硅基光电探测器件及组件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241213005

多窗口高帧频随机开窗CMOS图像传感器

蒋祥倩，李毅强，吴治军，刘昌举*，刘洋华，王　颖
（重庆光电技术研究所，重庆，400060）

摘　要： 在空间探索及高速目标识别等领域，要求CMOS图像传感器既能以全窗口维持宽视场成像，又能以高帧频针对感兴趣区域读出。然而，传统具有开窗功能的CMOS图像传感器只具备单窗口随机开窗功能，且帧频提升困难，难以适应目标跟踪、模式识别以及空间星敏感器系统的发展需求。针对以上问题，文章基于0.13 μm CMOS图像传感器专用工艺平台，结合高帧率与高分辨率，研制出支持随机开窗、抗晕、抗辐照等功能的CMOS图像传感器。该图像传感器采用滚动快门模式，有效像素阵列规模为1024×1024，光谱响应范围在400～900 nm，动态范围为68 dB，具备多窗口随机开窗功能和抗辐照性能。相较于传统CMOS图像传感器，所研制的可随机开窗CMOS图像传感器的帧率可随窗口尺寸动态调整，能捕捉快速移动的物体，防止物体出现模糊和减少运动伪影。

关键词： CMOS图像传感器；读出电路；随机开窗；抗辐照
中图分类号： TN219　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0029－09

Multiwindow High-Frame-Rate Random Region-of-Interest of CMOS Image Sensor

JIANG Xiangqian, LI Yiqiang, WU Zhijun, LIU Changju, LIU Yanghua, WANG Ying
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In space exploration and high-speed target recognition, CMOS image sensors are required to maintain wide-field imaging with full windows while enabling regions of interest to be read out at high frame rates. However, conventional CMOS image sensors with windowing functions offer only single-window random windowing capabilities. Moreover, their frame rates cannot be increased easily, thus challenging the fulfilment of development requirements for future target tracking, pattern recognition, and space star sensor systems. Hence, utilizing a process platform for a 0.13 μm CMOS image sensor, we develop a CMOS image sensor with a high frame rate and resolution to support random windowing, anti-glare, and anti-radiation functions. This image sensor adopts a rolling shutter mode, with an effective pixel array size of 1024 × 1024, a spectral response range of 400～900 nm, a dynamic range of 68 dB, and multiwindow random windowing and anti-radiation capabilities. Compared with conventional CMOS image sensors, the frame rate of the random windowing CMOS image sensor developed in this study can be increased by increasing the window size, thereby enabling the capture of rapidly traversing objects while preventing blurring and reducing motion artifacts.

Key words: CMOS image sensor; readout circuit; random region of interest; rradiation resistance

收稿日期：2024－12－13.

* **通信作者：**刘昌举

0 引言

随着CMOS图像传感器技术的快速发展,新型CMOS图像传感器要求在分辨率范围内能够定义一个或多个感兴趣的窗口区域,并将窗口内的图像信息读出,获取局部区域图像,此功能被称为开窗(Region of Interest,ROI),该功能不仅可以提高图像传感器的帧率,还能降低其功耗。在这种ROI模式下,既要求高分辨率CMOS图像传感器全窗口作为一个低帧率的传感器工作,维持图像传感器宽视场、高灵敏度和适度的数据速率,又要求其在窗口窄视场范围内能够以高帧率输出,保持合适的总数据速率[1-2]。在ROI模式下,用户可以重构图像大小以及观测感兴趣区域,该功能广泛应用于空间探索、目标跟踪以及模式识别等领域[3-5]。例如在太空探测领域,CMOS图像传感器可以利用随机ROI功能计算各个窗口的阈值并存储各个星点的能量信息,保留最亮的星点坐标并生成覆盖星点的有效随机ROI窗口坐标用于下一帧星图检测;在高速目标识别领域,具有随机ROI功能的CMOS图像传感器可以凭借高帧频快速检测目标物体,提高目标识别速率。近年来,针对随机ROI功能CMOS图像传感器,国外已开展许多相关研究。2017年,Sony公司推出一款具有ROI的CMOS图像传感器,该图像传感器通过低分辨率图像检测ROI窗口,输出高分辨率ROI图像,与全尺寸全分辨率输出相比,在保留关键信息的情况下不仅节省了ADC的功耗还节省了数据带宽[6]。2018年,日本Chen等研制出一款具有1412(V)×1280(H)ROI功能,用于远程心率监测的CMOS图像传感器。为了精确描述心率测量数据,该图像传感器的采样速率设计为30 fps,以匹配人类心率频率[7]。2020年,韩国Lee等研制出一款单窗口随机开窗CMOS图像传感器,该传感器可用于提供医疗设备X射线探测,获取图像深度信息[8]。

国内针对具有随机ROI功能的CMOS图像传感器的研究还比较匮乏,本文针对空间探索、目标跟踪以及模式识别等领域的应用需求,提出一种随机开窗型CMOS图像传感器,该图像传感器不仅支持多窗口随机开窗、抗晕、抗辐照等功能,同时其帧率还可以根据随机开窗窗口大小而提升,在不损失关键信息的情况下显著提高图像传输和处理效率。

1 图像传感器架构设计

本研究设计的传感器由像素阵列、列级模拟前端电路、行/列驱动电路以及片上ADC电路等组成,其整体架构框图如图1所示。其中光电二极管和模拟电路是核心部分,其性能直接影响图像传感器的满阱容量、功耗、速率和动态范围等指标。传感器的像素分辨率为1024(H)×1024(V),像元类型为4T(4 Transistor),像元尺寸为18 μm×18 μm,器件电源电压为3.3 V,默认像素输出频率为5 MHz,帧率约4.6 fps。其工作原理如下:首先4T像元将光信号转变为电信号,然后列级模拟前端电路对信号进行采样/保持,再经过器件片内相关双采样(CDS)电路降噪处理,最后器件输出经过片内CDS处理后的信号。针对随机开窗功能,所研制的CMOS图像传感器采用译码器选择行/列驱动电路的地址,与传统采用移位寄存器来实现读出电路随机开窗功能相比,该方法具有电路结构简单、版图占用芯片面积小、功耗低、操作灵活等优点。CMOS图像传感器片上集成12 bit全局ADC,可以支持12 bit数字输出,包括图像数字输出、片上温度传感器数字读出以及外接模拟信号数字输出等。同时,该CMOS图像传感器的一帧时间包括1024行像素数据的读出时间与帧消隐时间,片上温度传感器无需新增模拟信号控制时序,在帧消隐时间内改变可编程增益放大器PGA的响应设置,即可在ADC延迟后读出温度传感器的数据。

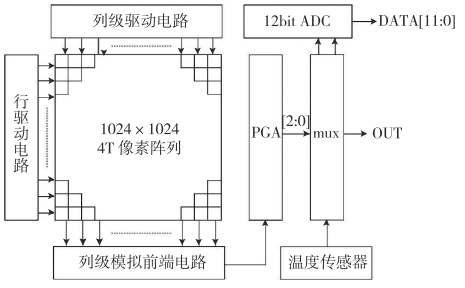


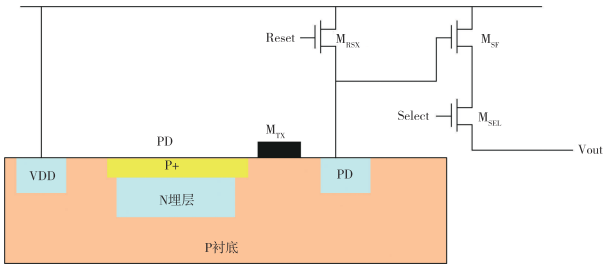
图1 器件架构示意图

随机开窗功能包括单窗口随机开窗和多窗口随机开窗。通过随机开窗,用户能够根据需要选择性地读出图像传感器像素阵列中的部分区域信息,有利于提高传感器的帧率,检测图像传感器像素坏点。所设计的CMOS图像传感器既可以实现单窗口随机开窗又支持多窗口随机开窗读出模式,其行/列地址译码器电路将片外输入的12 bit地址信号进行译码,用于控制像素阵列实现两种随机开窗

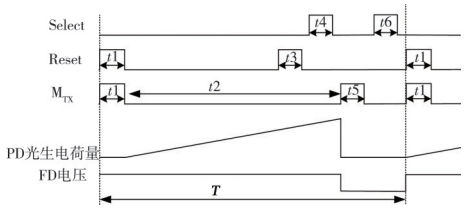
功能。其中单窗口随机开窗就是在 1024(H)×1024(V)个像素区域内开 1 个窗口，被选中的行像素与列像素依次进行曝光、采样保持和数据读出等操作，窗口的曝光、控制和读出与全芯片成像时完全一致，不同之处在于窗口的行与列的个数。而多窗口随机开窗是在 1024(H)×1024(V)个像素区域内开 N 个窗口，一帧时间包括这 N 个窗口的曝光、控制和读出时间。

1.1　像素设计

在空间探索应用中，太空辐照损伤会诱发 CMOS 图像传感器暗信号增大、饱和输出电压减小、噪声增大、量子效率减小、暗信号尖峰和产生随机电码信号等现象，导致图像传感器成像质量降低，严重时甚至会导致功能失效。实验采用 4T 像素结构并基于像素级总剂量辐射进行加固设计，该 4T 像素结构如图 2(a)，包括光电二极管(PD)、转移管(M_{TX})、复位管(M_{RST})、源级跟随器(M_{SF})、行选择管(M_{SEL})。4T 像素可在列级电路的配合下实现相关双采样。像素的复位和读出等操作需要 Reset，TX 和 Select 信号共同作用，其工作时序如图 2(b)，其中 T 为一个像素曝光和信号读出的全部时间。



(a) 结构图



(b) 工作时序

图 2　4T 像素结构图和工作时序

该像素具体工作原理如下：

(1)$t1$ 阶段，转移管 M_{TX} 与复位管 M_{RST} 同时开启，将 PD 复位，并清空其中的光生电荷，同时将 FD 节点的电压复位；

(2)$t2$ 阶段，PD 曝光，开始累积光生电荷；

(3)$t3$ 阶段，复位管 M_{RST} 开启，再次复位 FD 节点电压；

(4)$t4$ 阶段，行选择管 M_{SEL} 开启，读出 FD 节点信号电压 V_{FD1}；

(5)$t5$ 阶段，转移管 M_{TX} 开启，将 PD 内的光生电荷传输到 FD 点，并采样到列信号线上 V_{FD2}；

(6)$t6$ 阶段，行选择管 M_{SEL} 开启，读出 FD 节点信号电压 V_{FD2}。

该 4T 像素结构采用表面 P+层掺杂，可将表面缺陷隔离，降低该区域产生的暗电流；同时通过设计 PD 和 FD 这两个区域的等效电容大小，调控像素的灵敏度 pixel。除此之外，实验采用 4T 像素结构最重要的原因是其读出时序可以实现相关双采样，该操作能够消除像素复位产生的随机噪声[9-12]。

1.2　读出电路设计

针对随机开窗功能，所设计的 CMOS 图像传感器的行/列驱动电路的地址选择采用译码器的方式实现，与传统采用移位寄存器实现读出电路随机开窗功能相比，该方法具有电路结构简单、版图占用芯片面积小、功耗低、操作灵活等优点。行/列地址译码器电路可以将片外输入的 10 bit 地址信号进行译码，进而控制选择像素阵列实现随机开窗功能[13-15]。

CMOS 图像传感器的电路部分主要包括行列驱动电路、列级模拟前端电路、PGA 电路以及 ADC 电路等。其中列级模拟前端电路包括采样、保持电路、列驱动电路、CDS 电路等，可在时序电路的控制下，实现对像素输出模拟信号进行放大、处理、噪声消除等操作。并行传感器通信接口由 10 bit 地址总线 A9-A0 和 3 个写入控制端口 LD_X，LD_Y 和 LD_REG 组成。

图 3 为行/列地址写入时序图，当 LD_X 或 LD_Y 上升沿来临时，10 位地址 A9-A0 将存储进相应寄存器的列开始地址 X1 或行开始地址 Y1 中；当 LD_X 或 LD_Y 下降沿结束时，10 bit 寄存器锁存 10 bit X1 或 Y1 地址。图中 $t1$ 为地址 A 的建立时间，$t2$ 为 LD_X 信号或 LD_Y 信号的时间，$t3$ 为延时时间，$t4$ 为地址 A 的保持时间。

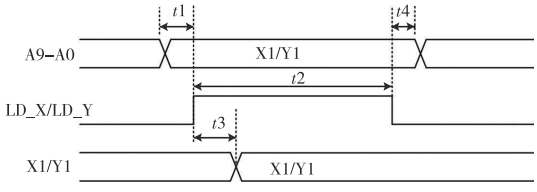


图 3　行/列地址写入时序图

图4为模式寄存器写入时序图，当LD_REG上升沿来临时，地址A9-A8作为4个8 bit内部寄存器写入选通控制，控制地址A7-A0作为模式控制值存储到对应的8 bit内部寄存器中；当LD_REG下降沿结束时，8 bit寄存器锁存8 bit模式控制值。其中$t1$为地址A的建立时间，$t2$为LD_REG的宽度，$t3$为延时时间，$t4$为地址A的保持时间。

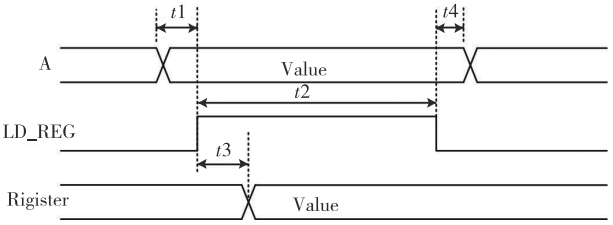


图4 模式寄存器写入时序图

为进一步提高CMOS图像传感器性能，在后续处理电路中增加PGA电路模块，通过可编程增益控制信号，使图像传感器能够根据需要获取不同放大倍数的电信号，最后将信号传送到ADC进行模数转换处理获得所需要的数字信号。PGA电路模块可以根据光强变化来处理不同亮度的信号，是扩展CMOS图像传感器动态范围的重要电路部件，同时其还可以降低系统对片内ADC的精度要求。所设计的PGA电路采用由双端输入、单端输出的两级差分运算放大器和开关电容网络组成的单端闭环反馈结构，电路结构如图5所示，环路输出的可变增益由反馈电容C_f和运算放大器反向输入端对地电容C_{in}的比决定。假设在工作频率带宽基础上，运算放大器的增益足够大，则反馈系统的增益为：

$$A=\frac{C_f+C_{in}}{C_f} \tag{1}$$

公式(1)显示的是在开关S0断开时的增益值，当开关S0闭合后，此PGA为电压跟随器结构，增益为1。PGA电路输入与输出增益对应关系如表1。

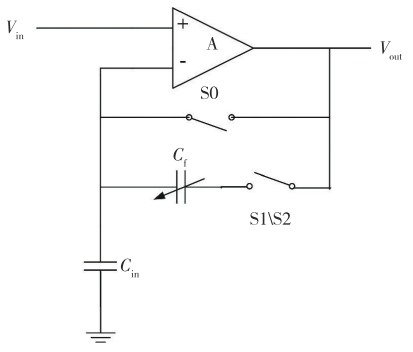


图5 PGA电路结构框图

表1 PGA电路输入与输出增益对应关系

数字码开关(S2,S1,S0)	增益
111	1
110	2
010	4
000	8

在数字码开关S2，S1，S0从111到000的变化过程中，PGA对输入差模信号0.1 V分别进行了1，2，4和8倍的放大。瞬态仿真结果如图6所示，输出信号分别为1.1，1.2，1.4和1.8 V。

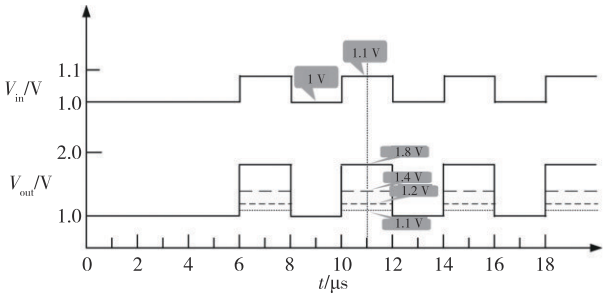


图6 PGA电路仿真结果

所设计的CMOS图像传感器内部集成了采用多级差分pipeline结构的ADC电路，可实现12位精度数字量化。ADC的输入量化范围需与图像传感器的输出电压范围保持一致，受芯片制作工艺影响，传感器的输出电压存在一定波动，因此，ADC输入量化范围需随之进行调整。所设计的CMOS图像传感器内部ADC的量化输入范围由VREF和SENSE两个信号决定，如图7所示，其中VREF为ADC基准电压，SENSE为测试端输入，如果按照1.5 V的ADC量化输入范围，当R_{SENSE}设计为20 k，R_{VREF}设计为10 k时，ADC的量化输入范围T_{ADC}为：

$$T_{ADC}=\frac{2\times V_{SENSE}}{R_{SENSE}}\times(R_{SENSE}+R_{VREF}) \tag{2}$$

式中，V_{SENSE}为SENSE端的测试电压，默认为0.5 V，器件引脚VREF到电容C_1，C_2和电阻R_{VREF}的引线电阻，以及引脚SENSE到电容C_3和电阻R_{SENSE}的引线电阻均尽可能小。

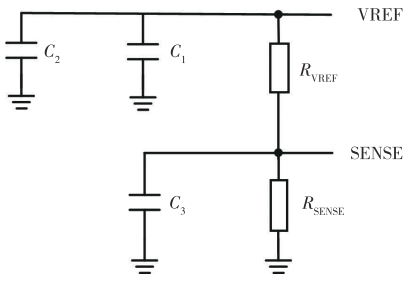


图7 ADC偏置推荐板级连接关系电路图

1.3　随机开窗设计

所设计的CMOS图像传感器同时支持单窗口随机开窗和多窗口随机开窗两种读出模式，且开窗完成后CMOS图像传感器的帧率随开窗像素数与总像素数的比例等比例提高。单窗口随机开窗读出模式定义窗口为一帧图像，窗口的曝光、控制、读出与1.1节中时序完全一致，不同之处在于开窗窗口的行数与列数；多窗口随机开窗读出模式定义在1024(H)×1024(V)像素区域内开N个窗口，一帧时间包括N个窗口的曝光时间、曝光等待时间以及读出时间。下面具体介绍两种开窗模式：

(1)单窗口随机开窗

单窗口随机开窗示意图如图8所示，窗口1为完全独立的120(H)×120(V)像素区域的单窗口，单窗口的行数和列数分别为500～619行和500～619列。图9为120(H)×120(V)单窗口的开窗时序控制说明，开窗后的帧时间T计算公式为：

$$T = 120 \times t2 + t1 = 120 \times (t3 + 120 \times t4) + t1 \quad (3)$$

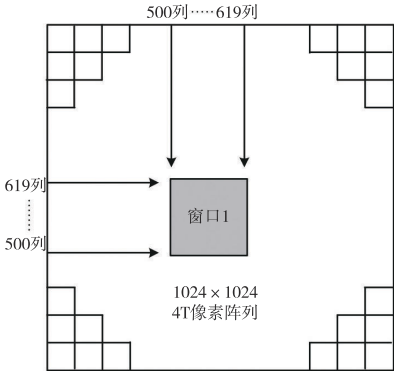


图8　单窗口随机开窗示意图

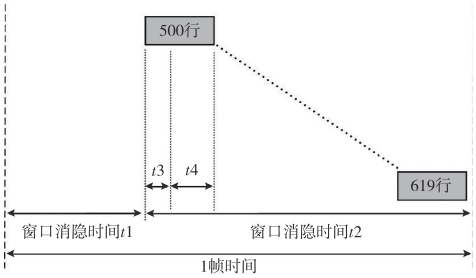


图9　单窗口随机开窗控制时序

行方向开窗之后，被选中的行像素与列像素进行曝光、采样保持、数据读出等操作，窗口首行数据在读出之前增加了窗口消隐时间$t1$(实验设置为600 ns)，窗口消隐时间为窗口帧消隐时间；同时，每行像素读出之前也有行消隐读出时间$t3$(实验设置为6.225 μs)。因此，开窗之后的帧时间为行方向开窗行数乘窗口行读出时间$t2$再加窗口帧消隐时间，窗口行读出时间为行消隐读出时间$t3$加窗口列像素读出时间$t4$(每列像素读出时间约为200 ns)。根据公式(3)计算未开窗时CMOS图像传感器的帧率约为4.6 fps，而开窗窗口1后CMOS图像传感器的帧率约为275.7 fps，帧率提高约60倍。

(2)多窗口随机开窗

多窗口随机开窗定义为在1024×1024分辨率中开N个窗口，每个窗口大小为P(H)×Q(V)。如图10开了3个随机窗口，窗口1区域的像素大小为102(H)×89(V)，窗口2区域的像素大小为251(H)×222(V)，窗口3区域的像素大小为320(H)×350(V)，窗口3与窗口1有部分行列重合区域，即多窗口开窗操作可以进行重叠行和重叠列随机开窗。通过对多窗口开窗的窗口分析可得到窗口数目、窗口左下角的X/Y坐标(对应图像原点)、窗口尺寸等信息，可计算行信息和对应连续行下的列信息。其中行信息包括曝光或读出连续行的个数、连续行的起始X地址及对应连续行行数，列信息包括连续列个数、连续列的起始Y地址及对应连续列列数。例如，图10中窗口1左下角的X/Y坐标为(799,500)，窗口尺寸为1836 μm×1602 μm，曝光或读出连续行的个数为102，连续行的起始X地址为799，连续列的个数为89，连续列的起始Y地址为500。

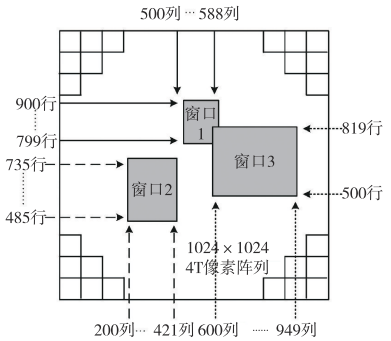


图10　多窗口随机开窗示意图

图11为多窗口开窗时序控制说明，多窗口开窗时序控制包括曝光时序控制阶段$t5$、曝光等待阶段$t6$以及窗口读出阶段$t7$，在窗口读出阶段多窗口数据读出为逐行读出、行方向M个连续列依次读出。

当多窗口重叠行重叠列进行开窗操作时，需要识别出开窗起始位置的行信息与行对应下的列信息，然后才能通过时序控制，读出图像数据后，再通过上位机处理来得到多窗口图像信息；同时，为了使多窗口开窗中的每一行的曝光时序完全一致，曝

光时序控制阶段中每行的曝光控制时序时间$t5$应完全一致，窗口读出阶段每个连续行的读出时间也要完全相同。窗口首行数据在读出之前增加了窗口消隐时间$t9$，窗口消隐时间为窗口帧消隐时间。多窗口读出阶段从第X行到第$X+P$-1行依次读出，每行都有相应的读出时序。除此之外，如果窗口有重叠区域，行读出时序必须把多窗口下的同行数据读完后才可进行下一行数据的读出，即在某一行读出后须增加相应的列清除时序。

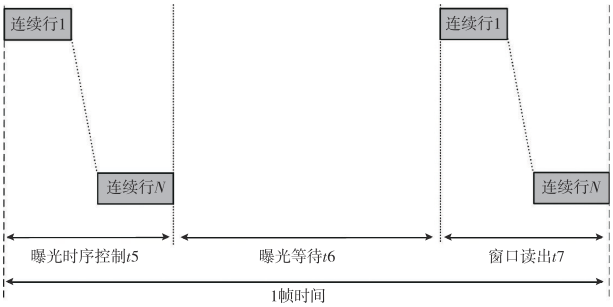
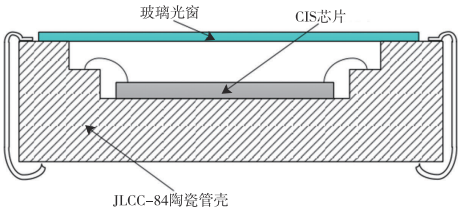


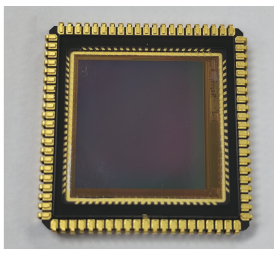
图11 多窗口随机开窗控制时序

2 器件封装及测试

所设计CMOS图像传感器整体结构如图12(a)所示，器件采用陶瓷管壳进行非气密封装，陶瓷管壳尺寸为30.23 mm×30.23 mm。器件通过银浆粘贴在陶瓷管壳内部，采用bk7玻璃光窗进行非气密封装，光窗透光率不低于98%@400～900 nm；波前透射面面型小于1/20波长，透射面平面度小于10 s，两个面平行度小于10 s；封装后芯片实物照片如图12(b)所示。



(a)结构示意图



(b)实物照片

图12 CMOS图像传感器的结构示意图和实物照片

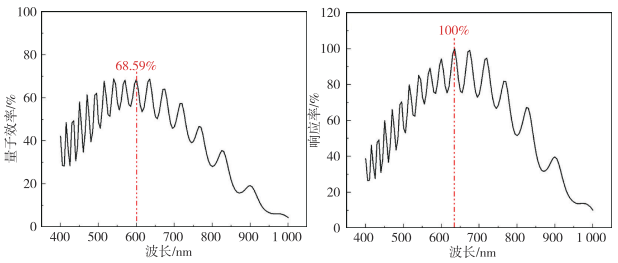
3 器件测试

3.1 性能测试

所设计的CMOS图像传感器的性能测试结果如表2所示。其中满阱容量表征填满CMOS图像传感器势阱的信号电荷数，满阱容量数值可以通过光子传递曲线获得，即提取光子传递曲线线性区和非线性的拐点所对应的灰度值，结合转换增益即可得到满阱容量，经测所设计的CMOS图像传感器的满阱容量为64.3 ke$^-$。动态范围是CMOS图像传感器能处理的最强光照和最弱光照的比值，通常被定义为满阱容量和噪声的比值，体现了CMOS图像传感器对同一场景中不同光照条件的图像采集能力，所设计的CMOS图像传感器动态范围大于60 dB，满足空间宇航应用及高速目标识别等领域的应用需求。该CMOS图像传感器的光谱响应范围为400～900 nm，如图13为CMOS图像传感器的量子效率和响应率测试曲线。如图13(a)所示，当波长为600 nm时，器件的量子效率为55.03%；如图13(b)所示，当波长为660 nm时，器件的响应率为100%。

表2 CMOS图像传感器性能参数测试结果

指标名称	参数测试
光谱响应范围	400～900 nm
峰值量子效率	68.59%@600 nm
噪声	60.2 e$^-$
满阱容量	64.3 ke$^-$
ADC位数	12 bit
动态范围	60.57 dB
光响应非均匀性(PRUN)	1.26%

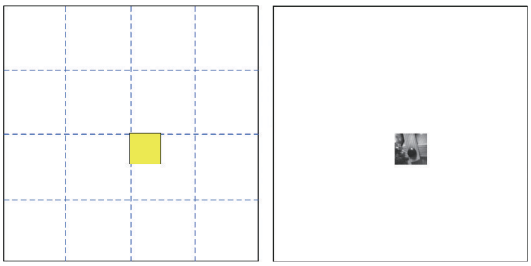


(a) 量子效率 (b) 响应率

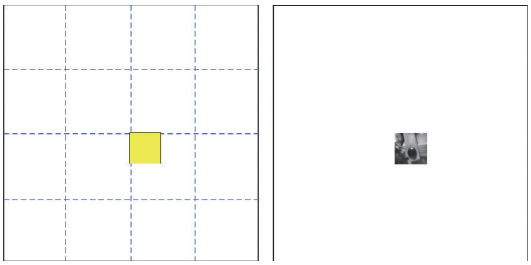
图13 CMOS图像传感器的量子效率和响应率测试曲线

如图14为所设计的CMOS图像传感器随机开窗成像图，图14(a)为1024(H)×1024(V)全画幅成像图，成像帧率约为4.6 fps；图14(b)为120(H)×120(V)单窗口随机开窗成像图，单窗口的行数和列

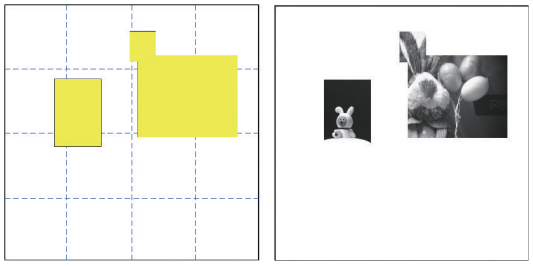
数分别为 500～619 行和 500～619 列，开窗位置为图中左侧黄色方框，开窗后成像帧率约为 275.7 fps，相比于未开窗时，CMOS 图像传感器的帧率提高约 60 倍；为了使图像传感器成像达到更好的曝光效果，可以将 CMOS 图像传感器的 PGA 增益倍数设置为 8 倍。图 14(c)为多窗口随机开窗成像图，开窗位置为图中左侧黄色方框，开窗后成像帧率约为 26.4 fps，相比于未开窗时，帧率提高约 5.7 倍，此时 PGA 增益倍数设置为 4 倍。



(a) 1024×1024 全画幅成像@4.6fps



(b) 120×120 单窗口随机开窗成像@275.7fps×PGA 8 倍



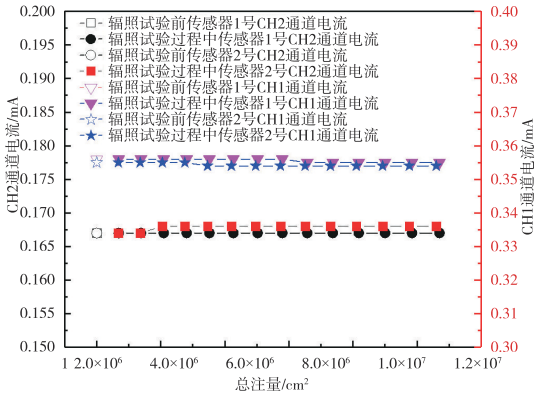
(c) 多窗口随机开窗成像@26.4fps×PGA 4 倍

图 14　CMOS 图像传感器成像图

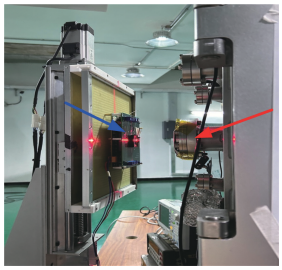
3.2　辐照测试

空间辐射对 CMOS 图像传感器产生的损伤效应主要有三种：总剂量效应、位移损伤效应和单粒子效应。辐照损伤会诱发图像传感器产生暗信号增大、饱和输出电压减小、噪声增大、量子效率减小、暗信号尖峰和随机电码信号等现象，导致图像成像质量下降，严重时甚至导致图像传感器功能失效，因此，抗辐照性能是空间用 CMOS 图像传感器的关键性能指标[16-22]。单粒子中断实验使用的重离子单粒子辐射源为 Ge，Ge 粒子的有效 LET 值大于等于 37 MeV·cm^2/mg，而单粒子闩锁实验使用的重离子单粒子辐射源为 Ta，Ta 粒子的有效 LET 值大于等于 83.85 MeV·cm^2/mg。实验过程中将 Ge 和 Ta 粒子按照一定的剂量率(10 000 ions·cm^{-2}s^{-1})对 CMOS 图像传感进行辐射，直到总剂量大于等于 1×10^7 ions·cm^{-2}为止。

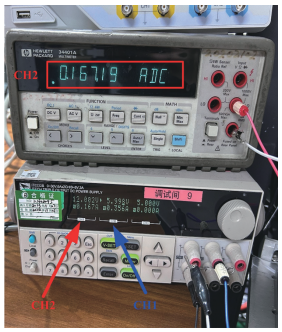
如图 15 为所设计的 CMOS 图像传感器单粒子闩锁辐照实验照片及辐照过程中电流状态照片。图 15(a)为所设计的 CMOS 图像传感器单粒子闩锁辐照实验总注入量与器件电流关系曲线；图 15(b)为所设计的 CMOS 图像传感器单粒子闩锁辐照实验过程照片，图中红色箭头处为辐照源所在的真空靶室，蓝色箭头处为 CMOS 图像传感器；图 15(c)为所设计的 CMOS 图像传感器单粒子闩锁辐照过程中 CH2 通道电流状态照片，图中蓝色箭头处显示 CH1 通道的电流值，红色箭头处显示 CH2 通道的电流值，上方红色方框处为 CH2 通道的电流值。如图 15(a)和(c)所示，经测试，辐照实验前，本文设计的两只 CMOS 图像传感器 CH1 通道的工作电流分别为 0.355 A 和 0.356 A，CH2 通道的工作电流分别为 0.167 A 和 0.167 A，在辐照实验过程中，两只 CMOS 图像传感器 CH1 通道的工作电流均在 0.354～0.356 A 范围内，CH2 通道的工作电流均在 0.167～0.168 A 范围内，器件电流大小符合设定标准，判断两只 CMOS 图像传感未发生单粒子闩锁效应。与此同时，在辐照实验完成一个月后，对两只 CMOS 图像传感器的工作电流进行测试，发现其工作电流依旧为 0.167 A，再次证明两只器件在经过单粒子闩锁实验后工作状态正常，未发生单粒子中断和单粒子闩锁效应。



(a) 辐照实验总注入量与器件电流关系曲线



（b）辐照实验照片



（c）辐照过程中电流状态照片

图15 CMOS图像传感器单粒子闩锁辐照实验

4 结论

针对目标跟踪、模式识别以及星敏感器等应用场景，本文基于0.13 μm CMOS图像传感器专用工艺平台，通过像素设计、读出电路设计以及随机开窗功能设计等，研制出一款具备多窗口随机开窗、抗晕、抗辐照等功能的CMOS图像传感器。相较于传统CMOS图像传感器，所研制的可随机开窗CMOS图像传感器的帧率可随开窗窗口大小而提升，可以捕捉快速移动的物体，防止物体出现模糊和减少运动伪影。测试结果表明，所设计的CMOS图像传感器具有输出电压摆幅高、噪声低等优点，具备对单粒子辐射源Ge粒子有效LET值大于等37 MeV·cm^2/mg，Ta粒子有效LET值大于等于83.85 MeV·cm^2/mg单粒子效应的免疫，同时凭借其独特的多窗口随机开窗功能，在目标跟踪、模式识别以及星敏感器成像等领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] Sheraw C D, Zhou L, Huang J R, et al. Organic thin-film transistor-driven polymer-dispersed liquid crystal displays on flexible polymeric substrates [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(6): 1088-1090.

[2] 江永清，周 岩，刘昌举，等. 256×256 CMOS读出电路随机开窗的简易实现[J]. 半导体光电，2011，32(1)：105-108.
Jiang Yongqing, Zhou Yan, Liu Changju, et al. A simple implementation of arbitrary windowing in 256 × 256 CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(1): 105-108.

[3] 程会艳，郑 然，武延鹏，等. 一种基于迭代遍历的星敏感器抗杂光星点提取方法及装置：CN113532446B[P]. 2022-07-05.
Cheng Huiyan, Zheng Ran, Wu Yanpeng, et al. Star sensor anti-stray light star point extraction method and device based on iterative traversal: CN113532446B[P]. 2022-07-05.

[4] 潘 铮，彭呈祥，唐 琦，等. 基于NAND FLASH的高帧频大容量CMOS相机的设计[J]. 北华航天工业学院学报，2022，32(3)：8-10，13.
Pan Zheng, Peng Chengxiang, Tang Qi, et al. Design of a high-rate and large-capacity CMOS camera based on NAND FLASH [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2022, 32(3): 8-10, 13.

[5] Scheffer D, Dierickx B, Meynants G. Random addressable 2048/spl times/2048 active pixel image sensor [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1997, 44(10): 1716-1720.

[6] Takahashi T, Kaji Y, Tsukuda Y, et al. A 4.1Mpix 280fps stacked CMOS image sensor with array-parallel ADC architecture for region control[C]//2017 Symposium on VLSI Circuits. IEEE, 2017: C244-C245.

[7] Cao C, Shirakawa Y, Tan L, et al. A time-resolved NIR lock-In pixel CMOS image sensor with background cancelling capability for remote heart rate detection[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(4): 978-991.

[8] Lee S, Jeong J, Kim T, et al. 28.3 a 5.2Mpixel 88.4dB-DR 12in CMOS X-ray detector with 16b column-parallel continuous-time ΔΣ ADCs [C]//2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC). IEEE, 2020: 434-436.

[9] Zeng J, Kuang L, Miscourides N, et al. A 128 × 128 current-mode ultra-high frame rate ISFET array with in-pixel calibration for real-time ion imaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2020, 14(2): 359-372.

[10] 李渊清. 抗辐射数字像素CMOS图像传感器研究[D]. 天津：天津大学，2014.
Li Yuanqing. Research on radiation-hardness-by-design for digital pixel CMOS image sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[11] 闻 超，韩本光，汪西虎，等. 一种CMOS图像传感器4T-APS像素电路线性化技术[J]. 微电子学与计算机，2016，33(2)：31-33，38.
Wen Chao, Han Benguang, Wang Xihu, et al. A linearization method for 4T-APS pixel circuit in CMOS image sensor[J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(2): 31-33, 38.

[12] 王 帆，李豫东，郭 旗，等. 温度对4管像素结构CMOS图像传感器性能参数的影响[J]. 发光学报，2016，37

(3)：332.
Wang Fan, Li Yudong, Guo Qi, et al. Temperature effects on performance parameters in 4T CMOS image sensor[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(3): 332.

[13] 李毅强，刘昌举，祝晓笑．640×512焦平面读出电路设计[J]．半导体光电，2014，35(5)：777-781.
Li Yiqiang, Liu Changju, Zhu Xiaoxiao. 640 × 512 focal plane array readout circuit design [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 777-781.

[14] 吴治军，李毅强，彭　松，等．一种应用于CMOS图像传感器数字双采样ADC的PGA电路[J]．半导体光电，2020，41(2)：200-204.
Wu Zhijun, Li Yiqiang, Peng Song, et al. A PGA circuit on digital double sampling ADC of CMOS image sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 200-204.

[15] 刘业琦，刘戈扬，祝晓笑．一种适用于昼夜兼容CMOS图像传感器的动态范围拓展方法[J]．半导体光电，2022，43(4)：760-764.
Liu Yeqi, Liu Geyang, Zhu Xiaoxiao. A dynamic range expansion method for day night compatible CMOS image sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 760-764.

[16] Beaumel M, Hervé D, Van Aken D, et al. Proton, electron and heavy ion single event effects on the HAS2 CMOS Image Sensor[C]//2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). IEEE, 2013: 1-8.

[17] 徐春剑，孔　翔，余鑫晨，等．一种芯片单粒子闩锁防护系统及其控制方法：中国，CN114362106A[P]．2021-12-26.

[18] 彭克武，钟英俊，江　军，等．一种双极型电路在空间单粒子环境下的闩锁效应[J]．环境技术，2022，40(2)：84-87.
Peng Kewu, Zhong Yingjun, Jiang Jun, et al. Latch up effect of a bipolar circuit in space single event environment[J]. Environmental Technology, 2022, 40(2): 84-87.

[19] 莫莉华．新型FinFET器件和3D堆叠器件的单粒子效应研究[D]．兰州：中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所)，2021.
Mo Lihua. Investigation of single event effects in new FinFET device and 3D stacked device [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.

[20] 王祖军，杨　勰，赖善坤，等．CMOS图像传感器中子位移辐照损伤效应仿真模拟研究[J]．现代应用物理，2022，13(3)：152-159.
Wang Zujun, Yang Xie, Lai Shankun, et al. Simulation of displacement damage of CMOS image sensors irradiated by neutron [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 152-159.

[21] 王祖军，聂　栩，唐　宁，等．CMOS图像传感器辐射敏感参数测试电路设计及试验验证[J]．半导体光电，2024，45(2)：216-221.
Wang Zujun, Nie Xu, Tang Ning, et al. Test circuit design and radiation experiment verification of CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 216-221.

[22] 赵明程，杨世洪，吕升林，等．星敏感器抗杂光的复合型背景估计星图处理算法[J]．半导体光电，2023，44(4)：627-632.
Zhao Mingcheng, Yang Shihong, Lü Shenglin, et al. Composite background estimation star map processing algorithm for star sensor resistant to stray light [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(4): 627-632.

作者简介：

蒋祥倩(1993—)，女，黑龙江省鹤岗市人，博士研究生，工程师，研究领域为CMOS图像传感器；

刘昌举(1981—)，男，重庆市梁平区人，博士研究生，高级工程师，研究领域为高性能图像传感器芯片与成像微系统。