

210 μm $\times$ 210 μm 超大像元 TDICCD 电荷输运技术

杨 洪^{1*}, 彭树阳², 白雪平¹, 周亚军¹

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2. 湖南大学 物理与微电子科学学院, 长沙 410082)

摘 要: 针对深空探测、低照度航天遥感等领域对超高灵敏度成像器件的需求, 文章围绕超大像元时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)的电荷输运技术开展了研究。所研制的器件像元尺寸达 210 μm $\times$ 210 μm , 是国内外首次研制的同类超大像元 CCD, 设计满阱容量大于 10 000 ke^- , 其核心技术瓶颈在于如何在有限的行周期与积分时间内实现超大电荷量的高效转移与读出。针对该瓶颈, 提出一种“垂直 CCD 细分-垂直 CCD 求和-水平 CCD 细分-输出节点求和”的新型器件架构。该架构通过细分垂直与水平 CCD 多晶硅栅, 将单一大电荷包拆分为多份小电荷包并行转移, 在保持驱动脉冲数不变的前提下, 大幅缩短了大电荷量的转移时间, 最终通过求和势阱实现信号的合并还原。基于该架构完成了器件的设计与工艺实现, 测试结果表明, 器件满阱容量达 17 895 ke^- , 单级电荷转移效率优于 99.999%, 有效解决了超大像元 TDICCD 的电荷转移难题, 为超高灵敏度 TDICCD 的研制提供了全新的技术路径。

关键词: 超大像元; TDICCD; 电荷输运; CCD 细分架构; 满阱容量

中图分类号: TN386.5 **文章编号:** 1001-5868(2026)04-0756-07

Research on Charge Transport Technology of 210 μm $\times$ 210 μm Ultra-large Pixel TDICCD

YANG Hong¹, PENG Shuyang², BAI Xueping¹, ZHOU Yajun¹

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 2. College of Physics and Microelectronics, Hunan University, Changsha 410082, CHN)

Abstract: To address the demand for ultra-high sensitivity imaging devices in deep space detection, low-illumination space remote sensing, and other fields, this study investigated the charge transport technology of a 210 μm $\times$ 210 μm ultra-large pixel Time Delay and Integration Charge Coupled Device (TDICCD). The pixel size of the device is 210 μm $\times$ 210 μm , which is the first such ultra-large pixel CCD developed worldwide, with a designed full well capacity greater than 10 000 ke^- . The core technical bottleneck is how to achieve efficient transfer and readout of ultra-large charge packets within the limited line period and integration time. This study proposes a novel device architecture of vertical CCD subdivision-vertical CCD summation-horizontal CCD subdivision-output node summation. By subdividing the polysilicon gates of the vertical and horizontal CCDs, a single large charge packet is split into multiple small charge packets for parallel transfer. By keeping the number of driving pulses unchanged, the transfer time of the large charge packet is greatly shortened, and the signal is merged and restored through the summation potential well. Device design and process implementation were completed based on this architecture. Test results show that the full well capacity of the device reaches 17 895 ke^- , and the single-stage charge transfer efficiency is greater than 99.999%, which effectively solves the charge transfer problem of ultra-large pixel TDICCDs and provides a new

收稿日期: 2026-03-26.

* 通信作者: 杨 洪

technical path for the development of ultra-high sensitivity TDICCDs.

Key words: ultra-large pixel; TDICCD; charge transport; CCD subdivision architecture; full well capacity

0 引言

时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)基于多级并行积分的方式,在不损失空间分辨率的前提下,大幅提升成像系统的光收集效率与信噪比,是航天遥感、深空探测、天文观测、低照度安防等领域的核心成像器件^[1-2]。随着弱光探测场景的需求不断升级,提升TDICCD的像元尺寸成为提高器件灵敏度的核心技术途径——像元光敏面积越大,光子收集能力越强,器件的探测下限越低,尤其适用于深空天体探测、夜间对地观测等低光子通量的成像场景^[3-4]。

当前国内外TDICCD的像元尺寸多集中在10~50 μm 区间,如法国e2v公司的CCD203系列器件像元尺寸为13 μm $\times$ 13 μm ,国内自主研制的TDICCD最大像元尺寸也仅为28 μm $\times$ 28 μm ^[5-6]。本文研制的TDICCD像元尺寸可达210 μm $\times$ 210 μm ,光敏面积是常规10 μm 像元的441倍,为国内外首次报道的同类超大像元CCD,为超高灵敏度成像提供了全新的器件方案。

超大像元设计在实现灵敏度跃升的同时,也给器件的电荷输运带来了严峻挑战。本文所研制的器件设计满阱容量大于10 000 ke^- ,是常规TDICCD的50~100倍,而TDICCD的行周期由成像系统的扫描速度决定,通常被限制在微秒至百微秒量级。因此,如何在有限的行周期内完成超大电荷量的高效、无残留转移,成为决定器件能否正常工作的核心问题^[7-8]。在传统的单级CCD转移结构中,大电荷量会引发电荷自屏蔽效应,削弱转移电场的驱动能力,导致电荷转移时间常数显著增大,在有限的转移时间内出现大量电荷残留,进而引发图像拖影、调制传递函数(MTF)下降、信噪比恶化等问题^[9-10]。

针对上述技术瓶颈,本文提出一种“垂直CCD细分-垂直CCD求和-水平CCD细分-输出节点求和”的新型器件架构。通过电荷“先拆分并行转移、后合并求和还原”的方式,在不改变驱动脉冲数量与系统复杂度的前提下,大幅提升了大电荷量的转移效率。本文详细阐述了该架构的设计原理、器件实现工艺,并完成了器件性能测试与验证,为超大

像元TDICCD的工程化应用奠定了技术基础。

1 器件结构设计

1.1 超大像元TDICCD整体架构

本文研制的210 μm $\times$ 210 μm 超大像元5谱段TDICCD整体结构如图1所示,器件核心包括光敏元阵列、垂直CCD(VCCD)转移阵列、水平CCD(HCCD)转移寄存器、输出前置放大器,核心像元尺寸为210 μm $\times$ 210 μm 。采用埋沟CCD结构设计,电荷转移过程发生在半导体内部而非Si-SiO₂界面,可有效降低界面态对电荷的俘获效应,提升电荷转移效率与器件抗辐射性能^[11-13]。

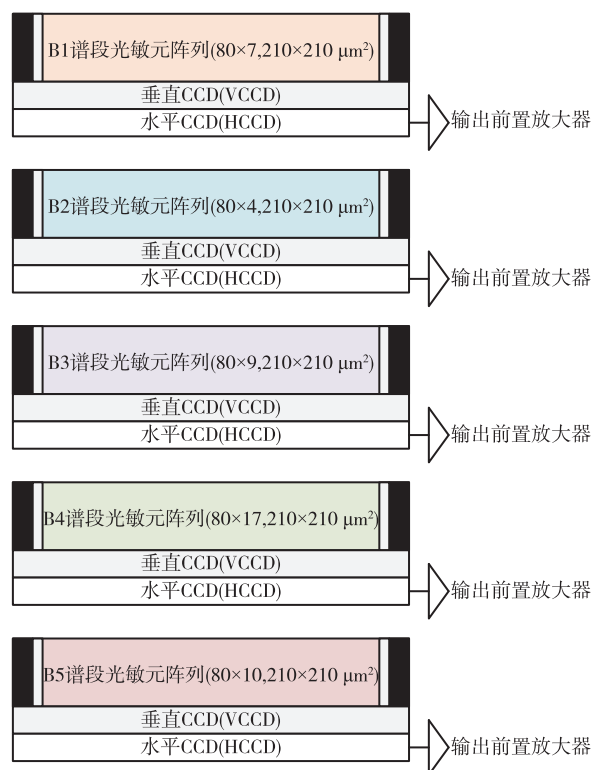


图1 210 μm $\times$ 210 μm 超大像元5谱段TDICCD整体结构示意图

器件的工作流程为:首先,入射光子在210 μm $\times$ 210 μm 的光敏元中被吸收,转换为光生电荷;在积分周期结束后,光生电荷通过转移栅注入垂直CCD阵列,沿垂直方向完成一级TDI积分转移;在电荷完成级数选通设定的垂直积分后,被注入水平CCD转移寄存器,沿水平方向转移至输出节点,通过前置放大

器转换为电压信号输出。其中,垂直与水平方向的大电荷量高效转移是器件设计的核心难点。

1.2 核心电荷输运架构设计

本文提出的“垂直CCD细分-垂直CCD求和-水平CCD细分-输出节点求和”架构,核心原理是将单一大电荷包拆分为多个等量的小电荷包,通过多个并行的子转移通道完成电荷转移,再由求和势阱将小电荷包合并还原,在不改变驱动时序的前提下,解决大电荷量转移速度慢、残留高的问题。

1.2.1 垂直CCD细分与求和设计

传统垂直CCD为单通道转移结构,单个转移级对应一个势阱,光生电荷被全部注入同一个势阱中,形成单一的大电荷包。对于 $10\,000\text{ ke}^-$ 以上的超大电荷量,大电荷包会显著屏蔽转移栅的驱动电场,导致电荷转移的驱动力下降,转移时间常数 τ 大幅增大。根据CCD电荷转移理论,埋沟CCD的电荷转移时间常数可表示为:

$$\tau = \frac{L^2}{2\pi^2 \mu k T / q} \quad (1)$$

式中, L 为转移栅长度, μ 为载流子迁移率, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, q 为电子电荷量。当电荷包过大时,载流子的迁移率 μ 会因库仑散射作用显著下降,进而导致 τ 增大,在有限的转移时间内无法完成完整的电荷转移。

电荷自屏蔽效应的本质是在大电荷量下,电荷包内部的库仑电场抵消了转移栅的驱动电场,同时引发载流子库仑散射,导致载流子迁移率下降,最终增大转移时间常数。载流子迁移率 μ 与载流子浓度 n 的定量关系为:

$$\mu(n) = \frac{\mu_0}{1 + (n/n_0)^\alpha} \quad (2)$$

式中, μ_0 为低载流子浓度下的本征迁移率, n_0 为特征载流子浓度, α 为拟合系数(硅中电子 $\alpha \approx 0.6$)。对于本文 $210\,\mu\text{m} \times 210\,\mu\text{m}$ 超大像元,满阱电荷 $Q = 10\,000\text{ ke}^-$,传统单通道结构的载流子浓度 $n_{\text{trad}} = Q/V_{\text{trad}}$ (V_{trad} 为势阱体积),对应的迁移率 $\mu_{\text{trad}} = 0.65\mu_0$;在4细分结构中,每个子势阱的电荷 $Q_{\text{sub}} = Q/4$,载流子浓度 $n_{4\text{sub}} = n_{\text{trad}}/4$,对应的迁移率 $\mu_{4\text{sub}} = 0.92\mu_0$;在2细分结构中, $n_{2\text{sub}} = n_{\text{trad}}/2$, $\mu_{2\text{sub}} = 0.78\mu_0$;在8细分结构中, $n_{8\text{sub}} = n_{\text{trad}}/8$, $\mu_{8\text{sub}} = 0.97\mu_0$ 。

结合式(1),不同细分结构的转移时间常数与传统结构的对比如表1所示。

表1 不同细分结构与传统结构的转移时间常数对比(满阱电荷为 $10\,000\text{ ke}^-$)

结构类型	载流子迁移率 μ (相对 μ_0)	转移时间常数 τ (相对传统结构)	自屏蔽抑制效果
传统单通道	$0.65\mu_0$	$1.00\tau_{\text{trad}}$	无
2细分	$0.78\mu_0$	$0.83\tau_{\text{trad}}$	35%
4细分	$0.92\mu_0$	$0.71\tau_{\text{trad}}$	68%
8细分	$0.97\mu_0$	$0.67\tau_{\text{trad}}$	78%

由表1可见,细分架构通过降低单个势阱的载流子浓度,有效抑制库仑散射与自屏蔽效应,大幅提升了载流子迁移率,缩短了转移时间常数。其中,4细分结构的转移时间常数较传统结构降低29%,自屏蔽抑制效果达68%,同时工艺实现难度远低于8细分结构,为最优设计方案。

为验证不同细分结构的电荷转移特性,采用TCAD仿真工具对传统单通道、2细分、4细分、8细分结构进行了电荷转移过程仿真。仿真条件为:满阱电荷为 $10\,000\text{ ke}^-$,行周期为 $50\,\mu\text{s}$,驱动脉冲频率为 1 MHz 。仿真得到的不同结构的电荷转移效率对比如图2所示。

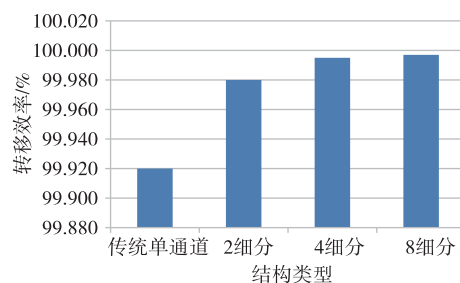
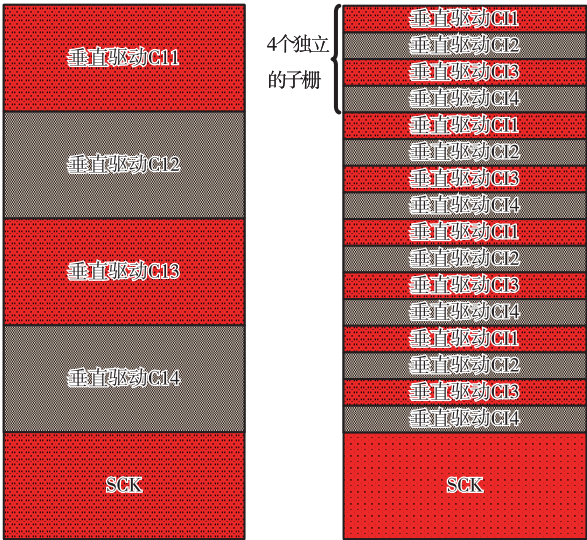


图2 不同细分结构与传统结构的电荷转移效率对比

仿真结果表明,随着细分级数的增加,电荷转移效率逐步提升,电荷残留率显著降低。4细分结构的电荷残留率仅为传统结构的 $1/16$,同时栅线宽为传统结构的 $1/4$,工艺兼容性良好;8细分结构虽转移性能更优,但栅线宽进一步缩小,工艺难度提升30%以上。因此,选择4细分架构作为最终设计方案,在转移性能与工艺可行性之间实现了最优平衡。

本文提出的垂直CCD细分-求和架构如图3所示,将垂直CCD的单个转移单元细分为4个并行的子单元,对应将单个多晶硅转移栅细分为4个独立的子栅,所有同相位的子栅连接至同一驱动脉冲。因此,器件的驱动脉冲数量与传统结构完全一致,

无需修改外围驱动电路。当光生电荷通过转移栅注入垂直 CCD 时,会被均匀分配到 4 个子单元的势阱中,原本 10 000 ke^- 的大电荷包被拆分为 4 个 2 500 ke^- 的小电荷包。



(a) 垂直 CCD 传统单通道结构 (b) 本文垂直 CCD 4 细分并行结构

图 3 垂直 CCD 细分-求和架构示意图

拆分后的小电荷包电荷量大幅降低,库仑散射效应显著减弱,载流子迁移率恢复至理想水平,转移时间常数大幅减小,可以在有限的行周期内完成完整的电荷转移。4 个子单元的小电荷包在驱动脉冲的控制下同步并行转移,在垂直 CCD 的末端设置集成求和势阱 SCK,4 路小电荷包在求和势阱中完成合并,还原为完整的信号电荷包,再注入水平 CCD 寄存器,实现了“拆分-并行转移-求和还原”的完整流程。这既保证了电荷转移效率,又不改变信号的总量与 TDI 积分特性。

1.2.2 水平 CCD 细分与输出求和 design

垂直 CCD 输出的电荷包仍为 10 000 ke^- 以上的大电荷量,而水平 CCD 的读出时间受像素读出速率限制,通常仅为几十纳秒至几微秒,大电荷量的高速读出同样面临转移效率不足的问题。因此,本文对水平 CCD 采用与垂直 CCD 一致的细分架构设计,具体结构如图 4 所示。将水平 CCD 的单个转移单元同样细分为 4 个并行的子单元,垂直 CCD 输出的大电荷包再次拆分为 4 个小电荷包,通过 4 路并行的水平 CCD 子通道完成高速转移。

在水平 CCD 的末端、输出放大器的前端设置输出节点求和势阱,4 路水平子通道转移的小电荷包在输出节点完成最终合并,合并后的完整电荷包注

入前置放大器,通过源极跟随器转换为电压信号输出。该设计既保证了水平方向大电荷量的高速、高保真转移,又避免了高速读出过程中的电荷残留与信号损失。

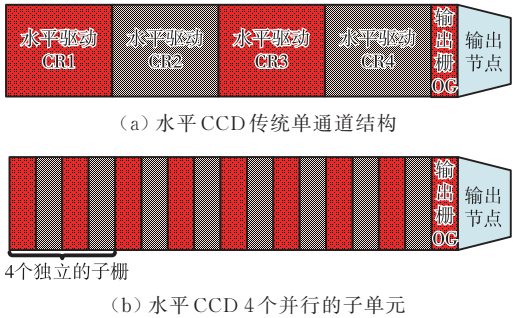


图 4 水平 CCD 细分-输出节点求和架构示意图

2 器件制作

本文研制的 210 μm ×210 μm 超大像元 TDICCD 基于国内 0.5 μm CCD 工艺线完成流片制作,器件核心工艺流程及关键参数如表 2 所示。

表 2 超大像元 TDICCD 核心工艺流程及参数

工艺流程	关键工艺参数	工艺核心目的
衬底准备	N 型<100>单晶硅,电阻率为 1 000 $\Omega\cdot\text{cm}$	提升耗尽层宽度,增强近红外吸收,降低漏电流
埋沟与阱区注入	P 型埋层注入剂量 $5\times10^{12}\text{ cm}^{-2}$, N 型埋沟注入剂量 $1\times10^{12}\text{ cm}^{-2}$	形成体内电荷转移通道,构建光敏区与转移区势垒隔离
栅氧生长	干氧-湿氧-干氧三步氧化,厚度为 50 nm	生长高质量栅氧化层,降低界面态与栅漏电流
多晶硅栅制备	多晶硅厚度为 400 nm,磷掺杂方阻为 20 $\Omega/\square$,刻蚀线宽偏差 $\leq\pm0.1\text{ }\mu\text{m}$	形成细分多晶硅栅结构,保证 4 个子单元电学一致性
层间介质与平坦化	SiO_2 -氮化硅复合介质,CMP 抛光后表面粗糙度 $\leq0.5\text{ nm}$	实现层间绝缘,保证金属化布线平坦性
金属化布线	铝层厚度 1.2 μm ,接触孔尺寸 0.6 μm	完成同相端子栅互联,构建驱动与信号读出通路
钝化与开窗	氮化硅钝化层厚度为 600 nm,压焊块窗口尺寸为 100 $\mu\text{m}\times100\text{ }\mu\text{m}$	保护器件芯片,预留封装键合接口

在工艺制作过程中,重点对多晶硅栅刻蚀均匀性、离子注入剂量精度、栅氧化层质量进行管控,保证了 4 路细分子单元的电学特性一致性,为电荷的均匀拆分与同步转移提供了工艺保障。在此基础上,成功制备出 210 μm ×210 μm 超大像元 5 谱段 TDICCD 晶圆,实物如图 5 所示。在流片完成后,对器件进行了划片、键合与封装,采用陶瓷针栅阵列 (PGA) 封装,便于后续的性能测试与成像验证,带滤光片的陶瓷封装器件实物如图 6 所示。

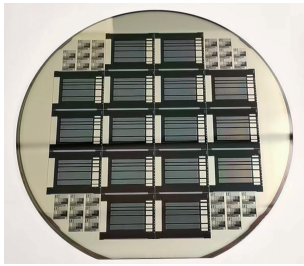


图5 210 $\mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$ 超大像元5谱段TDICCD晶圆实物

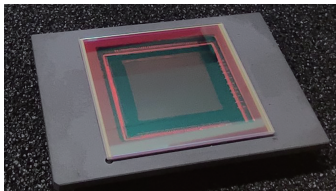


图6 带滤光片的陶瓷封装器件

3 器件性能参数

针对封装完成的超大像元TDICCD,搭建专用的器件测试平台,完成了核心性能参数的测试。器件测试结果汇总如表3所示。

表3 器件核心性能参数测试结果汇总

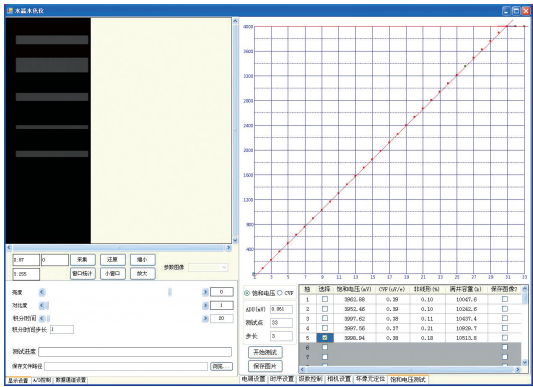
性能参数	实测结果	测试条件
像元尺寸	210 $\mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$	室温 25 $^{\circ}\text{C}$
满阱容量	17 895 ke^{-}	550 nm 入射光,行周期 500 μs
垂直 CCD 单级转移效率	99.999 2%	满阱电荷量,500 μs 行周期
水平 CCD 单级转移效率	99.999 5%	满阱电荷量,1 MHz 读出速率
峰值量子效率	83%	室温 25 $^{\circ}\text{C}$,500 μs 行周期
暗电流	42 pA/cm^2	室温 25 $^{\circ}\text{C}$,积分时间 1 s
读出噪声	0.25 mV	1 MHz 读出速率,室温 25 $^{\circ}\text{C}$
动态范围	80 dB	满阱输出,室温 25 $^{\circ}\text{C}$

3.1 满阱容量

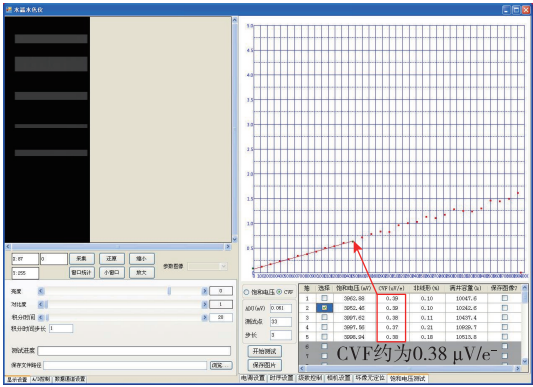
采用基于光电响应线性度的测量方法测试满阱容量,通过逐步增加入射光强并同步记录器件输出电压的变化,可获得对应的光生电荷量。图7(a)展示了器件的饱和输出电压曲线,需要注意的是,由于测试电路中模数转换器量程的限制,该曲线未能完全反映饱和电压的实际值。器件真实的饱和输出电压约为 6.8 V,其波形如图7(c)所示。此外,图7(b)给出了器件电荷-电压转换系数(CVF)曲线,测试 CVF 值约为 0.38 $\mu\text{V}/\text{e}^{-}$ 。

基于以上数据,满阱容量可通过下式进行计算,即:

$$\begin{aligned} \text{满阱容量} &= \frac{\text{饱和输出电压}}{\text{CVF}} = \\ &= \frac{6.8 \text{ V}}{0.38 \mu\text{V}/\text{e}^{-}} \approx 17\,895 \text{ ke}^{-} \end{aligned}$$



(a) 器件饱和输出曲线



(b) 器件 CVF 曲线



(c) 器件饱和输出电压波形

图7 器件满阱容量测试

测试结果表明,该器件的满阱容量约为 17 895 ke^{-} ,这一特性为器件提供了超过了 80 dB 的高动态范围,使其能够适应从弱光到强光的宽动态成像场景。

3.2 电荷转移效率

测试结果显示,在 17 895 ke^{-} 满阱电荷量、500 μs 行周期的测试条件下,器件垂直 CCD 单级转移效率达 99.999 2%,水平 CCD 单级转移效率达 99.999 5%,远优于传统单级结构的 99.99% 水

平。对于多级 TDI 积分的器件,垂直方向总转移效率达 99.994 8%,电荷残留可忽略不计,有效避免了图像拖影问题。如图 8 所示,通过对星形靶标进行成像对比可直观看出,传统单通道结构下的星形靶标成像较为模糊,而细分并行结构下的星形靶标成像更为清晰。这一结果进一步证实了细分并行结构在电荷转移效率方面的优势。



(a) 传统单通道结构下的星形靶标成像



(b) 细分并行结构下的星形靶标成像

图 8 不同器件结构下成像对比

3.3 光电与噪声性能

如图 9 所示,在可见光波段内,该器件的峰值量子效率可达 80% 以上,相较于常规 10 μm 像元 TDICCD 提升了 2 倍,充分体现了超大像元的超高灵敏度优势。在室温 25°C 条件下,器件的暗电流低至 42 pA/cm²,性能处于国内领先水平。输出放大器的读出噪声为 0.25 mV,结合 17 895 ke⁻ 的满阱容量,器件动态范围可达 80 dB 以上,可有效满足弱光探测的需求。

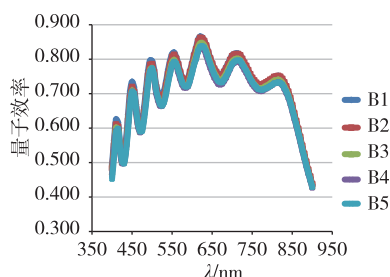


图 9 210 $\mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$ 超大像元 5 谱段 TDICCD 量子效率曲线

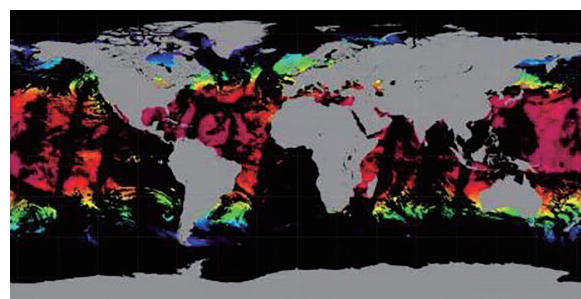
3.4 应用成像验证

2023 年 11 月 16 日,我国成功发射新一代海洋水色观测卫星海洋三号 01 星,其上搭载了配备“超大像元 5 谱段 TDICCD”的水温扫描仪,如图 10 所示,卫星开机后运行正常,传回的多光谱图像清晰,显著提升了水色水温仪的光谱分辨率性能。该扫描仪的核心在于采用了大像元多光谱 TDICCD 探测器,其单个像元尺寸可达一般卫星相机探测器像

元的十倍甚至数十倍,更大的像元意味着更强的感光能力。凭借超大像元尺寸,卫星在数百公里高的轨道上,水色仪能够精准捕捉并区分海水中微弱的颜色差异信号。同时,还能从容应对强光云层的干扰,适应不同的光照条件,确保在强光或弱光环境下都能拍摄出高清、可靠的海洋影像。



(a) 卫星发射现场及新闻报道



(b) 器件多光谱成像

图 10 应用成像验证

4 结论

本文围绕 210 $\mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$ 超大像元 TDICCD 的电荷输运核心瓶颈,开展了架构创新、机理分析、仿真验证与流片测试全流程研究。通过定量剖析电荷自屏蔽效应的作用机制,提出了基于电荷拆分-并行转移-求和还原的细分架构,完成了 2/4/8 细分结构的仿真对比,明确了 4 细分架构在转移性能与工艺实现难度间的最优平衡点。流片测试结果验证了该架构的有效性:器件满阱容量达 17 895 ke⁻,单级电荷转移效率优于 99.999%,成功解决了超大像元 TDICCD 在有限周期内的大电荷包转移难题。

本文提出的细分求和电荷输运技术,突破了传统 CCD 像元尺寸与转移效率的相互制约,为超大像元、超高灵敏度 CCD 器件的设计提供了全新的技术思路。后续将进一步优化细分架构的工艺兼容性,开展更高细分级数(如 8 细分)的器件研制,拓展其在深空探测、极弱光天文观测等领域的应用场景,推动高端成像器件的自主化发展。

参考文献:

- [1] 王庆有, 尚可, 逯力红. 图像传感器应用技术[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2019.
Wang Qingyou, Shang Keke, Lu Lihong. Application Technology of Image Sensor[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [2] 廖乃钊, 刘绪化, 刘昌林, 等. 横向抗弥散多光谱 TDI CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 17-19, 24.
Liao Naiman, Liu Xuhua, Liu Changlin, et al. Multispectral TDI CCD imaging sensors with lateral anti-blooming ability[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 17-19, 24.
- [3] 钟玉杰, 杨 洪, 易学东, 等. 1024×1024 元帧转移纵向抗晕 CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 2023, 44(1): 14-17.
Zhong Yujie, Yang Hong, Yi Xuedong, et al. 1M frame transfer CCD image sensor with vertical antiblooming [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(1): 14-17.
- [4] Janesick J R. Scientific Charge-Coupled Devices [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [5] 李 金, 杨 洪, 孙 晨, 等. 1920×1080 元高灵敏行间转移 CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 2025, 46(1): 10-15.
Li Jin, Yang Hong, Sun Chen, et al. A 1 920 × 1 080 interline transfer CCD image sensor with high output sensitivity [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 10-15.
- [6] Albert J P Theuwissen. Solid-State Imaging with CCDs[M]. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [7] ON Semiconductor. KAE-02150/D: 1920 (H) × 1080 (V) Interline CCD Image Sensor [R/OL]. 2015 [2026-03-20]. <https://www.onsemi.com>.
- [8] van de Steeg M J H, Peek H L, Bakker J G C, et al. A frame-transfer CCD color imager with vertical antiblooming [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, 32(8): 1430-1438.
- [9] 白雪平, 钟玉杰, 杨 洪, 等. 一种昼夜兼容成像 EMCCD 图像传感器[J]. 红外技术, 2023, 45(3): 315-321.
Bai Xueping, Zhong Yujie, Yang Hong, et al. An EMCCD imaging sensor capturing images from sunlight to starlight [J]. Infrared Technology, 2023, 45(3): 315-321.
- [10] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. Semiconductor Physics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [11] 王俊波. CCD 图像传感器技术与应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.
- [12] 程顺昌, 杨 洪, 白雪平, 等. 400 万像素低弥散内线转移 CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 2025, 46(1): 23-28.
Cheng Shunchang, Yang Hong, Bai Xueping, et al. High-resolution interline transfer CCD image sensor with low smear [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 23-28.
- [13] 袁世顺, 杨 洪, 周建勇, 等. 一种针对大像元 CCD 的电荷累积方法研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(4): 628-633.
Yuan Shishun, Yang Hong, Zhou Jianyong, et al. Method for charge accumulation in large-pixel CCD [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 628-633.

作者简介:

杨 洪(1982—), 正高级工程师, 主要从事 CCD 器件的设计研究工作。