

一种昼夜兼容成像 EMCCD 图像传感器

白雪平, 钟玉杰, 杨 洪, 郑 渝, 何 达, 易学东, 黄 芳

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 本文设计制作了一款阵列规模为 1024×1024 元、像元尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的昼夜兼容成像 EMCCD (electron multiplying charge coupled device), 该器件包含国内首次制作的浮置栅放大器, 该放大器电荷转换因子 (Charge to voltage factor, CVF) 为 $3.57 \mu\text{V}/\text{e}^-$, 满阱 55ke^- , 能够非破坏性判断信号强度。该功能使得场景中微光照区域的像素可以选择性地路由至倍增通道输出, 而强光照区域的像素会路由至非倍增通道输出, 有了这种场景内可切换增益特性, 两种输出的信号重新组合, 实现高动态成像。同时为了实现器件在强光应用场合的抗光晕功能, 器件像元区域采用了纵向抗晕设计, 抗晕倍数为 200 倍, 基于此类器件制作的相机能够恰当地在暗视场中呈现明亮的图像。

关键词: 场景内可切换增益; 浮置栅放大器; 抗光晕; 电子倍增; 图像传感器

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2023)03-0315-07

An EMCCD Imaging Sensor Capturing Images from Sunlight to Starlight

BAI Xueping, ZHONG Yujie, YANG Hong, ZHENG Yu, HE Da, YI Xuedong, HUANG Fang

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)

Abstract: A 1024×1024 EMCCD imaging sensor that captures images from sunlight to starlight was designed and fabricated. The pixel size was $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$. The device includes nondestructive floating gate output amplifier, its charge-to-voltage conversion factor is $3.57 \mu\text{V}/\text{e}^-$, and its charge handling capacity is 55.04ke^- . The nondestructive floating gate output amplifier can sense the amount of charge present in a charge packet without altering the number of electrons in that charge packet. This enables the camera system to determine whether the pixel charge packet is routed through the normal gain output or the EMCCD output based on a user-selectable threshold. The intra-scene switchable gain feature enables wide-scale dynamic imaging. A vertical overflow drain structure suppressed the image blooming by $200\times$. This feature enables imaging under extremely low light, even when bright objects are within a dark scene, thus allowing a single camera to capture quality images from sunlight to starlight.

Key words: intra-scene switchable gain mode, floating gate amplifier, anti-blooming, electron multiplication, imaging sensor

0 引言

长期以来, CCD (Charge Coupled Device) 图像传感器一直是 $400 \sim 900 \text{nm}$ 波段的主要成像器件, 近年来一些新型传感器逐步进入实用阶段, 其中包括 EMCCD (Electron Multiplying CCD) 图像传感器, 它与普通 CCD 不同之处是在串行读出寄存器后增加了固态电子倍增结构, 信号电荷在进入读出放大器前先进进行倍增放大, 因此 EMCCD 可不受读出噪声的限制^[1], 再通过高效制冷措施抑制暗电流噪声, 灵敏度得以大

幅提高。常规 EMCCD 强信号进入倍增通道使得倍增寄存器易饱和, 图像表现出“拖尾”现象, 同时也会缩短器件寿命。虽然 Eric G Stevens 等人提出倍增相下采用单氧化层介质可以消除增益老化效应^[2], 但由于倍增寄存器电荷容量限制, 常规 EMCCD 适合暗弱低动态成像环境。

国外 20 世纪 90 年代开始 EMCCD 研制, 2001 年 E2V 推出第一款背照帧转移 EMCCD 产品, 随后陆续推出多款产品, 2014 年 Onsemi 推出第一款采用非破坏性浮栅放大器的高动态 EMCCD (KAE-02150)。

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-03-18.

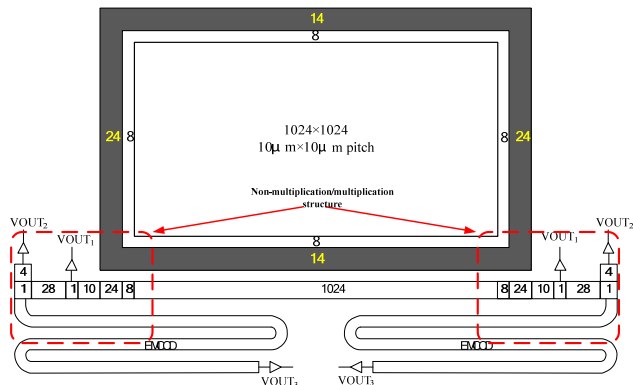
作者简介: 白雪平 (1982-), 女, 高级工程师, 从事 CCD 器件的设计研究工作。E-mail: 50220374@qq.com。

国内 2010 年开始常规 EMCCD 研制, 本文首次将非破坏性浮置栅放大器引入到 EMCCD, 使得信号电荷包选择性路由至输出通道, 强信号电荷包选择性路由至非倍增通道, 不受倍增通道电荷容量限制, 大幅提高 EMCCD 动态范围。

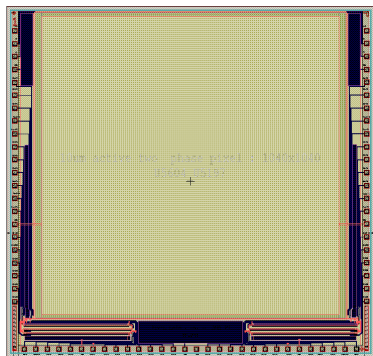
1 结构设计

- 芯片设计参数如下:
- 芯片结构: 内线转移;
- 有效像元数: 1024×1024;
- 像元尺寸: 10 μm (H) ×10 μm (V) ;
- 像元占空比: 43.5%;
- 左右暗像元数: 8;
- 上下暗像元数: 24;
- 抗晕倍数: ≥150;
- 非破坏性浮置栅放大器具备阈值选通功能.
- 1) 整体架构设计

芯片整体架构如图 1 所示, 采用内线转移 CCD 结构, 光敏区有效像元数为 1024×1024 元, 像元尺寸 10 μm (H) ×10 μm (V) , 上下左右各 8 个缓冲像元, 左右各 24 位暗像元, 上下各 14 行暗参考行。



(a) 器件整体架构示意图
(a) Block diagram of the device



(b) 器件版图
(b) Layout of the device

图 1 器件整体架构及版图

Fig.1 Block diagram and layout of the device

信号读出区域包含首次制作的浮置栅放大器 VOUT₁、非倍增输出通道 VOUT₂、倍增输出通道 VOUT₃ 构成的双通道选通结构, 其结构示意图如图 2。

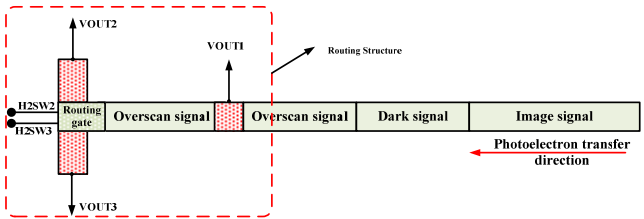


图 2 非倍增/倍增双通道选通结构示意图

Fig.2 Routing process of the non-multiplying and multiplying channels

入射光在光敏区产生光生电荷后, 光生电荷按照传统 CCD 读出方式转移至片上非破坏性浮置栅放大器 VOUT₁, 该放大器在不破坏电荷包完整性的前提下检测信号电荷包的大小, 浮置栅放大器的检测值与测试电路中设定的阈值比较, 以确定各个光生电荷包的路由位置: 浮置栅放大器的检测值小于阈值, 该像元的电荷包则路由至倍增输出通道 VOUT₃, 浮置栅放大器的检测值大于阈值, 该像元的电荷包则路由至非倍增输出通道 VOUT₂^[3]。有了这种场景内可切换增益特性, 两种输出的信号可以通过算法进行图像融合, 实现高动态成像显示, 工作原理框图如图 3 所示。

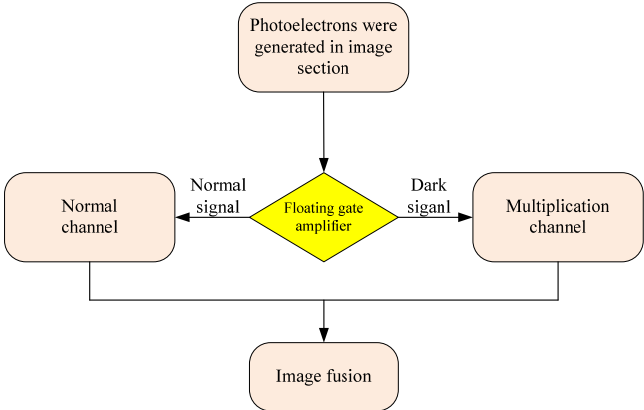


图 3 器件工作原理框图

Fig.3 Flow chart of the device working principle

2) 非破坏性浮置栅放大器设计

浮置栅放大器结构见图 4, 为便于对比, 图 4 中同时也给出了浮置扩散放大器, 浮置栅放大器与浮置扩散放大器最大区别在于光生电荷存储位置不同: 途经浮置栅放大器的光生电荷存储在多晶硅制作的浮置栅所形成的势阱之中, 完成电荷电压转换后, 存储在浮置栅势阱之中的光生电荷不会被复位至电源漏端, 光生电荷信号完整性不会被破坏, 可以继续路由至相应通道输出; 途经浮置扩散放大器的光生电荷存储在 PN 结形成的电容之中, 完成电荷电压转换后,

存储在 PN 结电容的光生电荷被复位至电源漏端, 光生电荷信号读出完成。

浮置栅放大器版图如图 5 所示, 浮置栅放大器由浮栅 FG、周围的控制电极 H2S、OG1、浮置栅势阱信号转出栅 H2X 以及常规源跟随放大器相连接构成浮置栅放大器。非破坏性浮置栅放大器复位栅 RG1 在栅电极 H2X 之前偏置在高电平, 使得浮置栅偏置在恒定的电平, 当信号电荷填充浮置栅势阱时, 使得浮置栅电势发生变化, 根据公式^[4]:

$$V=Q/C$$

(1)

式中: Q 是电荷包电量; C 是浮置栅电容, 通过上述公式可以计算出对应光生电荷电量产生的电压, 此电压与测试电路中的阈值比较, 确定各个光生电荷信号的路由位置, 光生电荷信号通过浮置栅放大器传输过程如图 6 所示: A 过程, 光生电荷信号存储在水平 CCD 存储相 H1S 势阱之中; B 过程, 存储在 H1S 势阱之中的光生电荷信号转移至 H2S 势阱之中, H2X 处于高电平, 转移出浮置栅 FG 中存储的上一帧信号, 浮置栅势阱处于空阱状态, 以备下一帧信号存储; C 过程, 复位脉冲 RG1 复位浮置栅, 使得浮置栅处于一恒定的电平, 即图 6(b)中 VOUT1 输出波形所示的参

考电平; D 过程, 光生电荷信号转移至浮置栅 FG, 光生电荷信号填充浮置栅 FG 势阱, 转化为图 6(b)中 VOUT1 输出波形所示的光生电荷信号电平。

在驱动脉冲设计时, 栅电极 H2X 把存储在浮置栅下的信号转移出来, 重点关注以下两点: ①非破坏性浮置栅放大器复位栅 RG1 脉冲宽度至少与栅电极 H2X 一样; ②栅电极 H2X 脉冲上升沿与水平 CCD 势阱相 H1S 下降沿相对位置影响电荷转移, 如果栅电极 H2X 脉冲上升沿来的太快, 有可能导致信号倒流。

光生电荷信号通过浮置栅放大器转化为电压信号后, 该电压信号与驱动电路设置的阈值比较, 光生电荷信号经输出选通栅 H2SW2、H2SW3 实现路由: 当光生电荷信号转化的电压信号低于某一设定电压值时, H2SW2 关闭, H2SW3 开启, 光生电荷信号路由至倍增输出 VOUT3; 当光生电荷信号转化的电压信号高于某一设定电压值时, H2SW3 关闭, H2SW2 开启, 光生信号路由至非倍增输出 VOUT2, 实现光生电荷信号选择性通过非倍增/倍增通道输出, 输出选通栅 H2SW2、H2SW3 以及浮置栅放大器版图如图 7 所示。

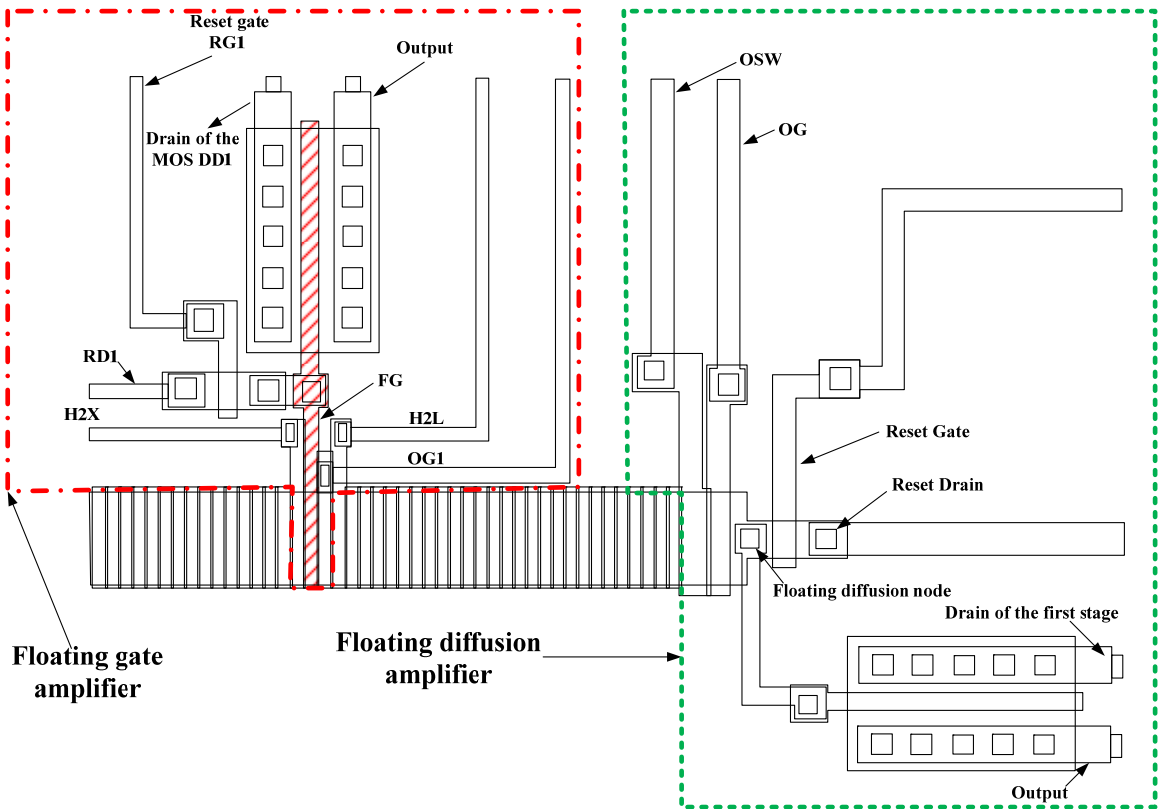


图 4 浮置栅放大器以及浮置扩散放大器结构示意图
Fig.4 Diagram of the floating gate amplifier and floating diffusion amplifier

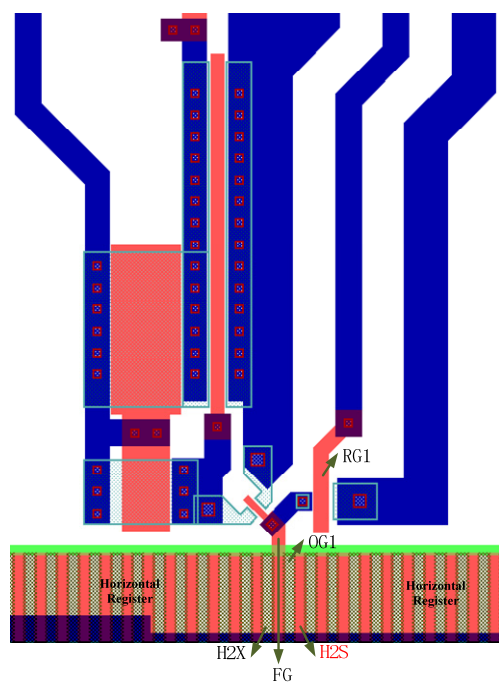
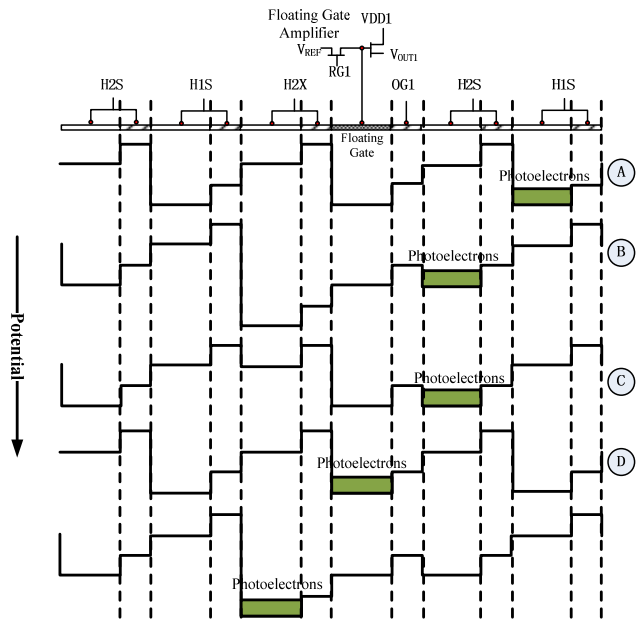


图 5 浮置栅放大器版图

Fig.5 Layout of the floating gate amplifier

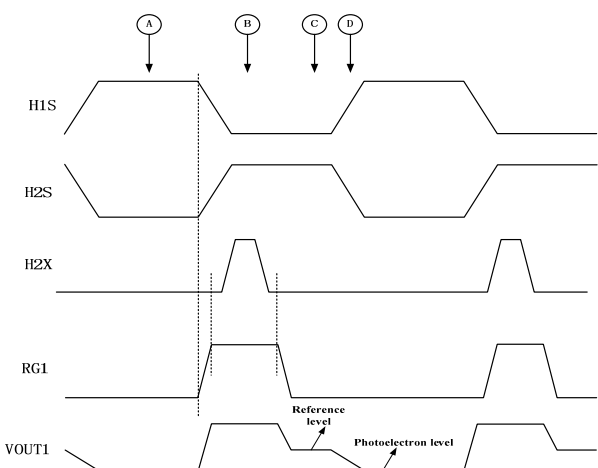
3) 像元架构设计

为了实现器件在强光应用场合的抗光晕功能，器件像元采用了内线转移 CCD 纵向抗晕设计，像元架构示意图如图 8 所示，器件基于 N 型衬底制作，纵向抗晕结构由光电二极管 n 型层、p 阱以及 N 型衬底构成，光电二极管 n 型层作为穿通晶体管的发射极，p 阱作为基极，n 型衬底作为集电极。过剩光生载流子进入衬底形成穿通电流，实现器件纵向抗晕功能^[5-8]。



(a) 光生电荷信号通过浮置栅放大器传输过程

(a) Process of signal transferring through the floating gate amplifier



(b) 驱动脉冲

(b)Timing diagram of the horizontal register and amplifier

图 6 光生电荷通过非破坏性浮置栅放大器传输

Fig.6 Process and timing diagram of signal transferring through the floating gate amplifier

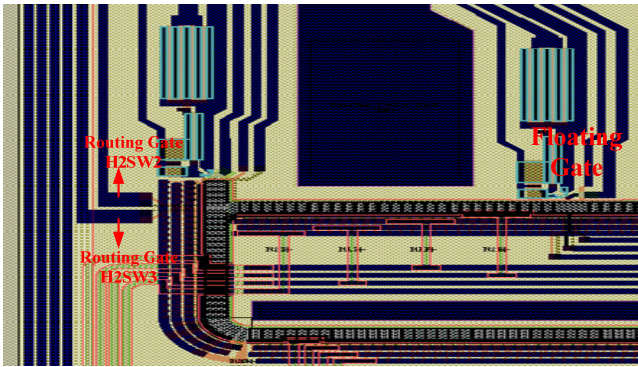
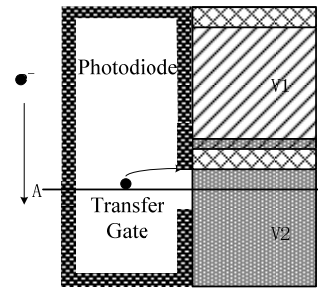


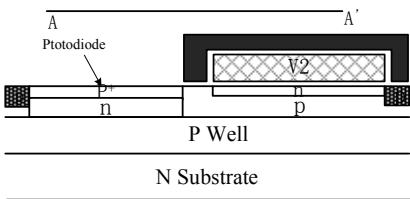
图 7 输出选通栅 H2SW2、H2SW3 版图

Fig.7 Layout of the routing gate H2SW2 and H2SW3



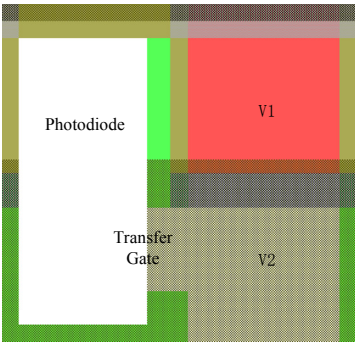
(a) 像元结构示意图

(a) Pixel structure



(b) AA'方向剖面图

(b) Profile of the pixel in the AA' direction



(c) 像元版图

(c) Layout of the pixel

图8 像元架构及版图

Fig.8 Structure and layout of the pixel

2 器件制作

器件采用 6 in、最小特征尺寸 0.5 μm 工艺制作，衬底采用电阻率 4~7 $\Omega\cdot\text{cm}$ 的 N 型(100)硅。采用两层多晶硅和两次金属工艺，第一次金属用作电极，第二次金属用作垂直 CCD 挡光。图 9 为制作了昼夜兼容 EMCCD 的晶圆，器件有效像素为 1024 \times 1024 元，像素尺寸为 10 $\mu\text{m}\times$ 10 μm ，芯片尺寸为 12.84 mm \times 12.23 mm；采用两级半导体制冷封装器件，如图 10 所示。

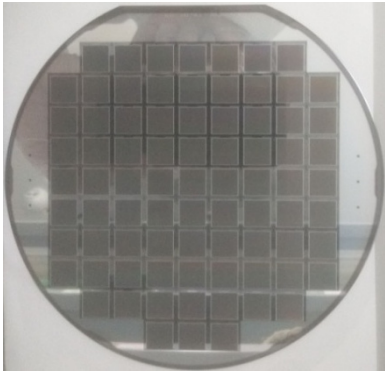


图9 昼夜兼容 EMCCD 的晶圆

Fig.9 Wafer of the day and night EMCCD

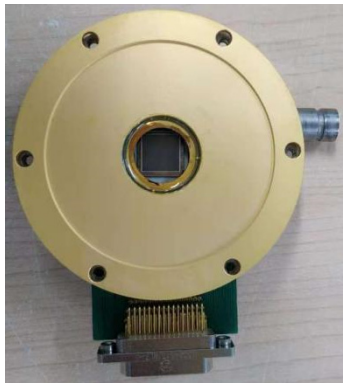


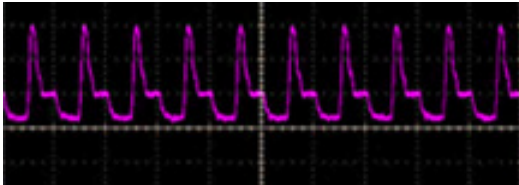
图10 制冷封装的昼夜兼容 EMCCD

Fig.10 Peltier pack of the day and night EMCCD

3 器件性能

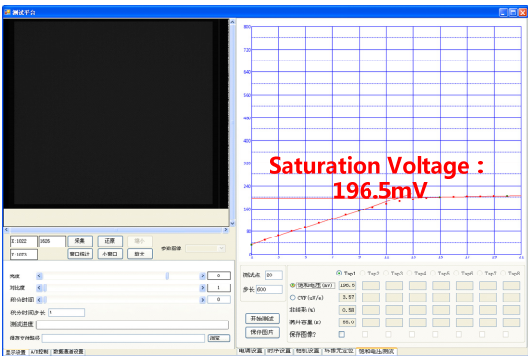
1) 浮置栅放大器性能测试

图 11(a)为浮置栅放大器输出波形，可以看出其输出波形与前面浮置栅放大器设计一致，图 11(b)所示为浮置栅放大器饱和输出曲线，饱和幅度为 196.5 mV，图 11(c)为浮置栅放大器 CVF 曲线，其电荷转换因子 CVF 为 3.57 $\mu\text{V}/\text{e}^-$ ，满阱 55 ke^- ，浮置栅放大器性能测试表明该放大器工作正常^[9]。



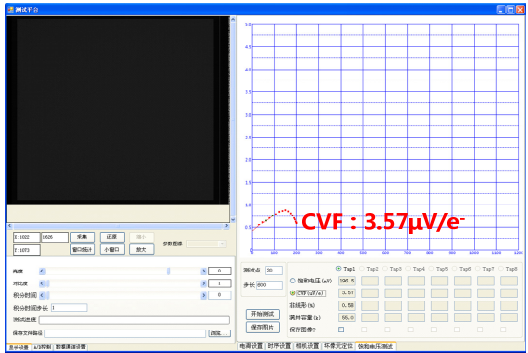
(a) 浮置栅放大器输出波形

(a) Output of the floating gate amplifier



(b) 浮置栅放大器饱和输出电压曲线

(b) Output voltage curve of the floating gate amplifier



(c) 浮置栅放大器 CVF 电压曲线

(c) Photon transfer curve of the floating gate amplifier

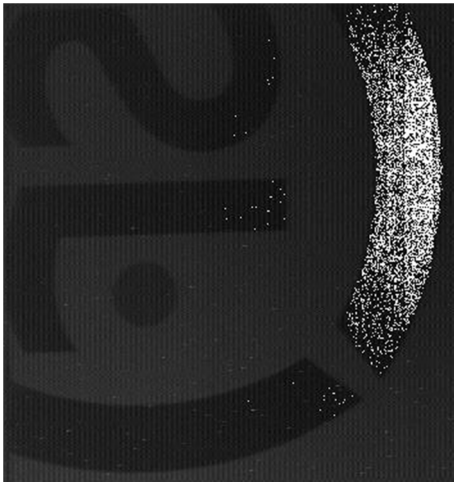
图11 浮置栅放大器性能测试

Fig.11 Performance of the floating gate amplifier

2) 场景内可切换增益特性

如图 12(a)场景内可切换增益成像演示，开启场景内可切换增益功能时，图 12(a)中较亮像素来自倍增通道输出，其余像素来自非倍增通道输出，器件具备场景内可切换增益特性。

融合后的图像在亮暗交界区来自两个输出通道，如不经过图像处理，直接将两通道信号合成到一幅图像中，亮暗交界区会存在不平滑现象，如图 12(a)所示。一般图像融合时会根据倍增通道的倍增倍数对非倍增通道信号匹配系数，经过系数匹配后的图像在亮暗交界区是平滑的，如图 12(b)所示。



(a) 未经过系数匹配的融合图像
(a) The original image of the two outputs



(b) 经过系数匹配的融合图像
(b) The corrected image of the two outputs

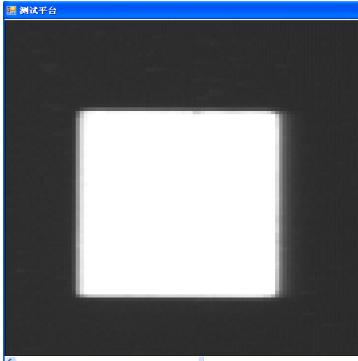
图 12 图像融合效果

Fig.12 Images of the intra-scene switchable gain

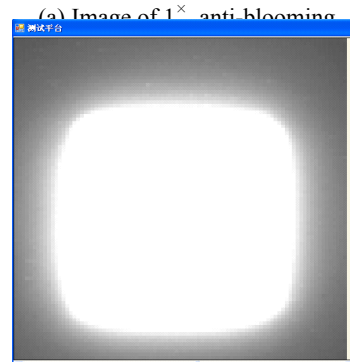
3) 器件纵向抗晕性能

器件纵向抗晕性能测试如图 13 所示，图 13(a)为临界饱和时光斑成像，光斑尺寸为 50 像素×50 像素；图 13(b)为增大光强至 100 倍临界饱和状态时光斑成像，此时光斑尺寸为 50 像素×69 像素，相比于临界饱和时光斑垂直方向尺寸，此时光斑扩展了 19 个像素；图 13(c)为增大光强至 200 倍临界饱和状态时光斑成像，此时光斑尺寸为 50 像素×88 像素，相比于临界饱和时光斑垂直方向尺寸，此时光斑扩展了 38 个

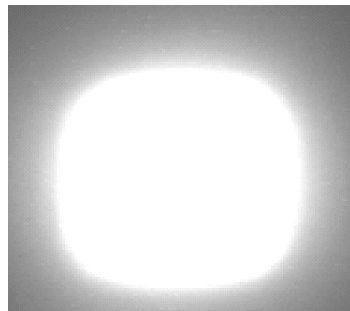
像素，按照光斑扩展两倍要求^[10]，此时扩展像素小于 50 像素，表明器件抗晕倍数优于 200 倍。



(a) 临界饱和状态



(b) 100 倍饱和状态
(b) Image of 100[×] anti-blooming



(c) 200 倍饱和状态
(c) Image of 200[×] anti-blooming

图 13 器件抗晕性能测试

Fig.13 Anti-blooming performance of the device

4) 阈值设置

该器件最佳阈值设置是在两抽头信噪比相等时，此时阈值设置值 S 如式(2)：

$$S=\delta^2(G+1)/G \tag{2}$$

式中： S 为信号电子数； δ 为噪声电子数（假定两输出抽头读出噪声相同）； G 为倍增增益，取值一般 10 倍以上，因此有：

$$S\approx\delta^2 \tag{3}$$

EMCCD 适用场景是 $1\sim100\text{e}^-$ 之间，因此需将噪声控制在 10e^- 以内。考虑到浮置栅放大器的噪声，

一般阈值设置值是浮置栅放大器噪声 3 倍以上^[11]。

该器件倍增输出抽头和非倍增输出抽头噪声约 $60e^-$ 左右,按照(3)式计算的最佳阈值设置值为 $3600e^-$ 。按照该最佳阈值,经过倍增寄存器的电子数过多,易导致倍增寄存器老化。因此还需要进一步优化设计,降低噪声。

4 结论

本文研制了一款昼夜兼容成像 EMCCD 图像传感器,该器件具备片上非破坏性输出浮置放大器,可无损检测通过的信号电荷包的大小,将检测结果传递至阈值判定电路,决定该像元电荷包是否经由倍增通道输出,实现像元级路由选通功能。该设计弥补了常规帧转移 EMCCD 光动态低的缺点,具有常规 CCD 无法达到的微光灵敏度,可用于昼夜兼容成像。按照最佳阈值设置理论,该器件输出噪声过大,还需要进一步优化。

参考文献:

- [1] Sudhir K MADAN, Basabi Bhaumik. Experimental Observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices[J]. *IEEE Trans, Electron Device*, 1983, **30**(6):694-699.
- [2] Eric G Stevens, Jeffrey A Clayhold, Hung Doan. Recent enhancements to interline and electron multiplying CCD image sensors[J]. *Sensors*, 2017, **17**: 2841.
- [3] Parks C, Kosman S, Nelson E. A 30fps 1920×1080 pixel electron multiplying CCD image sensor with per-pixel switchable gain[C]//*Proceedings of the 2015 International Image Sensor Workshop (IISW)*, 2015: 8-11.
- [4] James R Janesick. *Scientific Charge Coupled Devices*[M]. USA: SPIE Press, 2001: 585-592.
- [5] Stevens E G, Burkey B C. A 1-megapixel IL-CCD image sensor with a progressive scan, antiblooming control and lag-free operation[C]//*SPIE. Charge-Coupled Device and Solid State Optical Sensors*, 1990: 207-216.
- [6] Eiji Oda, Kenji Nagano, Takanori Tanaka. A 1920(H)×1035(V) pixel high-definition CCD image sensor[J]. *Journal of Solid-State Circuits*, 1989, **24**(3): 711-717.
- [7] Stephen J Strunk. A progressive scan CCD image sensor for high speed photography[C]//*SPIE. Charge-Coupled Device and Solid State Optical Sensors*, 1990: 24-35.
- [8] Oda E, Akiyama I, Kamata T. A 768×490 pixel CCD image sensor[C]//*ISSCC Dig. Tech.*, 1983: 264-265.
- [9] Albert J P Theuwissen. *Solid-State Imaging with CCDs*[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [10] Gareth P Weale, Martin J Kiik, Eric Fox. Anti-Blooming Optimisation using Simulations & Measurements for a VAB Process. *IEEE Trans, Electron Device*, 2003, **10**(3): 186-189.
- [11] ON semiconductor datasheet. KAE-02150/D 1920 (H) × 1080 (V) Interline CCD Image Sensor[R/OL]. www.onsemi.com, 2015.
- [10] 许帆, 姚凯凯, 张锐娟, 等. 航空发动机红外辐射特性测试评估技术[J]. *激光与红外*, 2019, **10**(49): 1223-1227.
XU Fan, YAO Kaikai, ZHANG Ruijuan, et al. Infrared radiation characteristic testing and evaluating technology of aero-engine[J]. *Laser & Infrared*, 2019, **10**(49):1223-1227.
- [11] 姚凯凯, 许帆, 王怡. 飞行器目标空中红外辐射特性测试技术研究[J]. *测控技术*, 2020, **39**(4): 6-10.
YAO Kaikai, XU Fan, WANG Yi. Research on testing technology of airborne radiation characteristics of aircraft[J]. *Measurement & Technology*, 2020, **39**(4): 6-10.
- [12] 刘涛, 丁旭, 张琦. 航空发动机整机红外辐射特性台架试验方案研究[J]. *试验、研究、分析*, 2020, **1**: 41-45.
LIU Tao, DING Xu, ZHANG Qi. Bench test scheme for radiation characteristics of aeroengine[J]. *Design, Research & Analysis*, 2020, **1**: 41-45.
- [13] 关玉波, 尚守堂, 王东明, 等. 发动机整机红外辐射特性测试方案研究[J]. *测控技术*, 2014, **33**: 102-105.
GUAN Yubo, SHAGN Shoutang, WANG Dongming, et al. Research on the infrared radiation tests method for aero engine[J]. *Measurement & Control Technology*, 2014, **33**: 102-105.
- [14] 邓宏伟, 邵万仁, 徐速, 等. 某型航空发动机喷管红外辐射特征数值模拟和试验研究[J]. *航空发动机*, 2010, **36**(1): 44-49.
DENG Hognwei, SHAO Wanren, XU Su, et al. Numerical simulation and experimental investigation of infrared radiation characteristics for an aeroengine exhaust nozzle[J]. *Aeroengine*, 2010, **36**(1): 44-49.
- [15] 任利峰, 邵万仁, 徐速, 等. 航空发动机排气系统红外辐射特性数值研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2018, **31**(4): 19-25.
REN Lifeng, SHAO Wanren, XU Su, et al. Numerical study of infrared characteristics for aero-engine exhaust system[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2018, **31**(4): 19-25.

(上接第 297 页)