

1 280×1 024 EMCCD 纵向抗光晕设计

陈远金^{1,2}, 常维静², 刘庆飞², 戴 放², 王岭雪¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;
2. 华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 1280×1024 EMCCD 是一种内线转移结构的固态微光成像器件, 具备从星光条件到阳光环境的全天时成像探测能力, 可广泛用于航天遥感、视觉感知和无人驾驶等领域。但由于器件饱和输出的限制, 当入射光强度很高的情况下, EMCCD 会发生光晕现象, 造成图像分辨率降低, 影响 EMCCD 获取目标信息的能力。为了提升 EMCCD 环境适应性, 避免光晕现象的产生, 文中分析了 EMCCD 光晕产生的原因, 介绍了纵向抗晕的工作原理, 通过理论推导分析和数值模拟仿真的方法, 设计了具有纵向抗晕结构的 EMCCD 像元, 制作了具有抗晕功能的 1280×1024 EMCCD 器件和原理演示样机, 仿真数据和测试结果表明, 文中设计的纵向抗光晕结构 EMCCD 具有 500 倍抗晕能力。

关键词: EMCCD; 内线转移; 光晕; 饱和输出; 抗晕能力

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210083

Design of 1 280×1 024 vertical antiblooming EMCCD

Chen Yuanjin^{1,2}, Chang Weijing², Liu Qingfei², Dai Fang², Wang Lingxue¹

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. East China Institute of Optoelectronic Integrated Device, Suzhou 215163, China)

Abstract: 1280×1024 EMCCD is a solid-state low light level imaging device with interline transfer structure. It has the ability of all-time imaging and detection from starlight to sunlight environment. It can be widely used in space remote sensing, visual perception and manless driving. However, due to the limitation of device saturation output, when the incident light intensity is too high for EMCCD, blooming takes place, resulting in the reduction of image resolution and affecting the ability of EMCCD to obtain target information. In order to improve the environmental adaptability of EMCCD and avoid the occurrence of blooming, the causes of EMCCD blooming was analyzed, the working principle of vertical antiblooming was introduced, EMCCD pixels with vertical antiblooming structure were designed through theoretical derivation, analysis and numerical simulation, and a 1280×1024 EMCCD device and principle demonstration prototype with vertical antiblooming function were produced. The simulation data and test results show that the vertical antiblooming EMCCD designed in this paper has 500 times antiblooming ability.

Key words: EMCCD; interline transfer; blooming; saturation output; antiblooming

收稿日期:2021-02-01; 修订日期:2021-04-09

作者简介:陈远金,男,研究员,博士,主要从事半导体集成电路、新型光电器件和组件的研制开发工作。

0 引言

近年来,随着数字化图像处理技术的发展,固态成像探测器件摄取的目标图像的光强从日光强度到月光强度,环境照度变化范围很大,要求 EMCCD 必须能够在复杂照度环境下探测清晰的图像^[1],没有抗晕结构的 EMCCD 难以满足这种应用需求。文中分析抗晕结构工作原理,设计纵向抗晕像元,完成了具有抗晕功能的 1280×1024 EMCCD 制备,并进行了成像比对测试。

1 抗晕结构工作原理

EMCCD 工作过程中,当像元积累的信号电荷超过了饱和容量时,像元的积分电荷开始溢出,并被相邻像元收集,造成相邻像元信号电荷饱和,表现为图像出现亮斑和条纹,称为光晕^[2]。为了抑制光晕现象的发生,必须在像元中制作抗晕结构,提供过剩信号电荷的泄放通路。抗晕结构主要包括横向抗晕和纵向抗晕,横向抗晕工艺简单易于实现,但影响像元占空比导致量子效率降低;纵向抗晕虽然结构复杂工艺实现难度大,由于纵向势垒不占据像元感光面积,像元光收集效率不受影响^[3],所以在 EMCCD 中应用广泛。

EMCCD 纵向抗晕结构是通过外延层中 P 阱掺杂浓度的差异化,造成外延层静电势分布不均匀,在埋沟、P 阱和外延层形成具有势垒的多余电荷快速泄放通道。当埋沟中信号电荷积累到一定数量导致埋沟电势与势垒相近时,多余信号电荷渡越势垒在电场作用下进入外延层,实现快速泄放。具有纵向抗晕结构的 EMCCD 典型像元如图 1 所示^[4]。图中垂直方向表示从晶圆表面指向晶圆内部的方向,分别为 N 埋沟、P 阱、N 型外延。其中埋沟和 P 阱之间的势垒就是抗晕势垒,P 阱与外延之间是信号电荷泄放的快速通道。图中水平方向表示信号电荷从光电二极管转移到垂直寄存器的方向,分别为 N 型光电二极管 PhD、P 型开关势垒、N 型垂直寄存器 VCCD。像元工作时,当积分期间曝光过强,埋沟信号过剩电荷渡越垂直方向上的抗晕势垒实现信号电荷泄放;当积分期结束时 PhD 与 VCCD 之间开关开启,信号电荷转移到 VCCD,控制栅关闭,开始下一次积分。

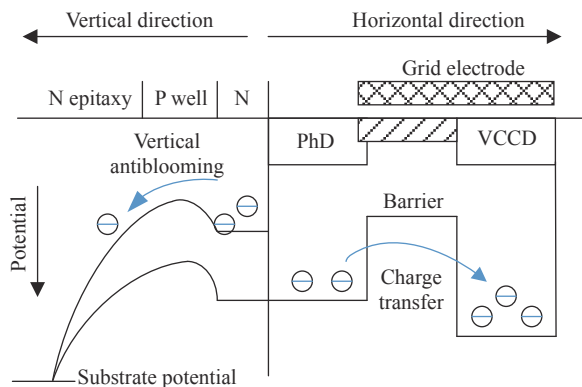


图 1 EMCCD 纵向抗晕结构

Fig.1 Vertical antiblooming structure of EMCCD

2 纵向抗晕像元设计

文中研制的 1280×1024 EMCCD 光敏区采用了内线转移结构,电荷检测单端输出模式,输出端有两个跟随输出放大器,分别是非倍增输出放大器和倍增输出放大器。成像系统可以根据应用环境的变化,控制 EMCCD 选择倍增输出或非倍增输出方式。EMCCD 结构如图 2(a) 所示,该器件有效像元规模为 1280×1024,像元中心间距为 10 μm×10 μm,满阱电荷容量 40 ke⁻,纵向抗晕倍数 500 倍。

设计的 EMCCD 像元具有抗晕功能,简化结构如图 2(b) 所示。信号电荷在三面沟阻结构的像元内可以有效积分,像元制作在 P 阱内部有利于抗晕结构的制作同时也提高信号电荷转移速度。采用半导体数值分析的方法,设计纵向抗光晕结构二维像元如图 2(c) 所示,图中 G 表示控制栅,PhD 表示光电二极管 N 区,PIN 表示光电二极管表面箝位层,D 是漏极,PW 是 P 阱,Sub 是外延。

在该像元中,PhD 与 P 阱、P 阱与 Sub 分别构成 PN 结,像元正常工作时两个 PN 结均处于反偏状态。随着光电二极管积分和信号电荷的产生,沟道电压不断降低,当沟道电压接近抗晕势垒静电势时,多余的信号电荷就会越过抗晕势垒在漂移扩散的作用下进入外延层^[5]。按照突变结近似理论,P 阱与 Sub 之间的 PN 结耗尽区 W_D 可以用公式 (1) 表示:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}}{qN} \left(\psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right)} \quad (1)$$

式中: ε_{Si} 为硅的介电常数; N 为 P 阱掺杂浓度; q 为电子电量; ψ_{bi} 为 PN 节内建电势; V 为 PN 节反偏电压;

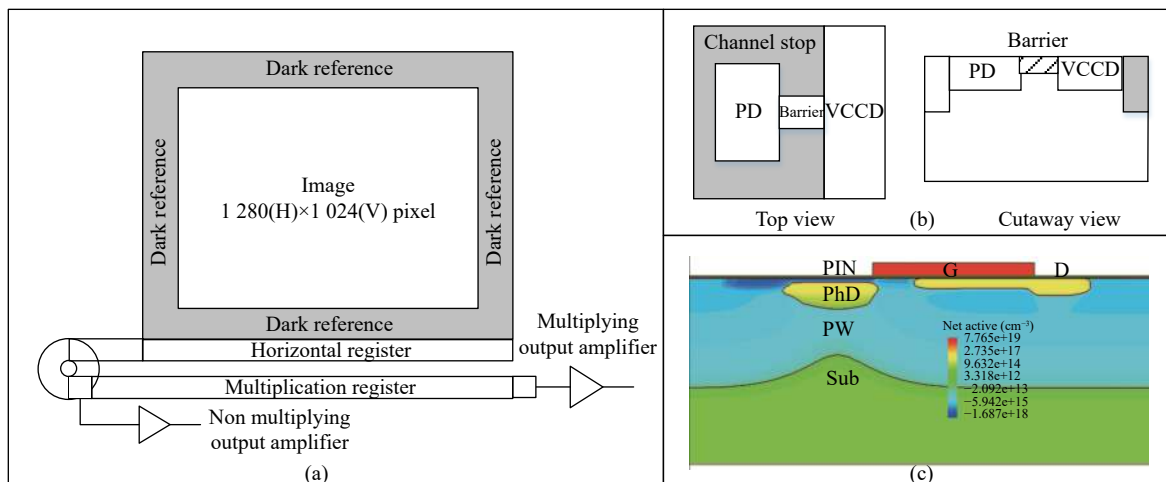


图 2 1280 × 1024 EMCCD 结构设计。(a) 1280 × 1024 EMCCD 器件结构; (b) 具有抗晕功能的像元简化结构; (c) 像元二维模型

Fig.2 1280 × 1024 EMCCD structure design. (a) 1280 × 1024 EMCCD device structure; (b) Simplified pixel structure with antiblooming function; (c) Pixel two-dimensional model

k 为玻耳兹曼常数; T 为温度。

当反偏电压为 12 V, 埋沟掺杂浓度为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, 室温下 P 阱耗尽层厚度超过 $4 \mu\text{m}$, 能够形成有效抗晕通道。但是在 EMCCD 实际工作中 P 阱外接直流偏置是 3 V, 而且 P 阱与 Sub 的 PN 结是一种非均匀掺杂的缓变结, 同时考虑到外延压降、自建电势以及电极的肖特基势垒等因素, 衬底电势至少要超过 18 V 才能在 P 阱与 Sub 之间形成信号电荷快速泄放的通路。

像元抗晕设计不仅要考虑在 PhD、PW 以及 Sub 之间产生有效信号电荷释放通路, 同时还要研究过剩信号载流子的瞬时电流、通道阻抗以及积分时间等因素对于像元抗晕的影响^[6]。由于 PW 和 Sub 与衬底相比阻抗高, 因此电流通过 PW 和 Sub 时会形成压降, 而且较大的瞬时电流还会造成更大的压降。像元瞬时抗晕电流 I_0 , 像元抗晕通道产生的压降 ΔV_0 可由下式表示:

$$I_0 = \sum_{i=1}^{M \times N} \frac{K_i Q_{sat}}{t} \quad (2)$$

$$\Delta V_0 = I_0 \times R \quad (3)$$

式中: Q_{sat} 表示像元满阱容量 40 ke^- ; K_i 是 $M \times N$ EMCCD 像元抗晕能力, 以 500 倍计; t 是像元积分时间, 按 30 ms 计算, 抗晕电流约为 $1.40 \times 10^{-4} \text{ A}$; R 是抗晕通道电阻; ΔV_0 是抗晕通道产生的压降, 按照目前 EMCCD 的材料和制程参数, 抗晕通道电阻约为 $6 \text{ k}\Omega$, ΔV_0 约为 0.8 V。

综合上述像元抗晕工作过程, 分析器件物理模型, 通过近似计算可以得出, 采用图 2(c) 结构的 EMCCD 像元在外延电压不小于 19 V 时, 具有不小于 500 倍的抗晕能力。为了进一步验证设计的正确性, 应用半导体数值分析的方法, 利用 TCAD 仿真工具, 对图 2(c) 进行仿真验证, 仿真初始条件是正常光照, Sub 的电压是 0 V, 栅极 G 的电压是 -5 V, 漏极 D 的电压 16 V, 此时像元处于正常积分模式, 像元二极管信号电荷积分情况如图 3(a), 信号电荷全部保存在像元中, 处于有效积分状态。

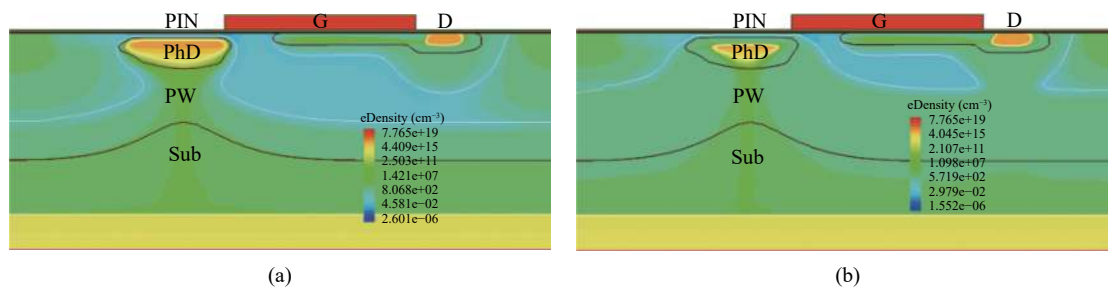


图 3 像元正常积分 (a) 与像元抗晕 (b)

Fig.3 (a) Pixel integration and (b) pixel antiblooming

改变仿真初始条件,入射光强是像元满阱饱和输出时入射光强的 500 倍,衬底 Sub 的电压是 20 V,栅极 G 的电压是-5 V,漏极 D 的电压 16 V,仿真像元内积分电荷分布情况,得到图 3(b)。从图 3(b)的数据分析能够判断出,由于像元具有抗晕结构,在衬底偏置电压的作用下,像元依然正常积分,对照图 3(a)和图 3(b)中光电二极管信号电荷包,由于静电势作用图 3(b)中信号电荷包变小,但信号电荷包电荷密度增加,所以积分电荷数量基本保持不变。但是过剩的信号电荷进行了有效撤除,体现出抗晕功能。

因此,通过理论分析、数值运算和仿真验证等方法证明了当前设计的像元抗晕结构、半导体制程参数以及时钟激励等能够同时达到满阱电荷、饱和输出、抗晕能力、光谱响应等参数的要求。

3 1280×1024 EMCCD 工艺制备及测试

按照纵向抗晕像元设计的参数和结构,依托成熟的 6 in (1 in=2.54 cm)、0.35 μm NMOS 工艺平台,采用四层多晶硅、两层金属 (4P2M) 工艺进行 EMCCD 制备。衬底采用 N 型外延基片,光电二极管与垂直寄存器都制作在 P 阱上。

其中 PW 的阱深、杂质分布、阱的形貌特征会对像元抗晕功能产生重要影响,因此通过高温推阱工艺实现 1280×1024 EMCCD 的 P 阱掺杂;光电二极管与垂直寄存器之间的栅控开关对于像元信号积分、存储、转移等信号流过程控制具有关键作用,因此通过杂质注入实现栅控开关;像元垂直寄存器的遮光效果

与像元弥散、串扰等参数相关,因此通过金属遮光层工艺实现光屏蔽。而且寄存器的电极排布、浮置扩散区工艺制作、输出放大器尺寸等 EMCCD 结构与工艺参数都会造成影响 EMCCD 整体性能。所以 1280×1024 EMCCD 复用了前期的研制成果,工艺稳定成熟。制作完成的 1280×1024 EMCCD 像元剖面示意如图 4 所示,图中 Phd 是光电二极管由 N-形成,P-形成了光电二极管嵌位层和开关势垒,BCCD 表示垂直寄存器,P+是沟阻区,多晶硅制作电极,金属层 AL 用于遮光。

图 5(a)是已完成研制的 EMCCD 像元扫描电镜图,其中框处区域对应图 4 的单个像元,左侧为光敏区 Phd,右侧为 VCCD,被铝屏蔽层遮盖。1280×1024 EMCCD 封装管壳与光窗采用气密性连接、管壳内充填低沸点、低导热率的气体进行保冷绝热,同时 EMCCD 应用了 TEC 制冷温度控制技术,通过器件制冷和气密性封装工艺,实现 1280×1024 EMCCD TEC 制冷封装保证 EMCCD 在-20 °C 状态下正常工作。图 5(b)是 1280×1024 EMCCD 成品电路实物。

按照 GJB 7951—2012 电荷耦合成像器件测试方法中抗弥散性能的测试原理、测试步骤以及规定条件,测试 1280×1024 EMCCD 成品电路抗晕能力,并根据测试数据绘制出衬底电压与 EMCCD 抗晕能力曲线如图 6。根据图 6 中数据分析可以确定当衬底电压 21.5 V 时,EMCCD 抗晕能力可以超过 500 倍,电路测试指标满足了设计要求。

虽然通过增加衬底电势可以进一步提升抗光晕倍数,但随着衬底电势上升,像元中存储电荷的阱区

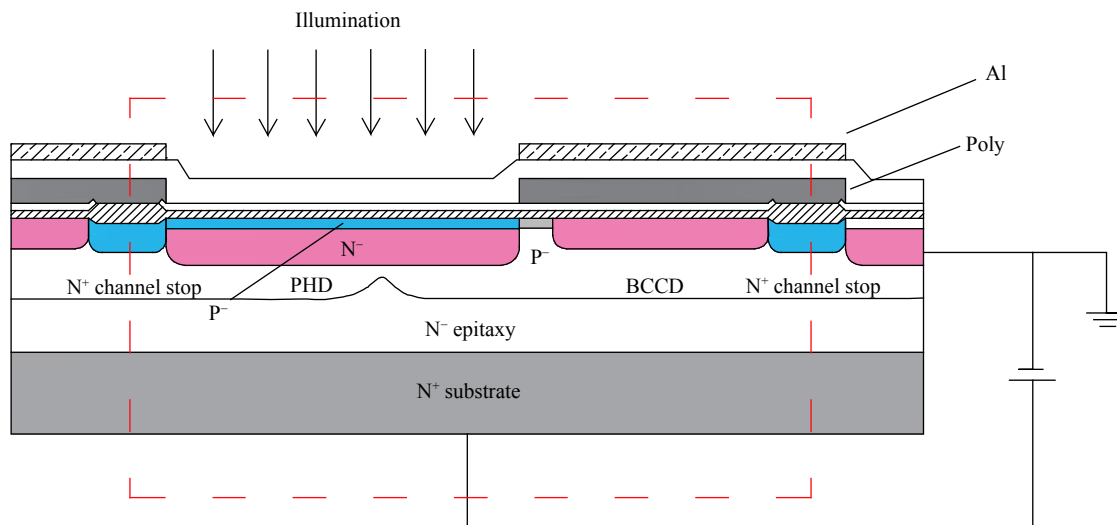


图 4 1280×1024 EMCCD 像元剖面示意

Fig.4 Cross-section of 1280×1024 EMCCD pixel

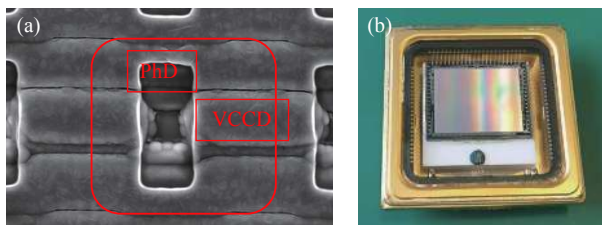


图 5 设计制备的 1280×1024 EMCCD。(a) 像元扫描电镜图；(b) 封装后的器件

Fig.5 Designed 1280×1024 EMCCD. (a) Scanning electron microscope of pixel; (b) Packaged device

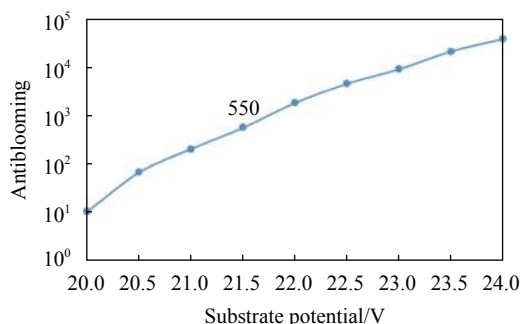


图 6 EMCCD 抗晕倍数与衬底电压关系

Fig.6 Antiblooming factor curve of EMCCD as a function of substrate voltage

与衬底势垒也会随之降低，电荷满阱容量减少，成像效果变差，因此在实际的成像过程中，不能通过改变衬底电势的方式来提升抗光晕效果。

4 1280×1024 EMCCD 成像验证

为了进一步验证 1280×1024 EMCCD 综合性能，利用现有成熟 EMCCD 驱动时钟时序设计技术和 EMCCD 图像信号采集运算处理技术，制作了一款原理样机用于在实验室环境验证 1280×1024 EMCCD 光电性能，原理样机实物如图 7 所示。

在实验室内利用这款相机，用超过饱和光强 550 倍点状光源直射相机，抗晕电压 21.5 V，同时应用相机对分辨率测试卡进行成像功能测试。成像情况如图 8 所示。

从图 8(a)~(f) 成像情况可以看出，当光源打开但



图 7 1280×1024 EMCCD 原理样机

Fig.7 1280 × 1024 EMCCD principle prototype

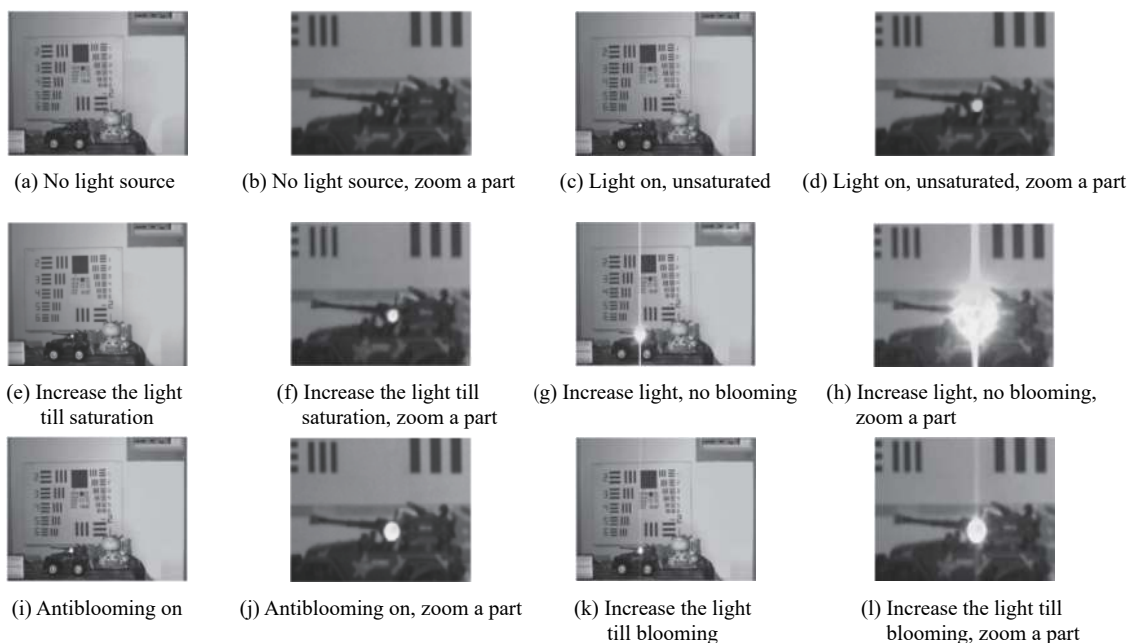


图 8 EMCCD 抗晕能力成像效果。(a)~(h) 未启用抗光晕；(i)~(l) 启用抗光晕

Fig.8 Imaging effect of EMCCD antiblooming. (a)-(h) Antiblooming off; (i)-(l) Antiblooming on

光很微弱时相机可正常成像,逐渐增大光强,图 8(g)~(h) 成像产生光晕,打开抗光晕功能,图 8(i)~(j) 可以有效消除光晕现象。由于抗光晕能力存在上限,继续增加光强,图 8(k)~(l) 依然会产生光晕。相机无抗晕能力时,图像有明显纵向光晕现象,而且强光还造成了图像分辨率下降,当相机具有抗晕能力时,纵向光晕消失光晕缩小成点状光斑,而且图像分辨率有明显提升,图像细节内容可辨识。

5 结论与展望

近年来 EMCCD 作为一种新型 CCD 发展迅速,现在已广泛应用于目标定位、空间侦察、电子对抗等军事领域,同时在气象资源、工业检测和医学诊断等民用领域也有不错应用前景^[7]。文中研制的 1280×1024 EMCCD 具有纵向抗晕、电子快门低噪声、宽动态等优点,显著提高了 EMCCD 环境适应性,未来必将推动 EMCCD 在各个领域得到更广泛的使用。

参考文献:

- [1] Jin Weiqi, Tao Yu, Shi Feng, et al. Progress of low level light video technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3167-3176. (in Chinese)
- [2] Janesick J R. Scientific Charge-coupled Devices[M]. USA: SPIE, 2001.
- [3] Altice P P, Mckee J A. Anti-blooming storage pixel: USA, US7332786B2[P]. 2008-02-19.
- [4] Wu Lifan, Liu Changlin, Chen Hongbing, et al. A CCD image sensors with vertical anti-blooming structure [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(1): 36-39. (in Chinese)
- [5] Furukawa A, Matsunaga Y, Suzuki N, et al. An interline transfer CCD for a single sensor 2/3" color camera[C]//1980 International Electron Devices Meeting, 1980: 346-349.
- [6] Brady F T, Mauritzson R A. Vertical anti-blooming control and cross-talk reduction for imagers: USA, 20070045668[P]. 2007-03-01.
- [7] Chen Yuanjin, Zhang Mengjiao, Dai Fang, et al. The design of the individual integrated reconnaissance instrument based on EMCCD and estimation of function distance [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(5): 399-403. (in Chinese)