

〈微光技术〉

适用于昼夜视觉的微光 CIS

潘京生^{1,2}, 郭一亮^{1,2}, 顾燕^{1,2}, 李燕红^{1,2}, 孙建宁^{1,2}, 张勤东^{1,2}, 苏德坦^{1,2}

(1.北方夜视技术股份有限公司, 江苏南京 211102; 2.微光夜视技术重点实验室, 陕西西安 710065)

摘要: CMOS 图像传感器 (CIS) 相比于 CCD 图像传感器具有可集成更多功能和集成度以及更小的系统尺寸、重量和功耗及成本 (SWaP-C) 的优势, CIS 技术的最新进步, 特别在低读出噪声和高灵敏度的突破, 使其不仅达到了相当于 CCD 图像传感器的图像性能, 同时也将其微光使用限定推进到了微光条件, 介绍了一种高灵敏度低噪声大动态范围的微光 CIS 组件, 具备从白天到多云残月夜晚的实时单色成像能力, 可作为一种在微光成像性能和 SWaP-C 优选的可见光近红外 (VIS-NIR) 昼夜成像器件。

关键词: 微光夜视; 互补金属氧化物半导体; 有源像素传感器; CMOS 图像传感器; 微光 CMOS 图像传感器

中图分类号: TN223, TN215, TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)03-0181-07

Low-light-level CIS for Day/Night Vision

PAN Jingsheng^{1,2}, GUO Yiliang^{1,2}, GU Yan^{1,2}, LI Yanhong^{1,2}, SUN Jianning^{1,2}, ZHANG Qindong^{1,2}, SU Detan^{1,2}

(1.North Night Vision Technology Corp., Ltd., Nanjing 211106, China;

2.Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: CMOS image sensor (CIS), compared with CCD image sensors, has vastly increased functionality and substantial potential for superior integration, low power dissipation and small system size, and recent technology advances, especially the ultra low read noise and superior sensitivity which CIS technology achieved, led to that CMOS image sensor has image performance competitive with CCDs, while the low-light-level CIS is utilized under low light level condition. A low noise high sensitivity and large dynamic range low-light-level CIS camera module for day/night vision is introduced in this paper, which can provide real time digital monochrome video from daylight to cloudy quarter moon night condition (night level 3), and become a perfect cloudy quarter moon night choice of VIS-NIR day/night image device for low-light-level image performance and size, weight and power-cost (SWaP-C).

Key words: low-light-level night vision, complementary metal oxide semiconductor(CMOS), active pixel sensor (APS), CMOS image sensor(CIS), low-light-level CMOS image sensor

0 引言

虽然微光像增强器目前仍然是具有最佳微光探测能力的成像器件, 增强 CCD (ICCD) 和电子轰击 CCD (EMCCD) (包括 ICMOS 或 EBCMOS) 也可直接提供视频甚至数字信号, 但基于像增强器的系统不能昼夜通用, 且不能实现彩色成像, 因此需要寻求一种具有可相当于像增强器的微光成像性能, 并满足昼

夜通用彩色成像要求的固态成像器件。

CMOS 图像传感器可集成更多功能并具有更小的系统尺寸、重量和功耗及成本 (SWaP-C), 特别是低于 2e-RMS 甚至是亚电子相当的低噪声读出电路的开发^[1-3], 使微光 CMOS 图像传感器的使用限定推进到微光条件^[4-7]。

介绍了一种可用于昼夜视觉的低噪声高灵敏度大动态范围的 CMOS 图像传感器, 可作为一种在微光

成像性能和 SWaP-C 优选的 VIS-NIR 昼夜通用成像器件。

1 夜视技术与夜天空辐射

夜视技术源于在夜晚为获得战术优势而采用辅助视觉的需要。夜视技术分为红外热成像和微光像增强。热成像能够获得远距离的定点目标, 具有穿透烟、尘、雾、霾和识别伪装能力, 但不符合人眼视觉习惯, 对场景亮度变化不敏感, 体积重量都很大, 多用于战车战机。微光像增强符合人眼对亮度变化的感知习惯, 可提供目标所在场景的细节信息, 多用于单兵头盔和武器枪瞄具, 但相比于热成像, 视距较短, 特别是在恶劣条件下, 难以取得较好的观察效果。

夜天空的辐射由各种自然辐射源综合形成, 月光、星光、气辉及太阳光、月光和星光的散射光等是夜天空的主要自然辐射源。黄昏黎明时的暮曙光照度约在 1lx 左右。满月在天顶时的晴朗夜晚, 地面照度大约是 0.2 lx ; 多云残月时地面的照度为 $2 \times 10^{-3}\text{ lx}$ (night level 3), 无月晴朗星光时降低到大约 $8 \times 10^{-4}\text{ lx}$, 而在无月多云的夜晚时的照度仅相当于无月晴朗星光时的 $1/4$ 。图 1 所示的是不同夜天空在 VIS-NIR 光谱部份的光子立体角密度^[8]。

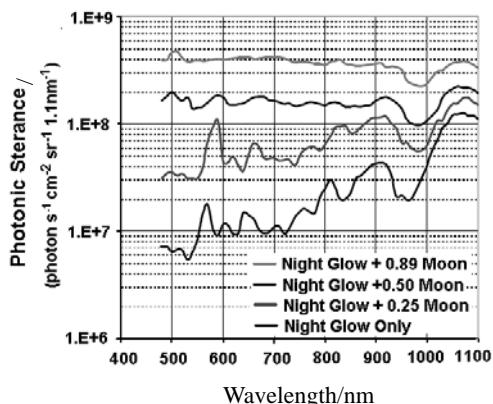


图 1 夜天空的 VIS-NIR 光子立体角密度

Fig.1 Night sky VIS-NIR spectrum photonic sterancet

无月夜晚的多色辐射组份除来自于星光或银河、行星之间的粒子反射阳光, 更多来自于称之为夜气辉的大气层发光。气辉的主要峰值在 SWIR 波段的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ ^[9]。晶格区配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 灵敏于 $0.9\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段, 其可得到的信号相比于可见光信号高出 180 倍, 相比于像增强器灵敏范围信号也高出近 20 倍^[10]。

新一代的步兵夜视头盔系统, 包括武器枪瞄具, 将采用可见光近红外 (VIS-NIR)、短波红外 (SWIR) 和长波红外 (LWIR) 的多传感器^[11], 以确保在日光、夜间、恶劣天气包括雾霾和尘土等多种环境条件, 为士兵提供近和远视的高分辨率的多光谱彩色融合图

像显示, 同时还可通过无线传输使班队成员分享目标图像, 实现士兵间的视觉协作, 提高士兵甚至班队级战斗单位的战场环境意识及探测、辨别和确认战斗威胁的能力。图 2 所示的是无月夜气辉下光子立体角密度与人眼及多种探测器的相应的灵敏范围。

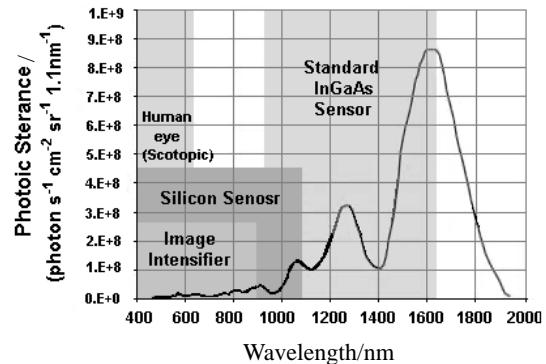


图 2 无月夜气辉下的光子立体角密度及多种探测器的灵敏范围

Fig.2 Moonless night glow spectrum photonic sterancet and sensitivity range of various sensors

通过片上电路结合非均匀校正 (NUC) 的无热电制冷 (TEC) 热平衡工作, 目前基于 InGaAs 焦平面阵列 (FPA) 的 SWIR 传感器和基于 VO_x 微测辐射热计的 LWIR 传感器在功能性和 SWaP-C 都获得了实质性突破^[12-13], InGaAs FPA 在整个响应波段可具有超过 70% 的量子效率, 和室温工作下的极低的暗电流。并且 SWIR 成像具有与可见光相同的成像方式, 可显示景物阴影和对比度, 在分辨率和细节方面可以与可见光图像相媲美。因此需要寻求一种具有可相当于像增强器的微光成像性能并满足 SWaP-C 及昼夜通用彩色成像要求的固态成像器件。

2 微光固体成像器件

2.1 CCD 和 CMOS 图像传感器

CCD 和 CMOS 图像传感器是固体成像器件的 2 个主要类型, 两者都是利用了硅的光电效应原理, 不同点在于光敏单元光生电荷的转移和读出方式。图 3 所示的是一个行间转移结构 CCD 原理示意。入射光子由光探测器转换成为电荷并在曝光时间内累积, 在随后的读出时间, 累积的电荷依次转换进入垂直和水平 CCD, 最后转移到芯片级输出放大器, 在这里被转换成为电压信号, 并通过片外的相关双采样 (CDS), 以消除传感节的复位噪声^[14]。

CCD 的这种电荷包依次读出方式限定了其读出速度, 并且 CCD 是一个高电容器件, 而在读出期间需要所有的像素在相同的时间全部高电压的转换, 这意味需要消耗更多的功耗。进一步, 在 CCD 上无法

集成 CMOS 电路, 相机的大部分功能需要在 CCD 芯片之外来实现。

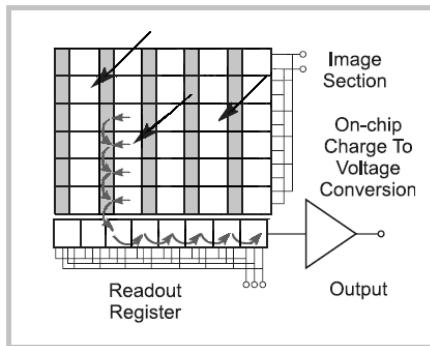


图 3 行间转移 CCD 结构

Fig.3 Typical structure of interline CCD sensor format

CMOS 图像传感器通过反向偏置 PN 结在积分工作模式下的光电流收集^[15], 采用 CMOS 电路来实现传输并进行处理, CMOS 图像传感器克服了许多 CCD 图像传感器所无法克服的困难, 像素的随机存取成为可能, 如图 4 所示, 从而实现快速读出, 并可选择感兴趣的窗口读出, 且仅消耗非常低的功耗。同时, 可在相同的芯片基底上集成图像传感器的驱动电路以及模拟信号处理和模数转换电路, 实现单芯片图像捕获和处理的集成, 甚至单芯片数字相机及图像处理系统, 显著减少系统的 SWaP-C^[16]。

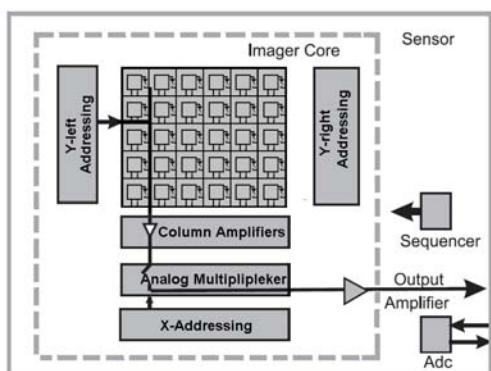


图 4 CMOS 图像传感器结构

Fig.4 CMOS image sensors structure

早期的无源像素传感器 (PPS) 像素中仅集成了一个开关晶体管, 而有源像素传感器 (APS) 则在像素中引入了 MOS 源跟随器^[17]。随着 CMOS 制程的进步, APS 像素可集成更多的 MOS 管, 从而在像素内直接进行更多的数据处理功能。但导致每个像素的电压转换机制难以保持一致。CMOS 图像传感器相比于 CCD 存在较严重的固定图案噪声 (FPN)。

随着亚微米 CMOS 制作技术的进步, 更多数量的晶体管集成进入像素以进行更多的处理, 特别是像素中的 CDS, 和应用于 APS CMOS 的高量子效率低暗电流低读出噪声的 Pinned photodiode (PPD) 的开发

成功和日臻完善, APS CMOS 的图像质量达到了 CCD 的水平^[18], 成为目前称为 CIS 的图像传感器技术和 CCD 的一个实用替选。

图 5 所示的一个 3T APS 和 4T APS, 相比于 3T 结构, 一个晶体管 MX 被增加进入串联在 4T APS 的浮置扩散 (FD) 和 PPD 之间, 随着传输门 TX 合适的时序驱动, 晶体管 MX 可从 PPD 转移电荷到浮置节。在积分时间开始前, 通过电荷转移机制 PPD 被清空, 通过 MOSFET (命令信号 RST) 重置读出节, 经 SF 在参考通道的列读出电路取样和保持, 在积分时间结束后, PPD 的积分电荷转移 (命令信号 TG) 到读出节。相应的积分电荷的电压级别, 通过信号通道的列读出电路取样和保持 (命令信号 SHS)。视频信号电压级别产生于 2 个取样相减 (参考和信号) 即得到视频信号电压级别, 由此实现真正的像素中的 CDS, 消除重置噪声, 同时也减轻了 FPN^[19-20]。

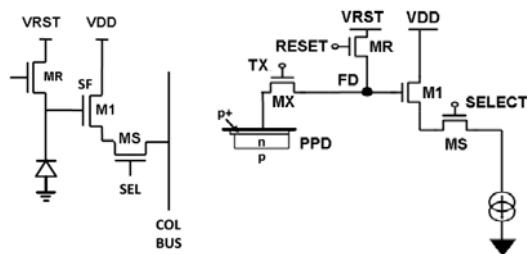


图 5 3T APS 像素和 4T APS 像素结构

Fig.5 Schematic of a 3T APS pixel and 4T APS pixel

APS CMOS 因集成了多个晶体管导致的填充因子的损失, 可通过采用微透镜阵列将入射辐射聚焦到光二极管的光转换区域来弥补, 相似的方法也用于行间转移 CCD。而 CCD 和 CMOS 都是借助于在像素阵列上覆盖一个彩色滤光片阵列来实现彩色成像, 只是 CMOS 更多的采用 CMYK 补色分色法来替代 Bayer 模式的 RGB 原色分色法, 以一定程度的改善量子效率和空间响应。

CCD 和 CIS 一直致力于模仿人眼视网膜的光子收集和处理功能与习惯, 其设计和制造工艺都尽可能的降低其对 NIR 的敏感程度, 而要实现微光成像, 在最小化器件暗噪声的同时, 优化灵敏度特别是 NIR 波段的灵敏度显得尤其必要。

2.2 微光 CCD 和 EMCCD

硅材料本身就是一个对 NIR 光捕获的优选的材料, 但在 VIS-NIR 不同波段上吸收深度的变化, 限定了可同时利用 VIS-NIR 光谱两端的硅探测器的设计。较长的波长的光子需要穿透更深的深度方能被吸收, 同时, 仅在耗尽层中的光生电子空穴对有一个较高的概率分离, 而最大可能耗尽层的厚度是外延掺杂度和

反向偏压的关系。CCD 在具有较厚外延层的同时,能够很好地保持空间分辨能力,并且 CCD 还可通过像素偏压和外延浓度的相应调整形成更厚的外延,而改变偏压或外延掺杂度将会影响 CMOS 模拟和数字电路的运作,并且通过增加外延层厚度来改善 NIR 敏感度会导致 CMOS 图像传感器 MTF 的降低。

某些 NIR CCD 的外延厚可达 $100\text{ }\mu\text{m}$ 甚至更多,而 CMOS 成像器的外延厚度仅为 $5\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 。图 6 是一个 $200\text{ }\mu\text{m}$ 外延厚度的 NIR CCD 的量子效率。但 CCD 是一个串联读出器件,只有通过降低读出速度或制冷来获得低读出噪声特性,如果片上读出放大器工作在高速度而不采用制冷,放大器产生的热噪声将严重的损害了 CCD 在微光级的灵敏度^[21]。

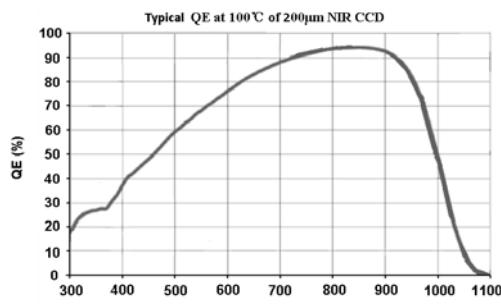


图 6 近红外 CCD 的量子效率

Fig.6 Quantum efficiency of NIR CCD

电子倍增 CCD (EMCCD) 通过在水平读出寄存器和读出放大器之间增加了一个具有增益可调的倍增寄存器,对信号电荷进行倍增放大,从而可使一个微弱的信号因此而被放大到放大器的读出噪声之上^[22-23],图 7 所示的 EMCCD 基于帧转移结构,在读出放大器之前增加的倍增寄存器,通过碰撞电离在每个倍增单元产生额外电荷,仅有一个非常小的概率,通过几百个倍增单元,并对每个单元提供一个较高的电压,一个信号电子可产生数百上千个额外的信号电荷。

但倍增机制的统计分布和相联变化导致 EMCCD 引入了由噪声因子带来的额外噪声^[24]。并且电荷倍增的概率随温度而变化,需要提供制冷,虽然制冷可进一步降低暗电流和读出噪声,实现对极微弱光的成像,甚至光子计数的能力,但却导致系统功耗和体积的进一步增加,不适用于便携式和嵌入成像的应用。

2.3 微光 CIS

CIS 是一个并行读出器件,可在很低的带宽下把离散的电荷包转换成电压输出,仅需在帧率下进行复位,由此提高信噪比,因而且可在适度的灵敏度下达到高的帧率。同时,通过大尺寸像素设计,结合积分时间的增加,以收集更多的光子,可更灵敏于微弱光

强,但更长的积分时间或更大的像素尺寸都会导致图像传感器在时间和空间分辨力的损失,因而降低暗电流和读出噪声级别,对微光成像性能的改善尤为重要。

微光 CIS 通常基于一个 4T 或 5T 的 PPD 的大面积像素结构,大面积像素为优化微光性能的像素结构设计提供了很大的自由度,图 8 所示的是一个典型像

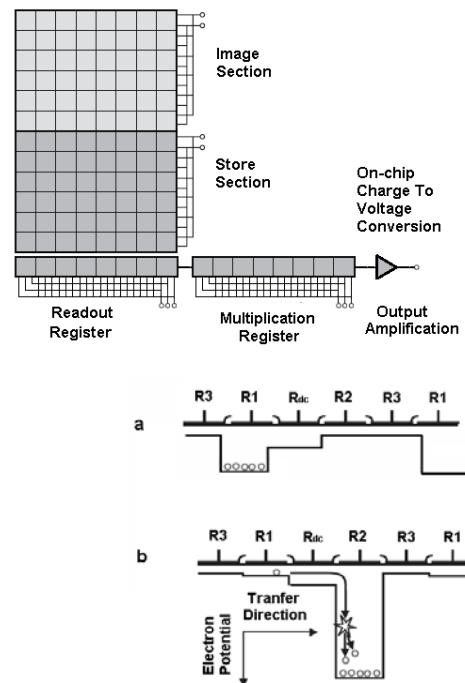


图 7 EMCCD (上) 及其电子倍增寄存器 (下) 的原理示意
Fig.7 Schematic of EMCCD and electron multiplication register

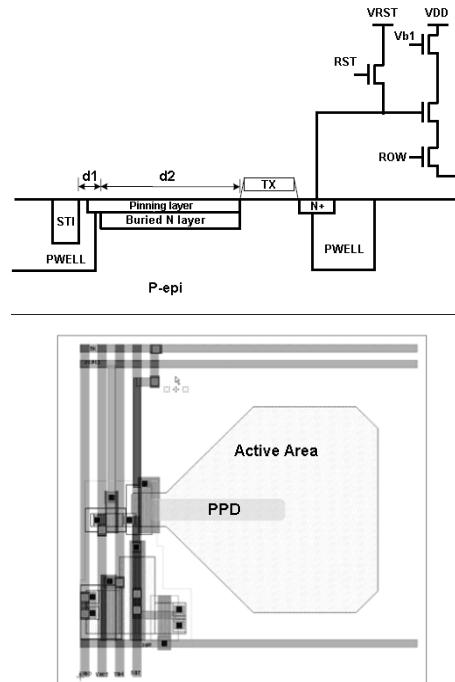


图 8 像素横截面及像素布局图

Fig.8 Pixel cross section and typical pixel layout

素简要结构和布局^[25], PPD 的 n 型扩散层的几何和相对位置, 以及转移门的形状和尺寸, 是直接影响器件暗电流、读出噪声和图像延迟等微光成像性能的关键。优化埋入二极管到 STI 边缘 (d1) 的距离, 和转移门叠加临界值调整注入, 以及光电二极管的尺寸和形状 (d2), 对转移门下的电势分布进行适应性调整, 以在 PPD 和浮置扩散节之间建立合适的壁垒高度, 实现电荷的完全转移^[25-26]。

微光 CIS 的像素阵列通常采用基偶列分离的各自从上下部份读出, 和图 9 所示的双列级放大器和双 ADC 的读出链结构^[5], 每一个像素由高增益和低增益放大器同时取样两次, 增益模式由内部控制, 或最大化全阱容量即低增益模式, 或最小化读出噪声即高增益模式, 使最低噪声和最大阱容可以兼得, 提供最大可能的动态范围和最小可能的探测阈值, 同时在高增益和低增益间切换时最小化 SNR 的下降。放大器输出和 ADC 输出采用双缓冲。每一列有一个参考输入可多路传输进入电路以辅助校正列级增益, 并抵消 FPN。高分辨率 ADC 对微光成像性能至关重要, 而每列像素都有一个单独的 ADC, 缩短了模拟处理的距离, 可确保在很高的信号转换速度的同时, 将模拟处理过程中产生的噪声降到最低^[5-8]。

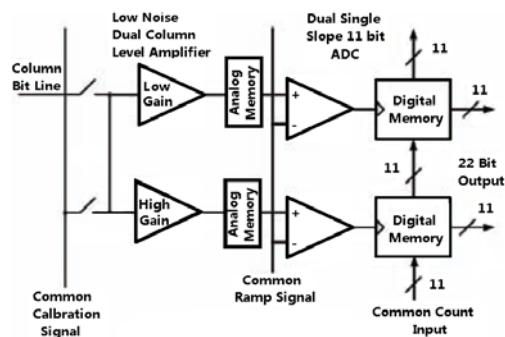


图 9 微光 CIS 的双列级放大器和双 ADC 读出链

Fig.9 Column level amplifier and ADC block diagram

CIS 技术的最新进步, 特别是低于 2e-RMS 甚至亚电子相当的读出噪声的读出电路的开发^[2-4,27], 使 CIS 的使用限定推到微光条件。

3 适用于昼夜成像的微光 CIS

北方夜视最新推出的微光 CIS 相机是一个以小型化低功耗和低噪声高灵敏度大动态范围为特征的微光 CIS 组件, 采用 5 V 电源, 在 50 Hz 帧率下的功耗为 850 mW, 提供 LVDS 数字输出和 PAL 模拟输出, 和满足一系列透镜固定的 CS 接口。还可提供增加 FPGA 板和 OLED 微型显示器的选项。微光 CIS 组件最小重量 30 g, 最小尺寸 $\phi 28.2 \text{ mm} \times 10.9 \text{ mm}$, 如图

10 所示, 相比于其他器件及组件在 SWaP-C 上有着实质性的降低。

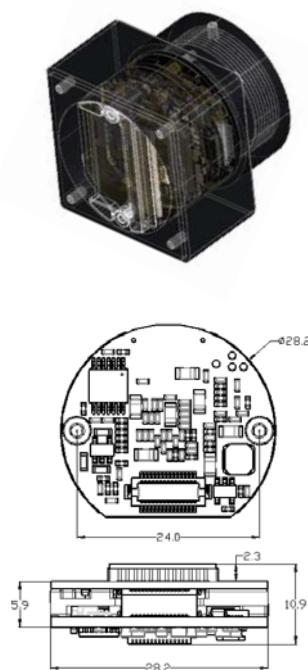


图 10 微光 CIS 组件

Fig.10 Low-light-level CIS assembly

组件可提供自动增益控制 (AGC), 高动态范围 (HDR), 非均匀校正 (NUC) 和超强光抑制 (HSBLC) 等图像改善功能, AGC 可根据外部环境照度变化自动调整增益。HSBLC 可自动检测超强光区域, 计算画面平均值自动将强光区域排除在外, 从而提高其他区域的亮度。

组件采用 0.18 μm 工艺的 1/2 微光 CIS 芯片, 像元数 752×582 , 像元尺寸 $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$, 采用 PPD 的 4T 像素前照结构, 如图 11 所示, 采用一个 FD 阵容可由 SSI 控制以可在高灵敏度模式 (低 FD) 和低灵敏度模式 (高 FD) 自动切换的设计。量子效率峰值大于 80%, 840 nm 的量子效率不低于 35%, 如图 12 所示。采用列并行读出结构, PGA 增益可通过寄存器来控制, 最大 PGA 增益是 32^{\times} 。

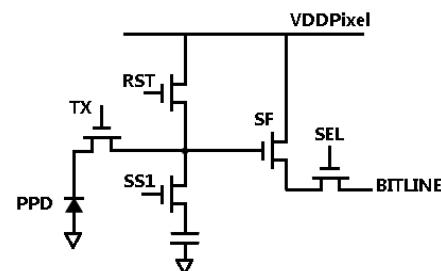


图 11 微光 CIS 的 4T PPD 僧像电路结构

Fig.11 Schematic diagram of low-light-level CIS 4T PPD pixel

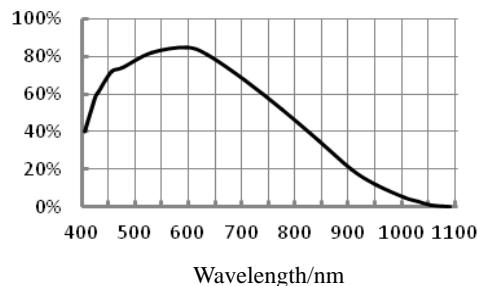


图 12 微光 CIS 的量子效率曲线

Fig.12 Quantum efficiency of low-light-level CIS

表 1 微光 CIS 性能参数

Table 1 Low-light-level CIS specification

Parameter	Specification
Dark currency	$30 e^-/(s \cdot \text{pixel})$
Read noise (median)	$3 e^- \text{ RMS}@50\text{fps}$
Maximum Well capacity	30 ke^-
Internal scene dynamic range	65 dB
Shutter Type	rolling
Maximum frame rate	50 Hz
ADC Resolution	10 bit
Lag	1%
PRNU	3% RMS

一个业界内可广泛接受的用于评估一个图像的质量的衡量标准是信噪比和 MTF, 标准 ISO 12232 定义可接受和极好的图像分别是当 SNR 值相应为 20 dB (10:1) 和 32 dB (40:1) 时。而噪声等效照度 (NEI) 表示图像传感器可能产生一个可用的图像 (SNR = 1:1) 的最小照度或在表面的每单位面积光通量。

表 2 微光 CIS 组件的最小可分辨对比度 (LED 50 cd/m², F 值 2, 59 mm 焦距透镜, 50 Hz 帧频)

Table 2 Max resolvable contrast of low-light-level CIS assembly

(LED 50 cd/m ² , F number 2, 59 mm focus length lens, 50 Hz frame rate)						
Target contrast/%	95	60	30	9	4.5	2.7
Max resolvable horizontal spatial frequency/(lp/mm)	48.8	48.8	43.5	38.7	34.5	30.7

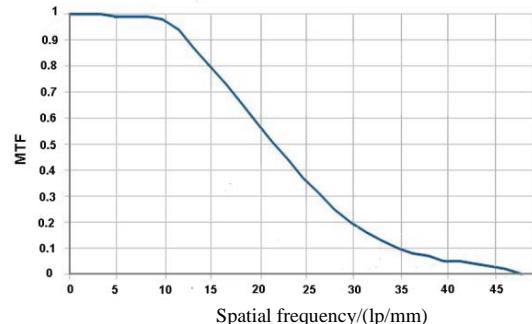
从本质上讲, 微光 CIS 并不具有倍增机制, 在微光条件下还远不如 EMCCD 和像增强器那么灵敏, 但当集成进入一个新一代的头盔夜视系统, VIS-NIR 通道的最低光级别的限定可由 SWIR 或 LWIR 通道增补。相同的道理, 一个热成像与微光 CIS 结合的武器枪瞄具相比于一个热成像或微光枪瞄具更具优势。下一步的工作将对 CIS 设计特征进行合适的选择和优化, 实现高分辨力高清彩色成像, 但高分辨力高清彩色成像将导致成像灵敏度相应程度的降低。

4 结论

微光 CIS 具备提供从白天到接近多云残月夜晚的

微光 CIS 组件在 50 Hz 帧频和高灵敏度工作模式, NEI 为 8×10^{-4} lx, 在 2×10^{-3} lx 照度的信噪比 $\text{SNR} = 17 \text{ dB}(7:1)$, 在 1×10^{-3} lx 照度下 $\text{SNR} = 14 \text{ dB}(5:1)$ 。微光 CIS 组件可提供从白天到接近多云残月 (night level 3) 的 VIS-NIR 光谱的单色实时图像, 接近了具备昼夜成像的能力。

最小可分辨对比度 (MRC) 是观察者分辨一个线条图像所需要分辨力靶的线条与背景间的最小对比度差与靶在不同光照级别下的靶的空间频率的关系式。MRC 被认为是用于长距离观察的 VIS-NIR 相机最重要的特性, 可用来计算对一些低对比军事目标的探测、识别和确认距离。CIS 组件测量的 MRC 列举在表 2 中。微光 CIS 组件的 MTF 如图 13 所示, 极限分辨力 48 lp/mm。



(F number 5.6 lens, 50 Hz frame rate, LED 25 cd/m²)

图 13 微光 CIS 组件的 MTF

Fig.13 MTF measured of log light level CIS assembly

VIS-NIR 单色实时视频能力, 并将升级到高清彩色成像。相比于 EMCCD 和像增强器, 微光 CIS 在高集成度、低功耗和小系统尺寸上更具优势, 可作为一个微光成像性能和 SWaP-C 优选的 VIS-NIR 固体成像器件, 理想于新一代的步兵头盔和武器观瞄具, 以及与其它作战平台如无人机和地面车辆及固定监视系统的集成。

致谢

感谢波兰 Inframet 公司提供的微光 CIS 组件部份参数的测试。

参考文献:

[1] Krymski A, Khaliullin N, Rhodes H. A $2e^-$ noise 1.3 Megapixel CMOS sensor[C]//2003 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, <http://www.alexima.com/pub/A%2020%20e%20noise.pdf>, 2006-10-8.

[2] Lotto C, Seitz P, Baechle T. A sub-electron readout noise CMOS image sensor with pixel-level open-loop voltage amplification[C]//Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2011 IEEE International, 2011: 402-404.

[3] Chen Y, Xu Y, Chae Y, et.al. A 0.7 e-rms temporal readout noise CMOS image sensor for low-light-level imaging[C]//ISSC, San Francisco, 2012: 384-385.

[4] Vu P, Fowler B, Liu C, et al. High-performance CMOS image sensors at BAE SYSTEMS imaging solutions[C]//Proceeding of SPIE, 2012, **8453**: 84530D.

[5] Fowler B, Liu C, Mims S, et al. Low-light-level CMOS image sensor for digitally fused night vision systems[C]//Proceeding of SPIE, 2009, **7298**: 7298-49.

[6] Fowler B, Liu C, Mims S, et al. Wide dynamic range low light level CMOS image sensor[EB/OL]. 2009 International Image Sensor Workshop, http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2009%20Workshop/2009%20Papers/080_paper_fowler_fairchild_hdr.pdf, 2009.

[7] Vu P, Fowler B, Liu C, et al. Design of prototype scientific CMOS image sensors[C]//Proceeding of SPIE, 2008, **7021**: doi:10.1117/12.790229.

[8] Pierre Fereyre, Frédéric Devrière, Stéphane Gesset. L^2 CMOS image sensor for low light vision[EB/OL]. http://www.imagesensors.org/.../2011Papers/P20_Fereyre_L2CMOS.pdf.

[9] Vastia M, Stich U, Dunlap D. Night sky radiant sterance from 450 to 2000 nanometers[R]. NTIS, 1972.

[10] Richards A. Some thing in the air[J]. *Photonics Spectra*, 2012, **46**(7): 75-77.

[11] Curry D C, Harrington L K, Hopper D G. Dichoptic image fusion in human vision system[C]//Proceeding of SPIE, 2006, **6224**: 622401.

[12] Kostrzewa J, Meyer W, Kraemer D, et al. Overview of the UL3 OmegaTM uncooled camera and its applications[C]//Proceeding of SPIE, 2002, **4719**: 189-195

[13] Ettenberg M, Cohen M, Brubaker R, et al. Indium gallium arsenide imaging with smaller cameras, higher resolution arrays, and greater material sensitivity[C]//Proceeding of SPIE, 2002, **4721**: 26-36.

[14] Bosiers J, Peters I, Draijer C, et al. Technical challenges and recent progress in CCD imagers[J]. *Nuclear Instruments and Methods A*, 2006, **565**(1): 148-156.

[15] Weckler G. Operation of p-n junction photodetectors in a photon flux integration mode[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1967, **2**(3): 65-73.

[16] 姚立斌. 低照度 CMOS 图像传感器[J]. 红外技术, 2013, **35**(3): 125-132.

[17] YAO Libin. Low-light-level CMOS image sensor technique[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(3): 125-132.

[18] Eric R Fossum. A review of the pinned photodiode for CCD and CMOS image sensors[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2014, **2**(3): 33-43.

[19] Turchetta R. CMOS monolithic active pixel sensors (MAPS) for future vertex detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2006, **1**(8): 436-444.

[20] Martin-Gonthier P, Molina R, Cervantes P, et al. Analysis and optimization of noise response for low-noise CMOS image sensors[EB/OL]. 10th IEEE NEWCAS, 2012, http://oatao.univ-toulouse.fr/6669/1/Martin_Gonthier_6669.pdf.

[21] Kozlowski, Luo J, Tomasini A. Performance limits in visible and infrared imager sensors[J]. *IEEE IEDM Digest*, 1999, **99**: 867-870.

[22] Jerram P, Peter J Pool, Ray Bell, et al. The LLLCCD: low light imaging without the need for an intensifier[C]//Proceeding of SPIE, 2001, **4306**: 178-186.

[23] Hynecek, Impactron J. A new solid state image intensifier[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, **48**: 2238-2241.

[24] Robbins M S, Hadwen B J. The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, **50**: 1227-1232.

[25] Liu Xinqiao, Boyd Fowler, Hung Do, et al. High performance CMOS image sensor for low light imaging[EB/OL]. <http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2007%20Workshop/2007%20Papers/084%20Li%20et%20al.pdf>, 2007-10-8.

[26] Eric R Fossum. Charge transfer noise and lag in CMOS active pixel sensors[C]//IEEE Workshop on CCDs and Advanced Image Sensors, 2003: 15-17.

[27] Pain B, Yang G, Ortiz M, et al. Analysis and enhancement of low-light-level performance of photodiode-type CMOS active pixel imagers operated with sub-threshold reset[C]//IEEE Workshop on CCDs and AIS, 1999. <http://www.forzasilicon.com/wp-content/uploads/Analysis-and-Enhancement-of-Low-light-level-Performance-of-Photodiode-Type-CMOS-Active-Pixel-Imagers.pdf>.

[28] Bender E, Wood M, Hosek D, et al. Characterization of domestic and foreign image intensifier tubes[C]//Proceeding of SPIE, 2013, **8706**: 870607.