中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

手机嵌入式快照成像光谱仪的研制

田久谊

Snapshot imaging spectrometer for mobile phone

TIAN Jiu-yi

引用本文:
田久谊. 手机嵌入式快照成像光谱仪的研制[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 770–779. doi: 10.37188/CO.2021–0209
TIAN Jiu-yi. Snapshot imaging spectrometer for mobile phone[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 770-779. doi: 10.37188/CO.2021-0209

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021–0209

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望

Advances and prospects of molding for optical microlens array

中国光学. 2017, 10(5): 603 https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0603

LED微阵列投影系统设计

Design of projection system for a micro–LED array

中国光学. 2019, 12(1): 88 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0088

基于智能手机的眼底成像系统

Smartphone–based fundus imaging system

中国光学. 2019, 12(1): 97 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0097

LAMOST高分辨率光谱仪研制

Construction of a LAMOST high resolution spectrograph

中国光学. 2019, 12(1): 148 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0148

用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

中国光学. 2019, 12(2): 294 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0294

紫外双光栅光谱仪结构设计与波长精度分析

Structure design and wavelength accuracy analysis of ultraviolet double grating spectrometer

中国光学. 2018, 11(2): 219 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0219

文章编号　2095-1531(2022)04-0770-10

手机嵌入式快照成像光谱仪的研制

田久谊*
（陕西快谱深光科技有限公司，陕西 西安 710065）

摘要：目前手机摄像头已经具备在空间（*x-y* 方向）和深度（*z* 方向）维度上获取成像信息的能力，而在光谱维度的信息获取上一直停留在 RGB 三色上，受困于手机平台的尺寸限制，传统的成像光谱仪很难嵌入。本文基于多通道阵列滤光片、微透镜阵列成像和一体化集成制造技术，完成了系统整体设计、关键部件设计制造、整体装配，并实验验证了光谱成像。系统整体物理尺寸小于 Φ6×6 mm，光谱分辨率为 8 nm，光谱范围为 0.53~0.68 μm。实验研究表明，对不同颜色的实物成像，可以获得物体任意部位的光谱曲线，验证了快照式光谱仪的设计指标。该光谱仪具备了嵌入手机的基本条件，此研究有望推动成像光谱仪在手机上集成应用。

关　键　词：成像光谱仪；滤光片阵列；微透镜阵列
中图分类号：O439　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.37188/CO.2021-0209

Snapshot imaging spectrometer for mobile phone

TIAN Jiu-yi*
(*Shannxi Snap-spectrum Deep-light Technology Co. ltd.*, *Xi'an* 710065, *China*)
∗ *Corresponding author*, *E-mail*: *jiuyi_tian*@163.*com*

Abstract: At present, the mobile camera has the ability to obtain imaging information in the space (*x-y* direction) and depth (*z* direction) dimensions while the acquisition of spectral information has been stuck in RGB tricolor. Limited by the size of the mobile platform, the traditional imaging spectrometer is difficult to be embedded. Based on the integrated manufacturing technology of multi-channel array filters, micro-lens array imaging and integration, this paper completes the overall design of the system, the design and manufacture of the key components and overall assembly. The spectral imaging is verified experimentally. The overall physical size of the system is less than Φ6 × 6 mm, the spectral resolution is 8nm, and the spectral range is 0.53−0.68μm. The experimental results show that the spectral curves of any part of the object can be obtained by imaging the object with different colors, which verifies the design index of the snapshot spectrometer. With the basic conditions of embedding the technology into mobile phones, the system is expected to promote the integrated applications of imaging spectrometers.

Key words: imaging spectrometer; filter array; micro-lens array

收稿日期：2021-12-06；**修订日期：**2022-01-10
基金项目：陕西省重点研发计划（产业创新链项目）（No. 2021ZDLGY12-05）
Supported by Key R&D Plan of Shaanxi Province (Industrial Innovation Chain Project) (No. 2021ZDLGY12-05)

1 引　言

手机的照相功能已经成为各个厂商技术比拼的重点内容之一，其主要包含二维空间(x-y 向)图像和三维深度图像 (z 向) 的获取，但多光谱成像还是空白。多光谱成像在物体真假识别、蔬菜水果农药残留、化妆品重金属检测等消费领域具有优势，消费级的手机如果具备多光谱成像功能，将极大拓宽其应用领域和提升消费体验。目前的光谱成像主要应用于在机、星载资源勘查[1-2]、军事目标的多光谱伪装识别[3]、专业计量测试结构的专业检测[4] 等领域，鲜有消费级别的应用报道。这些领域对光谱成像的体积、光谱分辨率、时间分辨率的要求和消费电子领域应用的差别巨大。据我们所知，到目前为止，还没有能够嵌入手机的商业化微小型快照式光谱成像相机的报道。华为公司 2021 年发布的 P50 Pro 和 2022 年发布的 P50 Pocket 手机，也仅仅是分别嵌入了 5 和 10 通道的光谱传感阵列，主要用于色温处理[5-6]。但是这种趋势表明，急需能嵌入手机的、消费级别的快照式光谱相机。目前主要技术壁垒在于如何在兼具高光谱分辨率和适中空间分辨率的前提下做到小体积。

根据光谱的获取方式，可以将目前的光谱成像仪分为色散型、滤光片型和干涉型，它们要求的成像光学系统结构差别较大，进而影响光谱重构方式、体积重量等诸多指标。对于扫描式色散型光谱成像仪，其通过摆扫和推扫并结合线阵和面阵探测器件，经过棱镜或者光栅色散原件分光，从而实现光谱和空间维度的成像探测[7]；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要求，但是其独特的干涉数据获取方式对搭载平台的稳定度及光谱图像反演提出了很高的要求[8]。这两类成像光谱仪由于其体积和重量较大，不适合手机嵌入使用。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，而是采用电调谐和液晶调谐的方式，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]。编码成像技术是近年来发展的光谱成像技术，其通过光谱编码和解码，实现高空间分辨率和光谱分辨率[10]。这些技术均需要复杂的光谱图像重构技术，时间分辨率较低且体积庞大，也不适用于手机的应用。

从时间分辨率角度看，快照式成像光谱相机更接近消费级别的应用场景，文献 [11] 综述了快照式光谱成像技术的相关进展，探讨了图像分割、孔径分割、光路分割和频率分割的光谱成像技术途径，并详细分析了多种技术方案的原理、优点、缺点与现状，从空间像素数与光谱通道数权衡、图谱匹配、空间采样连续性、光能利用率及动态范围 5 个方面进行了对比和展望[11]。认为在应用快照式光谱成像仪时，应根据实际需要权衡空间分辨率与光谱通道数(光谱分辨率)。

从体积角度讲，能搭载在手机平台上，是快照成像光谱仪快速走进民用消费市场的核心目标。近年来发展起来的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，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[12]。尤其是它兼顾了体积、重量以及光谱分辨率、时间分辨率等主要技术指标，然而现阶段均处于实验室研究阶段，距离实际工程应用还有一定的距离。

从光谱分辨率角度看，近年发展起来的深度学习方法,在不增加硬件的前提下，通过前期大量的数据训练，从软件和硬件层面实现光谱识别和分辨率提高。这些成果极大地丰富了成像光谱仪的技术途径，但是离成熟的商用成像光谱仪的技术方案还较远，需要做更多的工作[13-14]。

显然，设计和制造微型光谱成像仪的主要技术难点在于，在较小空间内设计出满足光谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率的光学系统结构以及实现光谱成像[11-12, 14]。目前报道的可以用在快照式光谱成像仪的光学系统结构[15-16] 和滤光结构主要有微纳光栅[17]、微纳滤波芯片[18]、多通道阵列滤光片[14,19] 等。滤光片基本采用 F-P 腔[12,14,17,19]、亚波长光栅[12,20]、以及超表面[13,18,21] 结构。其能够满足 CMOS 的像素尺寸和像素规模，在光谱分辨率和空间分辨率之间取得平衡，与实际应用场景相匹配[14]。手机平台不需要高光谱分辨率，中等空间分辨率即能满足消费者的基本应用需求。显然，多通道阵列滤光片技术是实现该应用场景的最有可能的技术途径之一[14,22-24]。

本文采用多通道阵列 F-P 滤光片[19] 及复合微透镜阵列成像[22]，采用集成制造技术，设计并实验验证了一款小尺寸的成像光谱仪，其有效物理尺寸小于 Φ6×6 mm。该方案解决了阵列滤光片的制备以及一体化装配等技术工艺，其光谱分辨率为 8 nm，光谱范围为 0.53~0.68 μm，实验验证

了快照式光谱仪的设计指标，证明其具备了嵌入手机等小平台的必要条件。

2 基本原理和技术方案

2.1 基本原理

图 1(彩图见期刊电子版) 是基于阵列滤光片的光谱成像系统的基本结构，通过阵列滤光片和微透镜阵列复合应用，实现多光谱成像。该成像系统中集成的滤光薄膜阵列和复合微透镜阵列的光学组件是光谱成像的核心部件，决定着系统的技术指标。

工作中，物光通过滤光片阵列，进入子孔径成像阵列，成像在 CCD 上，由于滤光片阵列的通带不一样，因此各个子孔径成像的光谱成份不一样，通过图像匹配和数据反演，可以获得物体上任一点的光谱成份。实际上，由于各个子孔径的视场存在差异，各个子孔径上的物体像视场也存在差异，需要后续的图像处理进行匹配各个物点，实现光谱曲线提取。

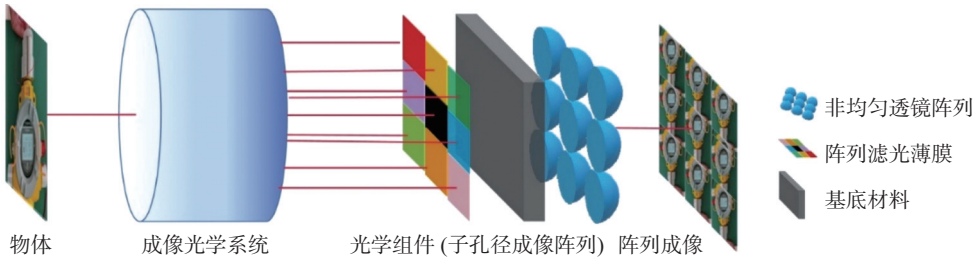


图 1 阵列滤光片的光谱成像系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the spectral imaging system of an array filter

2.2 技术方案和指标

本文选用的 CMOS 基本参数指标如表 1 所示，根据其有效的图像区域物理尺寸 3.6 mm×4.8 mm，设计和其匹配的滤光片和微透镜阵列尺寸。

表 1 CMOS 的基本参数指标

Tab. 1 Basic parameters and indicators of CMOS

芯片型号	有效像素	图像区域	最低照度	视频制式
1/3 CMOS	760(H)×586(V)	4.8 mm×3.6 mm	0.008 Lx	PAL/NTSC

为了保证视场以及适应手机嵌入应用，设计了 3×4 共计 12 个光谱通道，每个子孔径的像方尺寸为 1.2 mm×1.2 mm，像方视场由微透镜决定，原理样机的光谱范围确定在 0.53~0.68 μm 之间(受限于 F-P 腔滤光片的带宽)，对应光谱宽度为 ~100 nm(峰值波长之差)；根据通道数(12 个)，则系统的光谱分辨率为 8 nm。

3 系统设计和实现

3.1 光学组件的设计和研制

光学组件的设计包含滤光片的设计和微透镜阵列的设计两部分。滤光片设计主要采用 F-P 腔的基本理论[14, 19]，通过优选材料色散，选用初始结构，经过膜系优化后，获得的 12 通道的波长范围为 0.53~0.68 μm，半高宽为 8 nm；微透镜阵列的单孔径设计采用高次非球面，光学系统参数和滤光阵列的基本参数如图 2(彩图见期刊电子版) 所示。

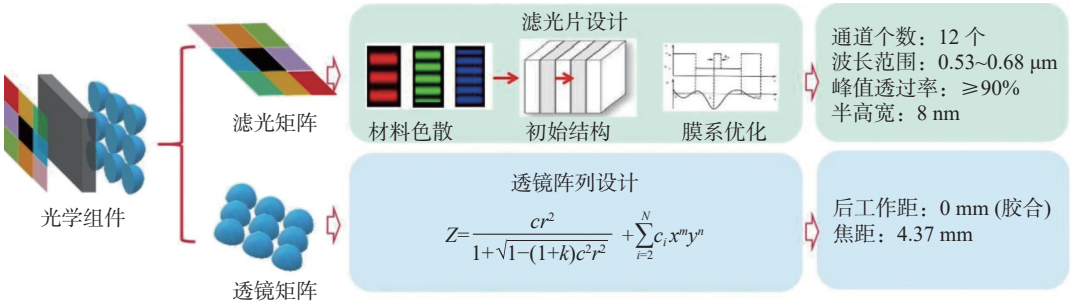


图 2 阵列滤光片组件设计方法

Fig. 2 Design method of the array filter assembly

3.1.1　膜系设计和制备

F-P 型单腔层滤光片的基本膜系结构为 G|(LH)^S(a2L)(HL)^S|A, G 为基底; A 为入射介质; H 为高折射率材料; L 为低折射率材料; H 和 L 表示其光学厚度都为 $\lambda/4$; (LH)^S 和 (HL)^S 为 F-P 膜系的上下反射膜堆, S 为上下反射堆结构的周期数; (a2L) 为整个膜系中的腔层, 也称之为间隔层, 其中, a 表示窄带滤光片的干涉级次, 2L 表示其光学厚度为 λ/2。由此, 确定膜系结构为: (LH)^5 2L (HL)^5, 其中, L 表示低折射率材料二氧化硅, H 表示高折射率材料钛酸镧 (H4)。经过优化, 得到 12 通带的窄带滤光片透过率曲线, 如图 3(彩图见期刊电子版) 所示。其透过率保持在 90% 以上, 截至带−40 dB, 半高宽平均为 8 nm。在 0.53~0.68 μm 内分布了 12 个光谱通道。

采用光刻技术实现阵列滤光片阵列制备的工艺路线如图 4(彩图见期刊电子版) 所示。首先, 在基底上采用成熟的 lift-off 工艺涂敷光刻胶 (AZ5214)[19]; 然后, 在图示的掩模板下曝光, 掩模板的透过区尺寸为 1.2 mm×1.2 mm, 经过显影获得需要的单通道图案; 在图形化的基底上制备陷波滤光片膜系, 最后采用丙酮剥离后, 获得图示的多通道结构; 经过 12 次迭代, 获得 12 个通道的阵列率滤光片。实验过程中光刻过程的基本工艺参数详细见前期工作[25]。

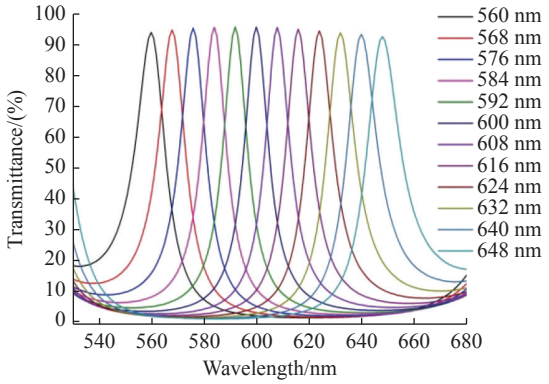


图 3　3×4 通道滤光片理论透过率

Fig. 3　Theoretical transmittance of 3×4 channel filter

制备的 12 通道滤光片的透过率测试结果如图 5(彩图见期刊电子版) 所示, 和设计结果基本吻合。差距主要表现在峰值透过率上, 出现差距的原因主要是膜系制备和测试误差。表 2 列出了本工作制备的滤光片和其他滤光片的性能对比。可见, 相比于采用电子束光刻制备的金属-介质-金属阵列滤光片、超表面滤光片在半高宽以及透过率上优势明显[14,26-28], 在主要技术指标, 半高宽和峰值透过率上均表现出了较高性能。

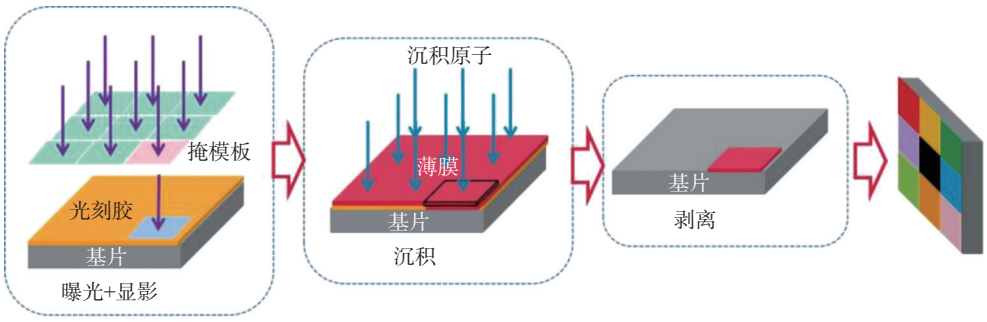


图 4　阵列滤光片的工艺路线

Fig. 4　Process route of an array filter

表 2　滤光片性能对比

Tab. 2　Performance comparison of the filters

序号	光谱范围/nm	通道个数	半高宽/nm	平均峰值透过率/%	主要结构	参考文献
1	470~620	12	~10	~85	介质高反/二氧化硅/介质高反	[27]
2	722~880	128	1.72~3.84	~45%	介质高反/二氧化硅/介质高反	[26]
3	415~725	8	~81	~68.9	Ag高反/ 光刻胶 /Ag高反	[14]
4	400~800	5	~100	~45	Al 超表面	[28]
5	460~630	9	~27	71.2	Ag高反/ 光刻胶 /Ag高反	[14]
6	530~680	12	~8	83	介质高反/二氧化硅/介质高反	本工作

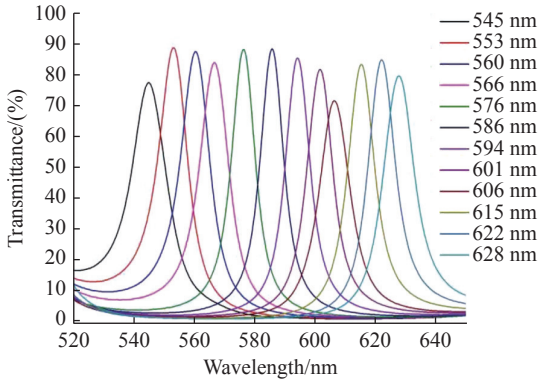


图 5　测试的 12 通道的光谱透过曲线

Fig. 5　Spectral transmission test curve for the 3×4 channels

3.1.2　微透镜设计和制备

采用 Zemax 开展设计工作，公式 (1) 给出了经过优化后的微透镜表面面形函数。

$$Z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}\quad,\qquad(1)$$

式中，r 为非球面上任一点到光轴的距离，c 为非球面顶点处的曲率，k 是二次曲面的圆锥系数，k<1 表示双曲面，k=−1 表示抛物面，−1<k<0 表示椭球面，k=0 表示球面，k>0 表示扁平椭球面。设计结果为：基圆曲率半径为 2.18 mm，c=0.46，k=−0.50，设计的面矢高最大值为 82.30 μm。

图 6(a) 给出了模拟光线追踪示意图。图 6(b) 给出了 3×4 阵列透镜的空间位置关系和几何尺寸，可以模拟成 3×4 阵列通道图像 (图 6(c)，彩图见期刊电子版)。设计结果表明系统在 7°视场和后工作距为 0 mm(镜头和 CMOS 胶合) 时，对应单孔径的 MTF 值在 120 l/mm 空间频率下大于 0.3 (图 6(d)，彩图见期刊电子版)，说明系统具有良好的成像特性。

经过单点车加工后的透镜阵列表面形貌如图 7(a)(彩图见期刊电子版) 所示，基本工艺参考论文 [16]。由图 7(a) 可以清楚看出 12 通道的微透镜阵列。图 7(b) 给出 7(a) 中虚线所示方向的轮廓曲线，和设计的理论曲线相比，复现了设计面型。测试的最大失高为 83.48 μm，和设计结果相差 1.18 μm，相对误差小于 1.4%，可保证后续的成像实验。

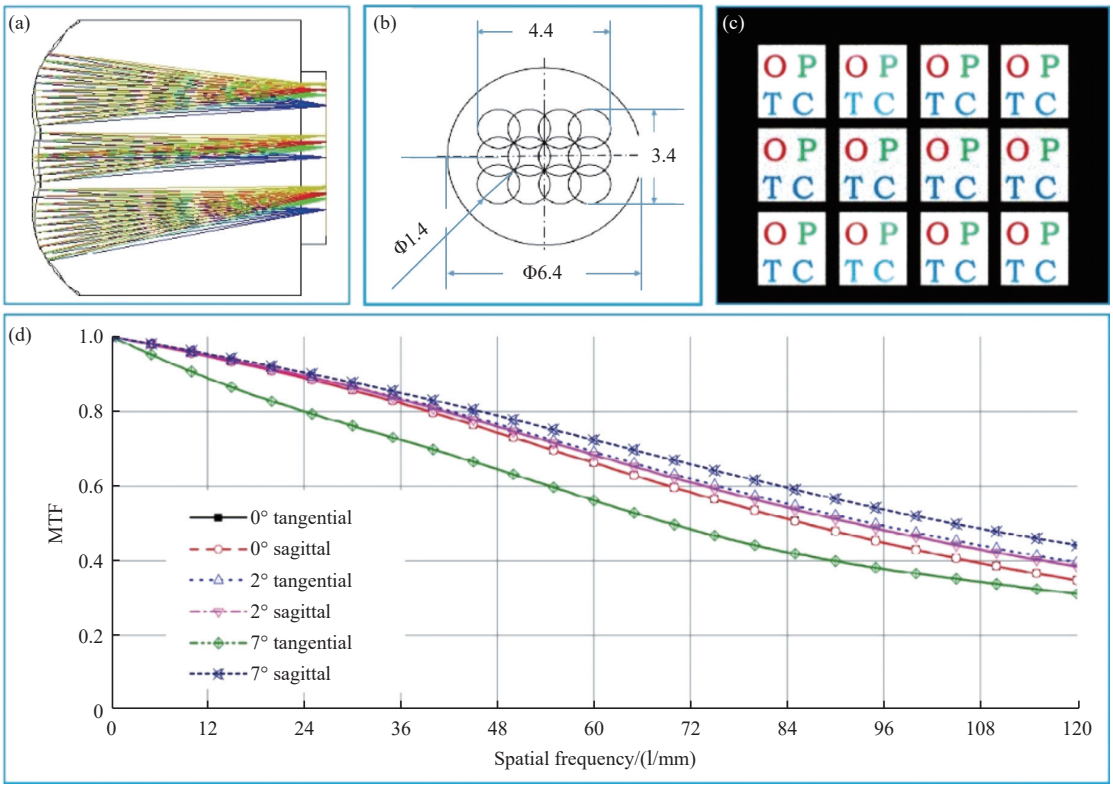


图 6　微透镜阵列设计结果。(a)光线模拟图，单位 mm；(b)3×4 阵列透镜的空间位置关系；(c)模拟 3×4 阵列像；(d)MTF 曲线

Fig. 6　Design results of the microlens array. (a) Simulation diagram of light tracing; (b) spatial position relationship of the 3×4 array lens; (c) simulated 3×4 array images; (d) MTF curves

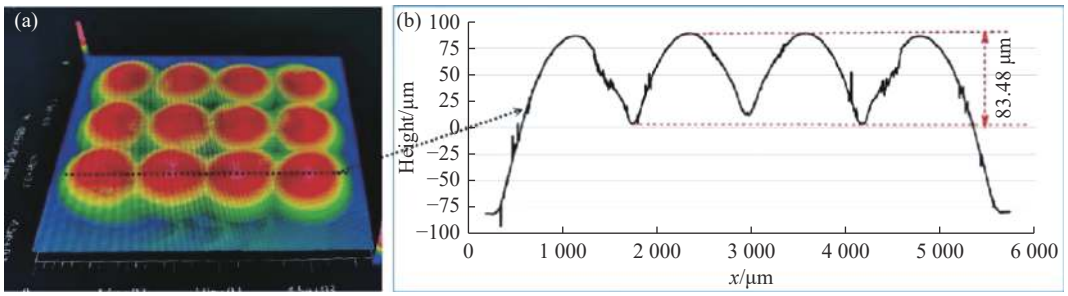


图 7　微透镜加工效果图。(a)表面形貌; (b)轮廓曲线

Fig. 7　Processing effect of microlens. (a) Surface morphology; (b) contour curve

3.2　系统装配和成像分析

为了满足手机狭小空间的需求, 装配主要采用胶合工艺, 装配中选用的紫外胶合剂参数和胶合工艺参数分别如表 3 和表 4 所示。为了监控胶合是否对准, 采用动态的监控过程。

表 3　紫外胶合剂参数

Tab. 3　Parameters of the UV adhesive

名称	粘度 25 °C	固化后折射率	拉伸极限	弹性模量(PSI)	抗拉强度(PSI)
NOV61	300 cps	1.56	38%	150000	3000

表 4　胶合基本工艺和参数

Tab. 4　Basic gluing process and parameters

光源波长	光功率密度	预固化时间	固化时间	点胶设备
365 nm	700 mW/cm^2	30 s	>10 min	尔谷光电(JZ04-365-04)

胶合前的部件如图 8(a) 所示, 包含微透镜阵列, 阵列滤光片以及 CMOS 芯片。胶合后的快照光谱成像仪如图 8(b) 所示, 其镜头的有效尺寸为 3.6 mm×4.8 mm, 完全容纳在直径为 6 mm 的圆内, 匹配 CMOS 的有效敏感面积; 所设计的微透镜阵列厚度为 5 mm, 滤光片厚度为 0.5 mm, 合计不超过 6 mm, 具备了嵌入手机的必要条件。

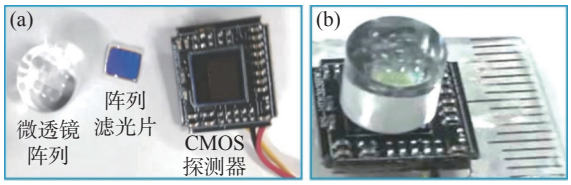


图 8　(a)装配前及(b)装配后的快照式光谱相机

Fig. 8　Snapshot spectral camera (a) before assembly and (b) after assembly

4　实验验证

图 9(a)(彩图见期刊电子版) 给出了成像验证的具体光路和配置图, 通过更换目标物体的颜色(光谱)来模拟不同的光谱目标, 作为光谱成像系统的输入。图 9(b)(彩图见期刊电子版) 给出了图 9(a) 中绿色目标的 12 通道光谱像, 其中通道 1 到 12 分别对应图 5 中的 12 个波长通道。这 12 个通道的能量强弱不同, 由此可以获得输入物体含有的不同光谱成份。将目标物体的颜色分别

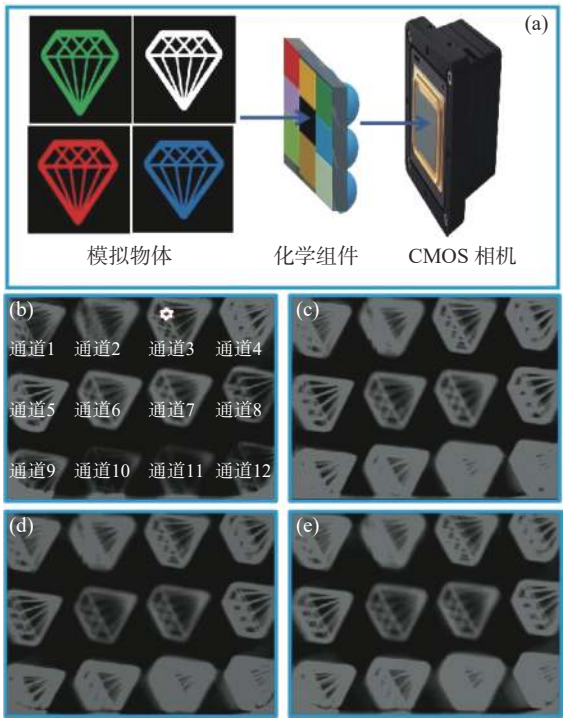


图 9　实验测试结果。(a)光学布局; (b)绿色、(c)白色、(d)红色、(e)蓝色物体的光谱像

Fig. 9　Experimental test results. (a) Optical layout; spectral images of a (b) blue, (c) white, (d) red and (e) blue object

换为白色、红色和蓝色后，对应的 12 通道光谱像分别如图 9(c)~9(e) 所示。显然对于同一目标的 12 通道图像，其强弱分布不同，这表明目标含有不同的光谱成份。

对于绿色目标，含有的光谱成份主要集中在绿色光波段，所以通道 1-4 的光强明显高于通道 9-12；对于红色目标，通道 9-12 的像光强明显高于其他通道，符合红色目标的光谱成份；而对于蓝色目标的光谱像，光谱成份超出了系统的光谱范围，但是其仍然具有光谱分辨能力，其 12 通道的像强弱明显不一致；对于白色目标，同时含有红色、蓝色和绿色目标像的光谱信息，因此从 12 通道的目标像上看，相对于绿色和红色目标像，其 12 通道的强度都较强，符合实际目标的光谱成份。

由图 9 可知，模拟的光谱物体 (图 9(a)) 中的图像边缘轮廓清晰，而实验获得的光谱像边缘模糊，和图 6(a) 给出的 MTF 相差较大。原因在于图 6(a) 给出的仅仅是单孔径的模拟曲线，实际拍摄中，由于相邻孔径之间的干扰较大，实际的分辨率距离理论 MTF 较大，造成实际光谱像边缘模糊。

另外，对应同一物体的 12 通道的光谱像，通过选取 12 通道目标像上同一位置的信号强度（图 9(b) 中红色五角星所示位置），即可获得物体上该点的光谱曲线。图 10 给出了图 9(b) 上图示点的光谱曲线（虚线），同时也采用了光纤光谱仪测试了该位置点光谱成份曲线（实线），二者具有类似的变化趋势。由于目标是绿色物体，其光谱主要集中在绿色波长的谱段，所以 540~580 nm 波段强度相对较高；成像光谱仪的光谱曲线较光纤光谱仪测试曲线有 20 nm

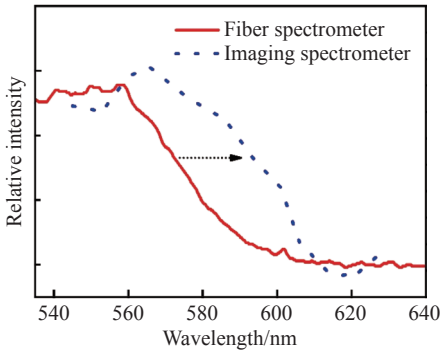


图 10 图 9(b)所标点的光谱曲线（实线：微光纤光谱仪测试结果，虚线：成像光谱仪测试结果）

Fig. 10 Spectral curve marked in Fig. 9 (b) (solid line: micro fiber spectrometer test results, dotted line: imaging spectrometer test results)

的红移，原因在于图中选点位置和光纤光谱仪测试的位置存在偏差，而且所研制的样机相邻通道存在串扰，这两个原因共同导致该红移。

本文的光谱标定方法和传统光谱仪不同，传统光谱仪标定主要工作是：确定线阵 CCD 像素对应的光谱波长。由于成像系统具有非线性，因此需要波长标定[29-30]。本文中的光谱准确度其实源自滤光片透过率测试的准确性，测试滤光片透过率的设备是经过国防一级计量站定标的分光光度计。成像系统中 CCD 被分割成 3×4=12 通道，每个通道对应一个光谱像，其对应的定标波长就是滤光片的中心波长[12,24]。

表 5 给出了所研制的快照式光谱仪的技术指标和相关文献报道的光谱成像仪的对比情况。从表中可以看出，目前报道的成像光谱仪最小尺寸在，均远远超过手机嵌入式镜头的基本尺寸（Φ8×6 mm）[22,31-33]；另外，从光谱分辨率角度分析，本文实现的硬件分辨率达到了 8 nm，均优于其他

表 5 成像光谱仪技术指标对比

Tab. 5 Comparison of technical indexes of the imaging spectrometer

序号	结构	光谱分辨率/nm	时间分辨率	整体尺寸/mm	光谱图像获取方式	报道时间/年	参考文献
1	芯片滤光阵列	10	和CMOS芯片同步	11.2×11.2, 不带镜头	直接获取	2014	[27]
2	子孔径复合阵列滤光片	10	计算重构	原理样机平台搭建	计算重建	2019	[31]
3	子孔径复合阵列滤光片	50	计算重构	原理样机平台搭建	计算重建	2004	[32]
4	芯片滤光阵列	10	和CMOS芯片同步	实物样机约几十mm	直接获取	2019	[33]
5	傅立叶变换成像光谱仪	/	/	原理设计	计算重构	2020	[8]
6	芯片滤光阵列	计算超分后5.2 nm	计算重构	原理样机平台搭建	计算重构	2021	[22]
7	子孔径复合阵列滤光片	8	和CMOS芯片同步	功能样机Φ6×6	直接获取	2022	本工作

文献报道的光谱分辨率，略低于文献 [22] 计算重构后的分辨率[22]，但经过后续的超光谱算法，有望实现更高的光谱分辨率。

5　目前的不足和后续研究

根据硅探测器的光谱范围以及实际光谱识别物体的需要，光谱范围为 400~1 000 nm，分辨率需达到 2 nm 以下，本文设计的快照式光谱成像仪可以满足实际的部分需求，比如色温测量、农药残留等[4-6]。目前研制的样机离应用还有差距，是下一步努力的方向。

另外，众所周知，光谱分辨率、空间分辨率以及光谱范围三者是相互制约的关系，依靠硬件手段同时使三者满足要求，实际设计中存在巨大的困难[14-15]，并且还受限于手机平台的尺寸要求。作者认为通过深度学习算法实现光谱分辨率超分辨是解决此类问题的有效方法。对于这一点，也有相关的研究。2021 年，Zhang 等人指出经过深度学习，实现了光谱超分辨，验证了该方法的有效性[22]，但尚需要进一步缩小镜头尺寸，以适应手机等平台的尺寸要求。

标定涉及到两类参数定标：一是光谱定标；一是辐射定标。从消费应用层面来看，光谱定标更重要，因为后续应用场景主要是利用光谱的特征峰开展物体识别[4]。而辐射定标对于专业的测试计量意义较大。论文研制的这类多孔径系统，确实普遍存在视场不一致的事实[15]，该视场差会导致图像相面辐照度不均匀，其影响的是光谱曲线强度的准确性，而不会影响光谱定标的准确性。而面对嵌入手机成像光谱仪的应用场景，更关心的是波长准确性，少许的强度偏差可以通过后续的软件算法和深度学习修正，这些工作将在二代工程样机中实现。

6　结　论

面向手机内置光谱成像的迫切需求，解决目前智能手机端无法实时获取成像光谱信息的行业痛点，开发出一种快照式紧凑型光谱成像仪。通过精密光学设计、复杂光场调制、先进的光学制造和装备，实现光谱、空间等多维度信息的融合获取。其光谱分辨率为 8 nm，光谱范围为 0.53~0.68 μm。实验研究验证其可以实现不同颜色的实物成像，获得任意物体部位的光谱曲线，快照式光谱仪的设计指标初步具备了嵌入手机平台的基本条件。未来有望搭载手机平台，应用于重金属残留、水果蔬菜的农药残留、色温、儿童玩具衣服荧光剂残留、女性化妆品鉴别等领域检测和识别。

参考文献：

[1] 张宏宇, 韩波, 王啸虎, 等. 资源一号02D卫星总体设计与技术特点[J]. 航天器工程, 2020, 29(6): 10-18.
ZHANG H Y, HAN B, WANG X H, *et al*.. System design and technique characteristic of ZY-1-02D satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(6): 10-18. (in Chinese)

[2] 李娜, 董新丰, 甘甫平, 等. 资源一号02D卫星高光谱数据地质调查应用评价[J]. 航天器工程, 2020, 29(6): 186-191.
LI N, DONG X F, GAN F P, *et al*.. Application evaluation of ZY-1-02D satellite hyperspectral data in geological survey[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(6): 186-191. (in Chinese)

[3] 王启超, 赵大鹏, 汪家春, 等. 多光谱偏振探测对伪装目标的识别研究[J]. 光电工程, 2013, 40(3): 29-34.
WANG Q CH, ZHAO D P, WANG J CH, *et al*.. Recognition of camouflage targets with multi-spectral polarization detection system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(3): 29-34. (in Chinese)

[4] 吉海彦, 任占奇, 饶震红. 高光谱成像技术鉴别菠菜叶片农药残留种类[J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1778-1784.
JI H Y, REN ZH Q, RAO ZH H. Identification of pesticide residue types in spinach leaves based on hyperspectral imaging[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(12): 1778-1784. (in Chinese)

[5] 知科技. 华为 P50 Pro 摄像头评测: 所有领域的翘楚[EB/OL]. (2021-08-13). https://g.pconline.com.cn/jxwd/1440/14409689.html.
ZHIKEJI. Huawei P50 Pro camera evaluation[EB/OL]. (2021-08-13). https://g.pconline.com.cn/jxwd/1440/14409689.html.

[6] 北京知行锐景科技有限公司, 优质数码领域创作者. 华为 P50 Pocket 评测: 理工男搞起情调也是一把好手[EB/OL]. (2021-12-27). https://baijiahao.baidu.com/s?id=1720261076805066815&wfr=spider&for=pc.

High quality digital field creator. Huawei P50 pocket evaluation[EB/OL]. (2021-12-27). https://baijiahao.baidu.com/s?id=1720261076805066815&wfr=spider&for=pc.

[7] 刘子寒, 季轶群, 石荣宝, 等. 机载红外推扫成像光谱仪光学设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2941-2946.
LIU Z H, JI Y Q, SHI R B, *et al*.. Optical design of airborne infrared pushbroom imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2941-2946. (in Chinese)

[8] 吕金光, 梁静秋, 王维彪, 等. 微小型快照式傅里叶变换成像光谱仪的建模与分析[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0230001.
LÜ J G, LIANG J Q, WANG W B, *et al*.. Modeling and analysis of miniature snapshot fourier-transform imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0230001. (in Chinese)

[9] 常凌颖, 张强, 邱跃洪. 宽谱段一体化AOTF成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0722002.
CHANG L Y, ZHANG Q, QIU Y H. Design of optical system for broadband and integrated AOTF imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0722002. (in Chinese)

[10] 裴琳琳, 吕群波, 王建威, 等. 编码孔径成像光谱仪光学系统设计[J]. 物理学报, 2014, 63(21): 210702.
PEI L L, LÜ Q B, WANG J W, *et al*.. Optical system design of the coded aperture imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 210702. (in Chinese)

[11] 高泽东, 高洪兴, 朱院院, 等. 快照式光谱成像技术综述[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(6): 1323-1343.
GAO Z D, GAO H X, ZHU Y Y, *et al*.. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1323-1343. (in Chinese)

[12] 王飞, 余晓畅, 罗青伶, 等. 片上光谱成像系统研究进展及应用综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2000002.
WANG F, YU X CH, LUO Q L, *et al*.. Research progress and applications of spectral imaging system on chip[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 2000002. (in Chinese)

[13] CHENG Z W, ZHAO Y H, ZHANG J H, *et al*.. Generalized modular spectrometers combining a compact nanobeam microcavity and computational reconstruction[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(1): 74-81.

[14] 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.

[15] 刘嘉楠, 崔继承, 尹禄, 等. 基于微透镜阵列的积分视场成像光谱仪前置成像系统分析与设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 3269-3272.
LIU J N, CUI J CH, YIN L, *et al*.. Analysis and design of pre-imaging system of integral field imaging spectrometer based on lenslet array[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(10): 3269-3272. (in Chinese)

[16] HUANG Y T, LI SH J, ZHANG J, *et al*.. Research on surface quality difference of microlens array fabricated by fast tool servo cutting[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 2500309.

[17] HERRERO-BERMELLO A, LI J F, 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.

[18] 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.
YU X CH, ZHAO J C, YU Y T, *et al*.. Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging[J]. *Optics and Precision on Engineering*, 2019, 27(5): 999-1012. (in Chinese)

[19] DUAN Y B, CAI CH L, LIANG H F, *et al*.. Design and preparation of a 6-channel fan-shaped integrated narrow-band filter in the mid-infrared band[J]. *Coatings*, 2019, 9(9): 567.

[20] 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.
ZHAO Y Q, LIU X Y, TANG CH L. Progress in spectral filter array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190004. (in Chinese)

[21] LEE H S, HWANG G W, SEONG T Y, *et al*.. Design of mid-infrared filter array based on plasmonic metal nanodiscs array and its application to on-chip spectrometer[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12218.

[22] ZHANG W Y, SONG H Y, HE X, *et al*.. Deeply learned broadband encoding stochastic hyperspectral imaging[J]. *Light:Science & Applications*, 2021, 10(1): 108.

[23] LIU C C, SUN ZH J. Design and fabrication of a metallic irregular F-P filter array for a miniature spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(16): 4948-4953.

[24] XIE Y Q, LIU CH Y, LIU SH, *et al*.. Snapshot imaging spectrometer based on pixel-level filter array (PFA)[J]. *Sensors*,

2021, 21(7): 2289.

[25] 张祎祎. 基于阵列滤光片的红外多光谱相机研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
ZHANG Y Y. Research on infrared multispectral camera based on array filter[D]. Xi 'an: Xi 'an Technological University, 2021. (in Chinese)

[26] 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.

[27] LAMBRECHTS A, GONZALEZ P, GEELEN B, *et al*.. A CMOS-compatible, integrated approach to hyper-and multispectral imaging[C]. *Proceedings of 2014 IEEE International Electron Devices Meeting*, IEEE, 2014: 10.5. 1-10.5. 4.

[28] SHALTOUT A M, KIM J, BOLTASSEVA A, *et al*.. Ultrathin and multicolour optical cavities with embedded metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2673.

[29] 迟明波, 韩欣欣, 徐阳, 等. 宽谱段高分辨扫描光谱定标技术[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 249-257.
CHI M B, HAN X X, XU Y, *et al*.. Broad band and high resolution scanning spectrum calibration technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 249-257. (in Chinese)

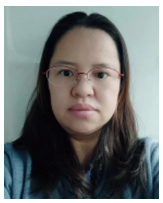
[30] 杜丽丽, 刘李, 葛曙乐, 等. 红外甚高光谱分辨率探测仪高精度在轨光谱定标[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(2): 214-222.
DU L L, LIU L, GE SH L, *et al*.. High precision on-orbit spectral calibration of atmospheric infrared ultra-spectral sounder[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(2): 214-222. (in Chinese)

[31] ZHANG Z X, CHANG J, REN H X, *et al*.. Snapshot imaging spectrometer based on a microlens array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 011101.

[32] SHOGENJI R, KITAMURA Y, YAMADA K, *et al*.. Multispectral imaging using compact compound optics[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1643-1655.

[33] 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.

作者简介：



田久谊(1979—), 女, 陕西西安人, 学士, 工程师, 2001 年于西安工业大学获得学士学位, 主要从事多光谱成像、光电探测器件等方面的应用光学仪器研究。E-mail: jiuyi_tian@163.com