤光片依次拼接成滤光片阵列在成像探测器前放置,为

提高多光谱相机的适用性,选取了 5 个广泛应用于农业、林业和环境等领域的多光谱波段,并增加一个全色波段构成 6 波段滤光片阵列,通过一次曝光得到地物目标分条带区域的分波段图像,并通过飞行平台的前向运动获得每个条带区域的多光谱图像。

综上所述,从彩色滤光片阵列到超平面,光谱滤光片阵列解决了成像设备结构复杂、光谱分辨率低、覆盖波段少等问题。因此本文将主要分析基于不同结构的光谱滤光片阵列的优缺点及适用范围,并给出光谱滤光片阵列的发展趋势。

2 Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列

根据多光束干涉原理,如图 1 所示,Fabry-Perot 通过改变腔距或腔内介质折射率可以实现不同波段中心波长的调谐^[16],并且具有较小的带宽。

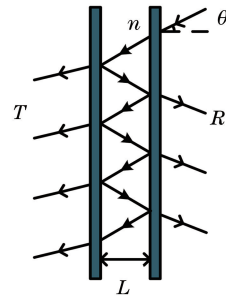


图 1 Fabry-Perot 干涉原理图^[22]

Fig. 1 Fabry-Perot interference schematic^[22]

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

式中: n 为腔内介质折射率; L 为腔长; θ 为入射角; λ 为中心波长; m 是衍射级次。

微机电系统(MEMS)通过在 Fabry-Perot 两高反镜上增加微机电驱动装置和反偏电压后,利用静电力或热应变效应来改变腔距。但它的调谐速度较慢,在毫秒至微秒之间^[26]。液晶可调谐滤光片(LCFP)通过调节电压改变腔内介质液晶折射率,需要多次曝光才可得到数据立方体,对外加电压稳定性及环境温度的要求都较高^[27]。为解决上述滤光片的缺点,学者们提出设计 Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列,改变间隔物距离,并阵列排布,将滤光片阵列与探测器像元对应实现光谱分光。

2007 年 Wang 等^[28]提出通过改变间隔物 SiO_2 的距离,制造中心波长在 722~880 nm 的 128 波段光谱滤光片阵列,阵列大小 12 mm×12 mm。但该结构覆盖波段范围太小,Walls 等^[29]在由 Al 膜组成的 Fabry-Perot 内填充介质层 SiN 刻蚀纳米孔,并用有机玻璃(PMMA)回填,实现了覆盖整个可见光

(VIS)波段的 23 个窄带滤波器,此结构可以直接与 CMOS 结合用于光谱成像技术。与单独由 Fabry-Perot 组成的滤光片阵列相比,该结构还克服了仅通过调整 Fabry-Perot 腔长实现中心波长的调谐,可以通过改变纳米孔的周期和孔径大小来实现调谐,降低了制备复杂性。2013~2015 年 Geelen 等^[15-17]基于 Fabry-Perot 滤光片偏振无关的特性提出另一种像素薄膜阵列,该阵列覆盖可见光至近红外(VIS-IR)波段,得到的光谱透射率极高且带宽极小。最终将阵列与 CMOS 探测器单片集成,成功制造用于可见光及近红外的 16 波段、32 波段、36 波段多光谱相机。

Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列在中红外及远红外膜系中较复杂,在制备过程中膜层厚度的增加会导致应力变形,因此会增大误差^[11]。为了减小误差,以更简单的结构实现光谱分光,学者们发现通过激发亚波长光栅导膜共振/等离子激元效应,不仅可以实现特定中心波长的透射/反射,而且在设计亚波长光栅时,结构具有多样性,因此可以降低膜系的复杂程度。

3 亚波长光栅阵列

当亚波长光栅的周期远小于入射波长时,高级衍射波为倏逝波,只存在零级衍射,如图 2 所示,在一定的条件下可以产生导模共振或表面等离子激元共振物理现象,这种现象在光谱上表现为产生窄带宽、高反射/透射及低旁带,因此被作为滤波膜在光谱分光中广泛使用^[21-23]。

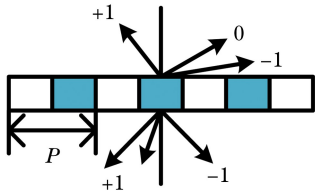


图 2 亚波长光栅衍射图^[18]

Fig. 2 Subwavelength grating diffraction^[18]

在亚波长光栅分光技术中,影响透射率、带宽、角度容差及中心波长位置的主要参数有光栅周期、占空比、光栅层厚度、均匀层的厚度和折射率。对参数进行多目标优化,可以获得理想光谱曲线。

$$F(P, f, d, h_i, n_i, i) = D(T, \Delta, \theta, \lambda), \quad (2)$$

式中: P 为光栅周期; f 为光栅占空比; d 为光栅层厚度; h_i 和 n_i 分别为均匀层的厚度和折射率; i 为均匀层层数; T 为光谱透射率; Δ 为光谱带宽; θ 为

角度容差; λ 为中心波长位置。

早期学者们研究一维亚波长光栅结构,通过增加均匀层,并对膜系进行优化,从而实现窄带及高透射/反射的特性^[30-33]。对于如何提升角度容差,Lemarchand 等^[34-36]提出设计双周期光栅结构及 T 型光栅结构,实现了在不改变光谱带宽的前提下提高角度容差。中心波长的位置由光栅周期、占空比、光栅层厚度共同决定,因此学者们通过改变光栅层结构参数设计了适用于不同波段的亚波长光栅阵列,实现了基于亚波长光栅阵列分光技术的快照式光谱成像。

3.1 一维亚波长光栅阵列

图 3 是一维亚波长光栅阵列与探测器集成实现光谱成像的原理图。通过改变光栅占空比设计基元,基元中各个区域可以实现不同波段光源的透射/反射,将基元进行阵列排布实现亚波长光栅阵列,将亚波长光栅阵列与探测器结合,实现光谱成像。

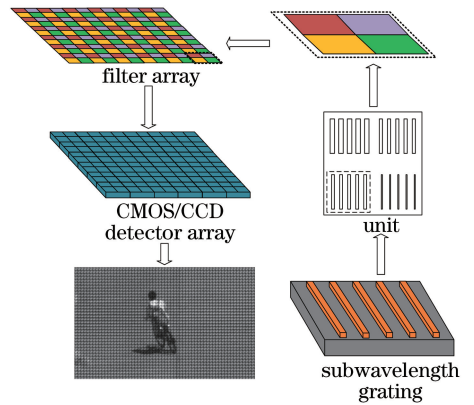


图 3 亚波长光栅阵列分光原理图

Fig. 3 Subwavelength grating array spectroscopy

2009 年 Lim 等^[37]提出设计具有亚波长狭缝宽度的一维铝光栅结构,用于集成光电探测器上的紫外光谱分辨成像。2010 年 Xu 等^[38]在 Nature Communications 上提出亚波长金属-绝缘体-金属一维光栅结构,激发金属的等离子体,实现了在可见光波段任意颜色的传输。这种微小纳米结构提供了一种高空间分辨率彩色滤光和光谱成像的方法,具有极其紧凑的器件架构。2011 年 Kaplan 等^[39]提出并制造了用于可见光的金属谐振波导光栅阵列(MRWG),通过改变光栅周期实现了对红、绿、蓝三个不同波段中心波长的透射,这对可见光光谱成像具有很重要的意义。该结构为多层结构,增加了缓冲层和波导层,通过调整缓冲层的厚度有效减小了光谱曲线的带宽。2010 年 Haïdar 等^[40]提出用于中

波红外 3~5 μm 波段的亚波长光栅结构,该结构由金和氮化硅组成一维光栅结构,金层为外部包层,氮化硅在包层内部,通过改变光栅周期 d 和光栅占空比 w 来设计光栅阵列,实现了 10 个波段的快照式多光谱成像。2017 年 Scherr 等^[41] 提出用于长波红外(LWIR)波段的窄带透射亚波长光栅结构,由硅基和空气组成 Two-step 非对称结构,将光栅周期由 4 μm 改变至 5 μm ,实现中心波长 10~11.2 μm 的调谐,该结构与之前一维矩形光栅相比,能够实现窄带高透射的光谱曲线,对长红外波段多光谱成像的发展具有重要的意义。2017 年 Mauser 等^[21] 在 Nature Nanotechnology 发表文章,将亚波长一维光栅和热电学结合,在单个悬浮膜纳米结构上将导模共振吸收和热电偶结合,从而产生一个光电探测机制。光学共振热电纳米线能够实现从可见光到中波红外的窄带可调谐功能,并且是一个快速的 337 μs 的瞬态响应,比传统的热电探测器快 10~100 倍。从成像和光谱学的角度来说,小结构尺寸可以将滤波器和光电探测器功能集成到一个单一结构中。

通过以上总结,学者们设计的一维亚波长光栅阵列适用于各个波段的光谱成像,但由于一维亚波长光栅结构存在偏振效应,使得光通量降低 50%,因此学者们又提出利用二维(2D)结构的对称性实现偏振无关,从而提高光通量。

3.2 二维亚波长光栅阵列

2018 年 He 等^[42] 提出金属-电介质-金属(MDM)亚波长孔阵列,该阵列通过改变光栅周期实现对红、绿、蓝三个波段的透射。将一维光栅中多层结构延伸至二维结构,利用 MDM 层减小光谱带宽,增加光谱分辨率,使其更好地用于快照式光谱成像技术。2018 年 Wang 等^[43] 提出用于中波红外 3.5~7.8 μm 波段的亚波长结构,该结构通过在 GaF₂ 基底上对 Cr 膜刻蚀纳米孔,仅改变光栅周期组成孔阵列,实现了 8 个波段的快照式光谱成像。2019 年 Craig 等^[44] 提出用于中长红外波段的亚波长同轴孔径阵列,其中内环孔径 $R_1 = 0.25P$,外环孔径 $R_2 = 1.4R_1$ 。将周期从 1.7 μm 改变至 3.7 μm ,实现了在 6.2~14.2 μm 的 101 个波段带通滤波,该结构虽然带宽较大,但增大了光谱覆盖范围。

亚波长光栅设计仅局限于一维栅条及二维对称等常规结构,设计及应用范围都较为有限。因此学者们提出应用亚波长概念,使用超材料设计对应的

超平面,在设计更为多样化的同时结构更加紧凑,并且能够满足更多特定的需求。

4 超平面

超平面由超材料结构单元周期性或非周期性排列构成,是一种超薄的二维阵列平面。其中超材料结构单元的本质也是其尺寸小于光的波长,但超材料与亚波长光栅在结构设计上有着很大的区别,亚波长光栅是指由天然材料所设计的结构,而超材料是指具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构,它的性质主要由人工结构决定,而不是由材料的本征性质决定。超材料针对电磁波的具体需求,制造了具有相应功能的结构,这些结构可以通过不同的形状和大小,对光进行吸收、增强或折射。

2018 年 Shaltout 等^[22] 在 Nature Communications 提出在光学腔内嵌入超表面,如图 4 所示,结构底层由银和氧化铝组成,上表面与下表面一致从而构成 Fabry-Perot 腔,在腔内嵌入厚度为 22 nm、周期为 150 nm 的银光栅组成超平面。超平面的嵌入增加了一个相位差,使得光学腔厚度低于 $\lambda/(2n)$ 这一传统的理论值。通过改变光栅的宽度实现对不同波长的透射。相比于亚波长光栅结构,超平面通过特有的设计使得整个阵列具有更小的尺寸,更有利于小型紧凑型芯片的集成。

同年, Tittl 等^[23-25] 在 Nature Photonics 和 Science 上提出将介电超平面与高光谱成像结合实现一个无标记超灵敏的生物检测分析方法。该设计可以从数百万图像像素中获取空间分辨光谱,并使用智能数据处理工具以前所未有的水平(每平方微米少于 3 个分子)提取高通量数字传感信息。纳米光子学和成像光学的组合扩展了介质超平面分析大面积生物实体和原子层叠二维材料的能力。

综合以上应用,将亚波长光栅阵列应用于光谱成像是近年来的研究热点,而超平面与光谱成像的结合也是未来发展的趋势。但是将超平面应用于光谱成像技术中存在一定的难度,首先超平面对超材料的结构设计要求较高;其次超平面目前没有一个完整的理论,因此更多的是探索性设计,给出一个全新的结构然后分析它对光谱分光的性能有什么影响,这样的设计是很费时的;最后超平面可以用来解决更多特定的问题,但对于普通的光谱成像, Fabry-Perot 薄膜型阵列和亚波长光栅阵列足以实现。

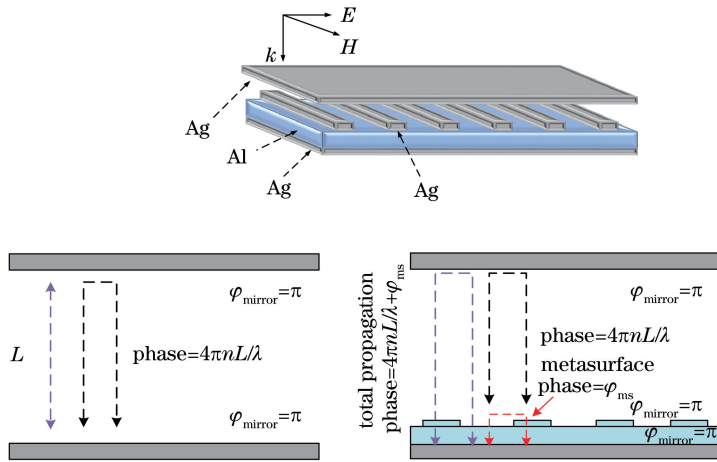


图 4 具有嵌入式超表面的多色光学腔^[22]

Fig. 4 Multicolor optical cavity with embedded metasurface^[22]

5 对比分析

滤光片阵列发展过程如图 5 所示,从早期的彩

色滤光片阵列、Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列到近年的亚波长光栅阵列和超平面。

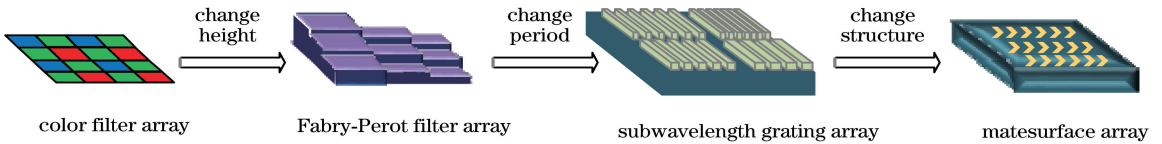


图 5 光谱滤光片阵列发展

Fig. 5 Progress of spectral filter array

本文全面分析其缺点及优点,并总结不同结构滤光片阵列使用的波段范围,如表 1 所示。从表 1 中可以看出,Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列的提出推进了成像设备向小型化、实时化的发展;亚波长光栅阵列的设计解决 Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列膜系

复杂且覆盖波段范围窄的问题;基于亚波长概念提出的超平面设计更为多样化,能够更好地提高光谱分辨率,并使设备更为紧凑,但是超平面对材料的要求以及结构的设计要求都很高,因此超平面的设计是未来光谱滤光片阵列的主要发展趋势。

表 1 滤光片阵列总结表

Table 1 Summary of filter array

Type	Structure	Membrane system	Bandwidth	Number of band	Transmission / reflection	Applicable band
Color filter array	Huge	Multi	Large	Few	Large	VIS
Fabry-Perot thin film array	Compact	Multi	Small	Multi	Large	VIS-IR
1D subwavelength grating	Compact	Single	Large	Multi	Small	UV-LWIR
		Two-step	Small		Large	
2D subwavelength grating	Compact	Single	Large	Multi	Small	VIS-MIR
		Multi	Small		Large	
Metasurface	Compact	—	Small	Multi	Large	Full band

6 结 论

光谱滤光片阵列作为确定成像设备光谱性能的主要元件,其结构的设计是学者们一直研究的热点。

不同结构的光谱滤光片阵列具有不同的优缺点及适用范围,Fabry-Perot 薄膜滤光片阵列和亚波长光栅阵列共同推进了光谱成像设备向小型化、实时化的发展。超平面的应用使得光谱成像设备能够解决更

多特定的问题,但是对超材料以及结构的设计要求都较高,这也是未来光谱滤光片阵列发展的主要趋势。

参 考 文 献

- [1] Abdelsalam A M, Sayed M S. Real-time defects detection system for orange citrus fruits using multi-spectral imaging [C] // 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). 16-19 Oct. 2016, Abu Dhabi, United Arab Emirates. New York: IEEE Press, 2016:1-4.
- [2] de Biasio M, Arnold T, Leitner R, et al. UAV-based environmental monitoring using multi-spectral imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7668: 766811.
- [3] Lu G, Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review [J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19 (1):10901.
- [4] Garini Y, Young I T, McNamara G. Spectral imaging: principles and applications [J]. Cytometry. Part A: the Journal of the International Society for Analytical Cytology, 2006, 69(8):735-747.
- [5] Zheng Y Q, Yu B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1):75-80.
郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览 [J]. 遥感学报, 2002, 6(1):75-80.
- [6] Gao Z D, Hao Q, Liu Y, et al. Hyperspectral imaging and application technology development [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019 (4): 24-34.
高泽东, 郝群, 刘宇, 等. 高光谱成像与应用技术发展 [J]. 计测技术, 2019(4):24-34.
- [7] Shepherd F D, Mooney J M, Reeves T E, et al. SWIR variable dispersion spectral imaging sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6660:66600J.
- [8] Carter M R, Bennett C L, Fields D J, et al. Livermore imaging Fourier transform infrared spectrometer (LIFTIRS) [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2480:380-386.
- [9] Lin J N, Tong Q, Lei Y, et al. An arrayed liquid crystal Fabry - Perot infrared filter for electrically tunable spectral imaging detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8):2397-2403.
- [10] McCully S. NIRCcam filter wheels [C] // Optics & Photonics. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [11] Hagen N A, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 090901.
- [12] Zhou W C, Wu Y H, Hao P, et al. Transmission bandpass filters based on two-dimensional subwavelength metallic gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11):1105001.
周文超, 吴一辉, 郝鹏, 等. 二维亚波长金属光栅多波长透射滤光片 [J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1105001.
- [13] Morishita M, Takanari T, Hamada Y, et al. A color television camera using a single interline transfer CCD image sensor with color filter array [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1981, 27(1): 1-12.
- [14] Brauers J, Aach T. A color filter array based multispectral camera [J]. Workshop Farbbildverarbeitung, 2006.
- [15] Geelen B, Jayapala M, Tack N, et al. Low-complexity image processing for a high-throughput low-latency snapshot multispectral imager with integrated tiled filters [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8743:87431E.
- [16] 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.
- [17] Lambrechts A, Gonzalez P, Geelen B, et al. A CMOS-compatible, integrated approach to hyper- and multispectral imaging [C] // 2014 IEEE International Electron Devices Meeting. 15-17 Dec. 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014:10.5.1-10.5.4.
- [18] Lee H S, Yoon Y T, Lee S S, et al. Color filter based on a subwavelength patterned metal grating [J]. Optics Express, 2007, 15(23):15457-15463.
- [19] Laux E, Genet C, Skauli T, et al. Plasmonic photon sorters for spectral and polarimetric imaging [J]. Nature Photonics, 2008, 2(3):161-164.
- [20] Vincent G, Sakat E, Ghenuche P, et al. Spectral filtering with subwavelength gratings: overview and latest advances [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8268:826807.
- [21] Mauser K W, Kim S, Mitrovic S, et al. Resonant thermoelectric nanophotonics [J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(8):770-775.
- [22] Shaltout A, Kim J, Boltasseva A, et al. Ultrathin and multicolour optical cavities with embedded metasurfaces [J]. Nature Communications, 2018, 9

- (1):2673-2679.
- [23] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. *Science*, 2018, 360(6393):1105-1109.
- [24] Yesilkoy F, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(6):390-396.
- [25] Cao F C, Fang J Y, Zhao D. Development of UAV-borne multispectral camera based on narrow bandwidth filter array[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1):51-55.
曹丛峰, 方俊永, 赵冬. 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制[J]. *光学技术*, 2018, 44(1):51-55.
- [26] Xu W. Design and fabrication of micro Fabry-Perot tunable filter [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011:3-9.
许蔚. 微 F-P 腔可调谐滤波器的研究与制备 [D]. 武汉:华中科技大学, 2011:3-9.
- [27] Du P S, Guo J, Dong Q M. Application of liquid crystal tunable filter in multispectral imager [J]. *Infrared*, 2007, 28(11):4-8.
杜培胜, 郭靖, 董前民. 液晶可调谐滤光片及其在光谱仪上的应用[J]. *红外*, 2007, 28(11):4-8.
- [28] Wang S W, Li M, Xia C S, et al. 128 channels of integrated filter array rapidly fabricated by using the combinatorial deposition technique [J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(2):281-284.
- [29] Walls K, Chen Q, Grant J, et al. Narrowband multispectral filter set for visible band [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20):21917-21923.
- [30] Wang S S, Moharam M G, Magnusson R, et al. Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(8):1470-1474.
- [31] Wang S S, Magnusson R. Multilayer waveguide-grating filters [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14):2414-2420.
- [32] Magnusson R, Wang S S. Transmission bandpass guided-mode resonance filters [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(35):8106-8109.
- [33] Tibuleac S, Magnusson R. Narrow-linewidth bandpass filters with diffractive thin-film layers [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(9):584-586.
- [34] Lemarchand F, Sentenac A, Giovannini H. Increasing the angular tolerance of resonant grating filters with doubly periodic structures [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(15):1149-1151.
- [35] Sentenac A, Fehrembach A L. Angular tolerant resonant grating filters under oblique incidence [J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2005, 22(3):475-480.
- [36] Kroker S, Brückner F, Kley E B, et al. Enhanced angular tolerance of resonant waveguide grating reflectors[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4):537-539.
- [37] Lim S H, Yu E T. Ultraviolet and solar-blind spectral imaging with subwavelength transmission gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(16):161107.
- [38] Xu T, Wu Y K, Luo X G, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nature Communications*, 2010, 1(5):1-5.
- [39] Kaplan A F, Xu T, Jay Guo L. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(14):143111.
- [40] Haidar R, Vincent G, Collin S, et al. Free-standing subwavelength metallic gratings for snapshot multispectral imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(22):221104.
- [41] Scherr M, Barrow M, Phillips J. Long-wavelength infrared transmission filters via two-step subwavelength dielectric gratings[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3):518-521.
- [42] He X, O'Keefe N, Sun D C, et al. Plasmonic narrow bandpass filters based on metal-dielectric-metal for multispectral imaging[C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). 29 July-3 Aug. 2018, Hong Kong, Hong Kong, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2018:1-2.
- [43] Wang A, Dan Y P. Mid-infrared plasmonic multispectral filters[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:11257.
- [44] Craig B, Meng J J, Shrestha V R, et al. High-resolution mid-infrared spectral reconstruction using a subwavelength coaxial aperture array[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington, D. C. : OSA, 2019.