光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021110901

高光谱成像用高帧频 CMOS 图像传感器

陈世军[1,2*]，施永明[1]，王　欣[1]，丁　毅[1]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083；
2. 南通智能感知研究院，江苏 南通 226009）

摘　要： 针对高帧频、全局曝光和光谱平坦等成像应用需求，设计了一款高光谱成像用 CMOS 图像传感器。其光敏元采用 PN 型光电二极管，读出电路采用 5T 像素结构。采用列读出电路以及高速多通道模拟信号并行读出的设计方案来获得低像素固定图像噪声(FPN)和非均匀性抑制。芯片采用 ASMC 0.35 μm 三层金属两层多晶硅标准 CMOS 工艺流片，为了抑制光电二极管的光谱干涉效应，后续进行了光谱平坦化 VAE 特殊工艺，并对器件的光电性能进行了测试评估。电路测试结果符合理论设计预期，成像效果良好，像素具备积分可调和全局快门功能，最终实现的像素规模为 512×256，像元尺寸为 30 μm×30 μm，最大满阱电子为 400 ke$^-$，FPN 小于 0.2%，动态范围为 72 dB，帧频为 450 f/s，相邻 10 nm 波段范围内量子效率相差小于 10%，可满足高光谱成像系统对 CMOS 成像器件的要求。

关键词： 高光谱成像；CMOS 图像传感器；全局快门；光谱干涉效应

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0116－06

High Frame-rate CMOS Image Sensor for Hyperspectral Imaging

CHEN Shijun[1,2]，SHI Yongming[1]，WANG Xin[1]，DING Yi[1]

（1. Key Lab. of Infrared Imaging Materials and Detectors，Shanghai Institute of Technical Physics，Chinese Academy of Sciences，Shanghai 200083，CHN；2. Nantong Academy of Intelligent Sensing，Nantong 226009，CHN）

Abstract： For the imaging requirements such as high frame rate，global shutter and flat spectral response characteristics，a kind of high-frame rate CMOS image sensor for hyperspectral imaging was designed. The circuit employed 5T (5-transistor) photodiode pixel for global shutter operation. And high-speed readout and signal processing circuits were designed to achieve low fixed pattern noise (FPN) and non-uniformity. The sensor was fabricated in ASMC 0.35 μm standard CMOS process. In order to suppress the spectral interference of the photodiode，back-end spectral flatness process was implemented，and the photoelectric response of the device was tested and evaluated. The test results indicate that the circuit has met the design expectation，resulting in pixel array size of 512×256，pixel size of 30 μm×30 μm，high full well capacity of 400 ke$^-$，wide dynamic range of 72 dB and frame rate of 450 f/s. The quantum efficiency difference between neighboring 10 nm spectral band is less than 10%，being able to meet the general requirements of a hyperspectral imaging system.

Key words： hyperspectral imaging；CMOS image sensor；global shutter；spectral interference effect

收稿日期：2021－11－09.

*通信作者：陈世军　**E-mail：** csj1967@163.com

0　引言

高光谱成像技术是遥感对地观测技术的前沿领域，是在成像光谱学的基础上发展而来的一种光学遥感技术，能实现空间信息、光谱信息和辐射信息的综合观测[1-2]。高光谱成像仪将传统的二维成像遥感技术和光谱技术有机结合，其主要特征是在对地物目标空间成像的同时获取该目标的连续光谱信息[3]。国内外的星用高光谱成像系统大多选择 CCD 探测器作为关键器件，但功耗、体积等问题制约了其向小型化、低成本发展。随着半导体工艺和电路的快速发展，CMOS 图像传感器（CIS）在系统集成、读出方式、速度、功耗和抗辐射等方面取得了极大的技术进步[4-6]。为了满足载荷小型化、低成本、低功耗等要求，具有高帧频和全局曝光技术特点的 CMOS 图像传感器成为高光谱成像发展的方向[7]。

高光谱成像系统需要对高速动态目标实现几十个甚至上百个波段的高光谱成像探测，器件的帧频通常需要达到几百赫兹，同时光谱分辨率达到几纳米且光谱连续[8-9]，这就要求 CMOS 器件的光谱响应曲线连续平滑，才能够实现高光谱成像的预期效果，这些要求远高于普通 CMOS 成像器件。

针对高帧频、全局快门和光谱平坦化特性应用需求，本文设计了一种高光谱成像用 CMOS 图像传感器，其像素采用 5T 结构，列读出电路包括电荷放大和采样电路，由于列级电路传输导线上的电容寄生效应影响读出速率，采用多通道并行输出的方法，确保信号的高帧频输出。为了抑制标准 CMOS 工艺光电二极管的干涉多峰效应（Etaloning）[10]，在 0.35 μm 标准 CMOS 工艺基础上进行后续光谱平坦化工艺，以改善其光谱平坦特性。

1　高光谱成像原理

高光谱成像原理如图 1 所示，高光谱相机的感光部件为二维像素阵列，当卫星沿飞行方向移动时，反射光通过光栅投射到图像传感器的焦平面上，传感器空间维方向上反映的是目标的空间信息，光谱维方向上反映的则是光谱信息。根据以上工作原理，为了实现高速移动时信息不失真，CMOS 图像传感器需要能够实现全局曝光的工作模式以及极高的读出速率。高光谱成像仪面阵探测器的工作帧频为

$$f = v_e / d \tag{1}$$

式中，f 为帧频，v_e 为卫星的速度，d（Groud Sample Distance，GSD）为地面采样距离。地面分辨率越高，探测器的工作帧频越高，除了全局曝光和高帧频的要求，还需要对满阱容量和光谱特性进行优化设计。

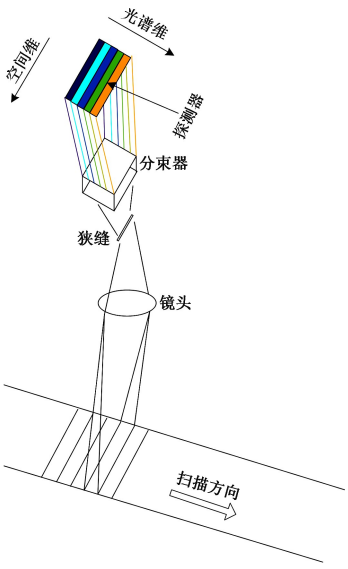


图 1　高光谱成像原理示意图

2　探测器电路结构设计

图 2 给出了探测器整体结构框图，由光电二极管阵列、模拟电路模块和数字电路模块三部分组成。其中光电二极管和模拟电路是核心部分，其性能直接影响器件的光谱、功耗、速率和动态范围等指标。数字电路模块包括行列控制电路。

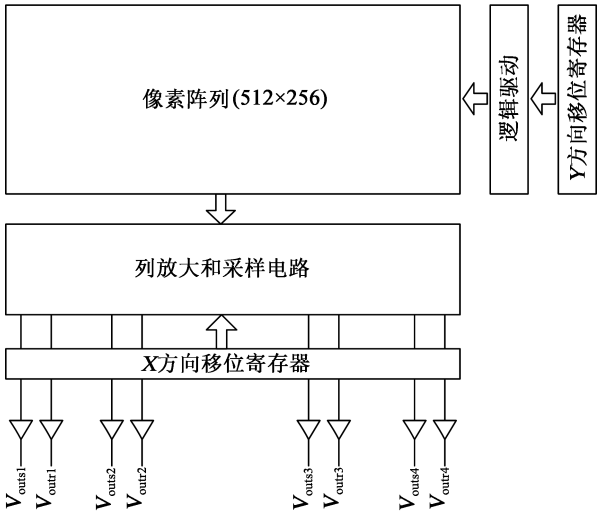


图 2　CMOS 图像传感器框图

探测器工作于全局快照模式[11]。在开始图像拍摄时，所有的像素单元在每一帧图像可变积分时间内的某一个时刻被同步，快门同时曝光，在每一帧积分时间结束后，所有像素单元上的图像信息同时转移到像素单元的存储电容上，然后按一定的顺序依次读取。为了提高帧频，即减小每一帧图像信息的读取时间，器件信号输出分为四路模拟信号同时输出，每一行像素按照四个像素为一个单元同时进行读取，从而缩短每一帧图像信息的读取时间，提高帧频。

2.1 像素设计

为了实现全局快照模式，像素采用 5T 结构，它是在传统 3T 结构上的改进[12]，如图 3 所示。像素电路由 1 个光电二极管(PD)和 5 个 NMOS 管(M1～M5)组成；其中 rst_PD 和 TX 为全局控制信号，rst_PD 的作用是同时复位所有像素阵列中的光电二极管，TX 将光电二极管的信息转移到 FD 节点，然后逐行读出积分值；rst_FD 对 FD 进行读出后的复位；M1 和 M2 管漏极电压 V_{dd_rst} 必须低于电源电压(5 V)，以保证 M3 管工作在线性区，提高电路的均匀性。为了改善由工艺引起的 FD 节点寄生电容不一致性，从而导致探测器均匀性差，在 FD 节点增加一个 NMOS 存储电容(M6)。

由于光电二极管和电荷存储被 M3 管隔离，积分和读出互相独立，实现了边读出边积分的工作模式，在这种模式下，积分时间可根据应用环境进行任意调节，而不会影响信号读出。

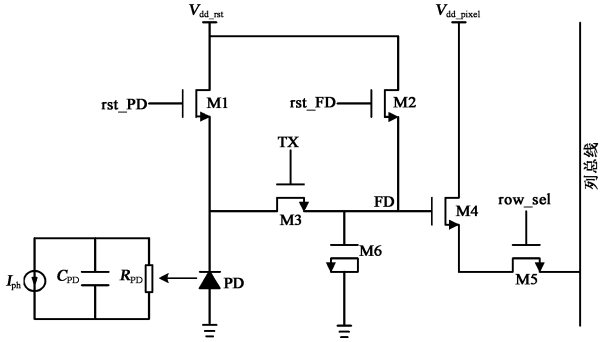


图 3 5T 像素电路结构

图 4 为全局快门控制时序，rst_PD 控制信号为高电平，全局曝光控制开关 M1 导通，对光电二极管进行复位，像素开始曝光，当曝光即将结束，TX 控制信号为高电平，帧转移开关 M3 导通，PD 中累积的光生电荷通过与 FD 点的电容(C_{FD})进行重新分配并存储于 FD 节点，等待读出，此时 FD 节点电压为

$$V_{FD1} = V_{dd_rst} + V_{pixelFPN} - \Delta V_{ph} \tag{2}$$

$$\Delta V_{ph} = \frac{I_{ph} T_{int}}{C_{PD} + C_{FD}} \tag{3}$$

式中，V_{dd_rst} 为 3.5 V 复位电压，I_{ph} 为光电流，T_{int} 为积分时间，$V_{pixelFPN}$ 为像素固定图像噪声，C_{PD} 电容包括光电二极管结电容和寄生电容，约为 35 fF，C_{FD} 电容包括 NMOS 管电容(M6)和寄生电容，约为 8 fF。

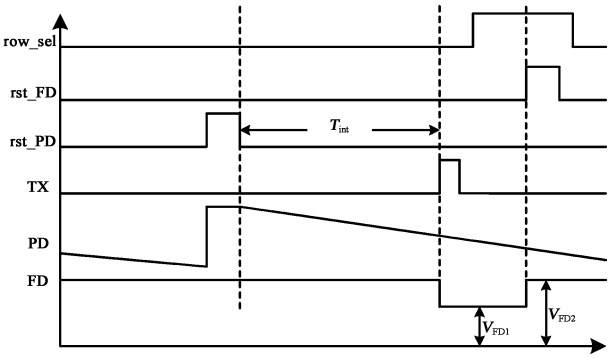


图 4 像素全局快门控制时序

FD 节点电压读出后，rst_FD 控制信号为高电平，行读出复位管 M2 导通，对 FD 节点进行复位，等待读出，此时 FD 节点电压为

$$V_{FD2} = V_{dd_rst} + V_{pixelFPN} \tag{4}$$

采用 4T 像素结构专用 CIS 工艺，可以将 Pinned 光电二极管(PPD)中的电荷完全转移至存储电荷 C_{FD} 上，电荷增益为 q/C_{FD}；而采用标准 CMOS 工艺，光电二极管中的电荷进行重新分配，电荷增益为 $q/(C_{PD}+C_{FD})$，根据设计参数，由于电荷重新分配，5T 像素结构的电荷增益与 3T 结构相比，电荷增益下降 20%，由此 C_{FD} 的取值不能太大。与 4T 像素结构相比，基于 3T 结构的 5T 像素的优点是饱和电子数大，结构和工艺简单。

跟随管 M4 将积累在 PD 上的电荷转化成电压信号，当 row_sel 为高电平时，M5 导通，存储在 FD 节点的信号经过 M4 源极跟随器传递到列总线(Column Bus)上。

2.2 列读出电路设计

图 5 为列读出放大采样电路结构。同一列所有像素的输出都连接到列总线，列读出电路由一个电荷放大器和一个双采样电路组成。为了探测不同背景条件下的信号，列电荷放大电路采用多路增益，增益倍数取决于电荷放大器输入电容和反馈电容之比 C_{in}/C_{fb}，增益由 gain1，gain2 和 gain3 信号控制，增

益在 1.5～20 倍之间可调。双采样电路包含 2 个 CMOS 开关(K_R 和 K_S)、2 个采样电容(C_S 和 C_R)、2 个 PMOS 跟随管(M7 和 M8)和 2 个 NMOS 列选通管(M9 和 M10)。

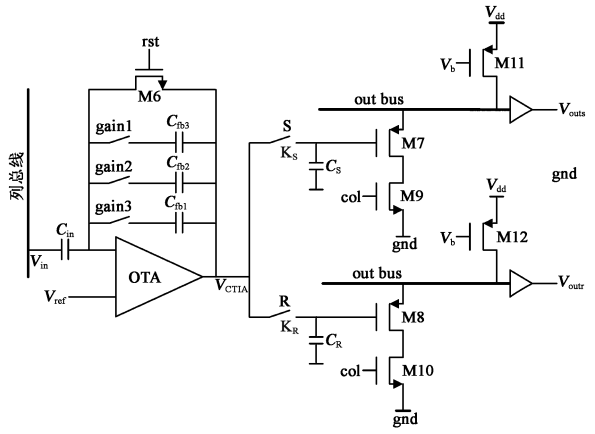


图 5　列读出电路

列读出电路工作原理为：当 rst 控制信号为高电平时，M6 管导通，V_{CTIA} 电压复位至 V_{ref}，当 R 控制信号为高电平时，K_R 开关导通，此时 V_{CTIA} 电压存储于 C_R 采样电容上，电压值为

$$V_R = V_{ref} + V_{colRFPN} \tag{5}$$

式中，$V_{colRFPN}$ 为复位信号列读出电路固定电压，V_{ref} 为 3.0 V 偏置电压。

当 S 控制信号为高电平时，K_S 开关导通，此时 V_{CTIA} 电压存储于 C_S 采样电容上，电压值为

$$V_S = V_{ref} + V_{colSFPN} - A_{V1} \cdot \frac{C_{in}}{C_{fb}} \cdot \Delta V \tag{6}$$

$$\Delta V = V_{FD2} - V_{FD1} = \Delta V_{ph} \tag{7}$$

式中，A_{V1} 为像素级跟随增益，$V_{colSFPN}$ 为光信号列读出电路固定电压。由式(7)知，列电荷放大电路消除了像素固定图像噪声。

当 col 为高电平时，C_S 和 C_R 上存储的电压值经 PMOS 跟随传输至输出总线，col 输入信号控制端由列移位寄存器选通，经输出驱动管依次读出两路差分信号。两路差分信号的最终输出分别为

$$V_{outr} = V_R \cdot A_{VR2} \tag{8}$$

$$V_{outs} = V_S \cdot A_{VS2} \tag{9}$$

式中，A_{VR2} 和 A_{VS2} 分别为两路信号的后级跟随增益，近似相等为 A_{V2}。

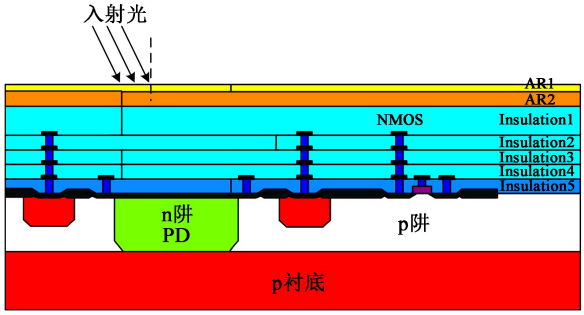
探测器输出的两路差分信号 V_{outr} 和 V_{outs} 经外部差分放大器放大输出为

$$V_{outr} - V_{outs} = A_{V2}\left(A_{V1} \cdot \frac{C_{in}}{C_{fb}} \cdot \Delta V_{ph} + V_{FPN}\right) \tag{10}$$

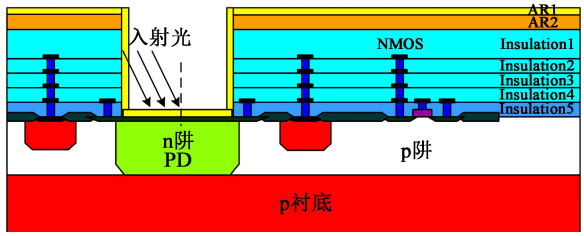
经过差分，输出电压由光信号电压和列固定图像噪声电压组成，其中列固定图像噪声主要源于两路采样电路的误差，约为几毫伏。

3　光谱平坦化工艺

图 6(a)为标准工艺光电二极管和 CMOS 电路结构模型，光电二极管采用 n-well/p-sub 结构，它的优点是漏电流小、光电二极管结电容小、量子效率高。图中 PD 上存在约 5 μm 厚的多层介质膜[13]，入射光经抗反射膜穿过多层介质膜进入 PD，再进入衬底中。多层介质膜导致入射光在介质膜内来回多次反射而产生干涉，即 Etalon 效应。



(a)　标准工艺 PN 光电二极管结构模型



(b)　VAE 工艺后 PN 光电二极管结构模型

图 6　PN 光电二极管结构模型

图 7 为光电二极管光谱特性，其中横坐标为波长，纵坐标为量子效率与占空比的乘积($\eta \times F_F$)。曲线 1 为 Etalon 效应光谱特性，灵敏度降低，并对高光谱成像数据的后续处理与应用造成极大的困难，严重降低了系统定量化精度。

为了提高光电二极管在工作波段内的量子效率，同时抑制多峰干涉效应，在标准 CMOS 工艺的基础上进行前照式光谱平坦化 VAE 工艺，如图 6(b)所示。首先刻蚀掉光敏面上大部分的厚钝化介质，然后在感光面上生长约 80 nm 厚的 Si_3N_4 增透膜，以减少膜层内部反射，这样大部分入射光经抗反射膜进入 PD，再到衬底中，抑制了多层介质膜引起的干涉峰，从而改善了干涉峰光谱特性。

由于像素大小和工艺的要求，经过 VAE 工艺

刻蚀后，多峰现象得以改善，但不能完全消除。图 7 中曲线 2 为光谱平坦化后续工艺后的光谱特性，可见量子效率得到了明显提高，同时 Etalon 效应得到了抑制，达到了相邻 10 nm 波段范围内量子效率相差小于 10%的技术指标要求。

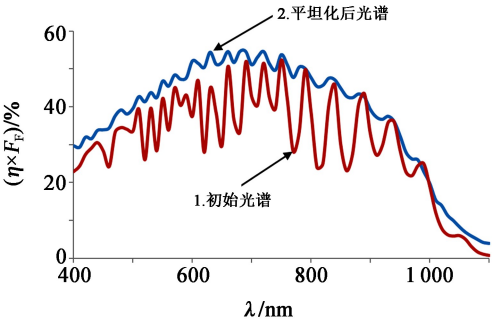


图 7 光电二极管光谱特性图

4 测试结果

图 8 为芯片封装图，芯片尺寸为 17.8 mm×11.3 mm，封装于 PGA64 管座内。对芯片进行性能测试，测试结果如表 1 所示，图 9 为该探测器在 450 f/s 帧频下的光谱成像图。

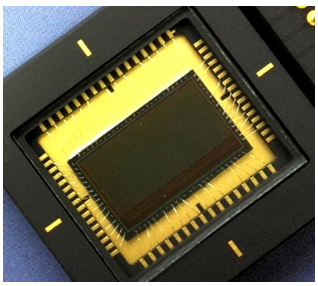


图 8 512×256 CMOS 图像传感器



图 9 450 f/s 帧频下高光谱成像图

表 1 CMOS 图像传感器性能测试结果

参数	测量值
阵列大小	512×256
像素大小	30 μm×30 μm
填充因子/%	70
全阱电荷/ke⁻	400
$\eta \times F_E$	52%(@700 nm)
帧频/(f·s⁻¹)	>450
转换增益/(μV/e⁻)	2.8～20
动态范围/dB	72
FPN/%	<0.2
功率	250 mW(@450 f/s)

5 结论

针对高光谱探测应用需求，设计了一种 512×256 高光谱成像用 CMOS 图像传感器。重点介绍了 5T 像素结构、列读出电路以及光谱平坦化设计方案，完成了芯片的流片验证和光电性能测试。测试结果表明：(1)测试结果与设计相符，5T 像素结构实现了积分可调和全局快门工作模式，列读出电路消除了像素和部分列电路固定图像噪声，最终列固定图像噪声小于 0.2%(均方根电压偏差/电压饱和值)；(2)基于 ASMC 0.35 μm 3M2P 5 V 标准 CMOS 工艺以及后续光谱平坦化特殊工艺，创新性地实现了前照式 CMOS 图像传感器光谱平坦优化技术，验证了其有效性，10 nm 波段范围内量子效率相差小于 10%，700 nm 波段量子效率与占空比乘积达 52%；(3)512×256 像素阵列在四通道输出下实现了大于 450 f/s 的高帧频模拟信号输出。高帧频、全局曝光和光谱平坦化满足了高光谱成像系统对 CMOS 图像传感器的应用需求。

参考文献：

[1] 樊星皓，刘春雨，金 光，等. 轻小型高分辨率星载高光谱成像光谱仪[J]. 光学精密工程，2021，29(3)：463-472.
Fan Xinghao，Liu Chunyu，Jin Guang，et al. Small and high-resolution spaceborne hyperspectral imaging spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering，2021，29(3)：463-472.

[2] 李 伟，吕 蒙，陈天虹，等. 高光谱图像在生物医学中的应用[J]. 中国图象图形学报，2021，26(8)：1764-1785.
Li Wei，Lv Meng，Chen Tianhong，et al. Application of a hyperspectral image in medical field[J]. J. of Image and Graphics，2021，26(8)：1764-1785.

[3] 王建宇，李春来. 高光谱遥感成像技术的发展与展望[J]. 空间科学学报，2021，41(1)：22-33.
Wang Jianyu，Li Chunlai. Development and prospect of hyperspectral imager and its application[J]. China J. Space Sci.，2021，41(1)：22-33.

[4] 孙宏海，刘艳滢. 两种高速 CMOS 图像传感器的应用于测试[J]. 中国光学，2011，4(5)：453-460.
Sun Honghai，Liu Yanying. Application and test of two different high-speed digital CMOS image sensors[J]. Chinese Optics，2011，4(5)：453-460.

[5] 张博研，孔德柱，刘金国，等. 卷帘快门式 CMOS 探测器的星图像移补偿[J]. 中国光学，2020，13(6)：1276-1284.
Zhang Boyan，Kong Dezhu，Liu Jinguo，et al. Compensation of star image motion for a CMOS image sensor with a rolling

shutter[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1276-1284.

[6] 冯　婕，李豫东，文　林，等. CMOS 图像传感器辐射损伤导致星敏感性能退化机理[J]. 红外与激光工程，2020，49(5)：20190117-1-20190117-7.
Feng Jie, Li Yudong, Wen Lin, et al. Degradation mechanism of star sensor performance caused by radiation damage of CMOS image sensor[J]. Infrared and Laser Engineer., 2020, 49(5): 20190117-1-20190117-7.

[7] 冯国旭，刘昌举，刘戈扬，等. 高光谱成像用高速 CMOS 图像传感器设计[J]. 半导体光电，2020，41(4)：489-493.
Feng Guoxu, Liu Changju, Liu Geyang, et al. Design of high-speed CMOS image sensor for hyperspectral imaging [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(4): 489-493.

[8] 李春来，吕　刚，袁立银，等. 机载热红外高光谱成像仪的光谱性能测试与初步应用[J]. 红外与激光工程，2020，49(5)：20190117-1-20190117-7.
Li Chunlai, Lv Gang, Yuan Liyin, et al. Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager(ATHIS)[J]. Infrared and Laser Engineerin., 2020, 49(5): 20190117-1-20190117-7.

[9] 吴圣娟，胡彦博，胡　旭，等. 卫星用高光谱红外焦平面读出电路设计[J]. 红外技术，2020，42(11)：1037-1045.
Wu Shengjuan, Hu Yanbo, Hu Xu, et al. Hyperspectral infrared focal plane array ROIC design for satellite applications [J]. Infrared Technol., 2020, 42(11): 1037-1045.

[10] Hu Binlin, Zhang Jing, Cao Kaiqin, et al. Research on the Etalon effect in dispersive hyperspectral VNIR imagers using back-illuminated CCDs[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(9): 5481-5494.

[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 Zedong, Gao Hongxin, Zhu Yuanyuan, et al. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1323-1343.

[12] 解　宁，丁　毅，王　欣，等. 应用于高光谱成像的 CMOS 图像传感器设计[J]. 仪表技术与传感器，2015，7(7)：7-13.
Xie Ning, Ding Yi, Wang Xin, et al. CMOS active pixel sensor for hyperspectral imaging application[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, 7(7): 7-13.

[13] 杨成财，鞠国豪，陈永平. 集成 PIN 光敏元的 CMOS 探测器光电响应特性研究[J]. 中国光学，2019，12(5)：1076-1089.
Yang Chengcai, Ju Guohao, Chen Yongping. Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes[J]. Chinese Optics, 2019, 12(5): 1076-1089.

作者简介：

陈世军(1967—)，女，硕士，正高级工程师，主要从事 CMOS 图像传感器电路设计和测试分析技术研究。