光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022102802

大动态高灵敏 1 024×1 024 EMCCD 研制

汪朝敏*，尹 俊，江海波，王廷栋，刘昌林，丁劲松

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 随着硅材料质量的提升和半导体工艺技术的发展，低温制冷下电荷耦合器件（CCD）的暗电流已经可以忽略，此时放大器成了主要的噪声源，限制了对微弱信号的检测。采用电子倍增技术，通过对电荷包在进入输出节点前进行放大，可有效抑制放大器的噪声。然而，电荷包放大后容易饱和，会限制器件的动态范围。本研究采用浮置栅放大器对电荷包进行无损检测。根据检测结果，大的电荷包直接输出，小的电荷包通过电子倍增放大后再输出，获得高灵敏度的同时兼顾了大的动态范围。根据实际测试结构，在 10^{-4} Lx 光照下得到了良好的微光成像效果，同时动态范围可达 15 万倍。

关键词： CCD；EMCCD；微光；动态范围；高灵敏

中图分类号： TN386.5 **文章编号：** 1001－5868(2023)02－0172－03

Development of Large Dynamic and High Sensitivity 1 024×1 024 EMCCD

WANG Chaomin, YIN Jun, JIANG Haibo, WANG Tingdong, LIU Changlin, DING Jinsong

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: With the improvement of silicon material quality and the development of semiconductor process technology, the dark current of CCD (Charge-Coupled Device) under low-temperature refrigeration can be neglected. At this time, the amplifier becomes the main noise source, which limits the detection of weak signals. By using the electronic multiplication (EM) technology to amplify the charge packet before it enters the output stage, the noise of the amplifier can be effectively suppressed. However, the charge packets are easily saturated after amplification, which will limit the dynamic range of the device. In this study, the floating gate amplifier performed nondestructive detection on the charge packets. According to the detection results, the amplifier outputs the large charge packets directly, while the small charge packets are amplified by electron multiplication and then output, thus obtaining high sensitivity and large dynamic range. According to the actual test structure, good micro-light imaging is obtained under 10^{-4} Lx illumination, while the dynamic range was up to 150,000 times.

Key words: CCD; EMCCD; low-level-light; dynamic range; high sensitivity

0 引言

电荷耦合器件（CCD）作为固态半导体成像器件，具有噪声低、动态范围宽、体积小、功耗低、重量轻、寿命长等特点，已广泛应用于航空航天遥感、科学成像等领域[1]。20 世纪 90 年代初，英国马可尼应用技术公司（Marconi Applied Technology）基于硅中碰撞离化现象，开发出电子倍增 CCD（Electron Multiplying CCD，EMCCD）。EMCCD 具有高的灵敏度，适合于微光下成像或弱信号检测[2-4]。然而，当入射信号较强时，倍增放大后容易饱和，限制了器件的动态范围。通过在片上设计无损

收稿日期：2022－10－28.

* 通信作者：汪朝敏 E-mail：wangchaomin99@163.com

检测的浮置栅放大器对电荷包进行无损检测，路由器根据检测结果，大的电荷包直接输出，小的电荷包通过电子倍增放大后再输出，可同时实现高灵敏度与大动态范围成像。

1　器件结构

1.1　器件总体结构

器件为帧转移背照结构，参见图 1。光敏区、存储区均为两相结构；水平区三相结构，倍增区三相之外还有 1 个直流相。主要承接关系为：I1→I2→S1→S2→φSW→TG→Rφ1→RφDC→Rφ2→Rφ3。片上共 3 个放大器，均为两级源跟随器，片上无第二级负载，片外需提供 1.5～2.5 mA的电流。放大器1为不破坏电荷包的浮置栅放大器，检测结果作为信号从放大器 2 或放大器 3 输出的判据。放大器 1 结构如图 2 所示，放大器 2 如图 3 所示。放大器 3 结构与放大器 2 相同。

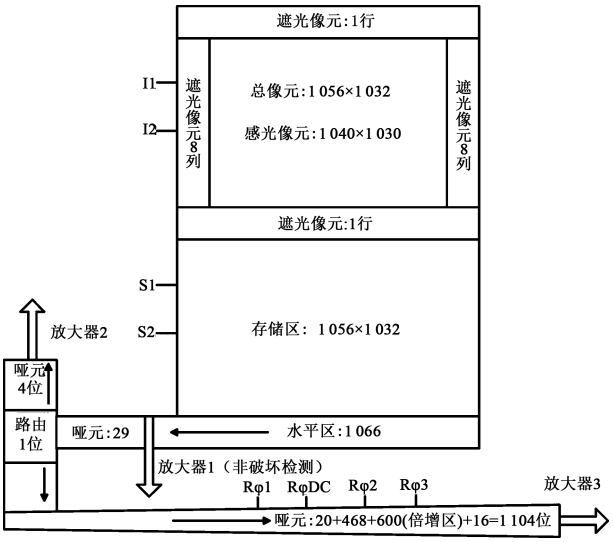


图 1　大动态高灵敏 1 024×1 024 EMCCD 芯片平面结构示意图

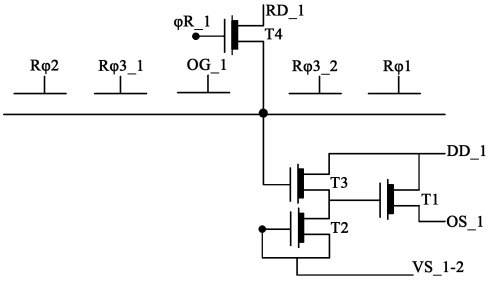


图 2　放大器 1 结构示意图

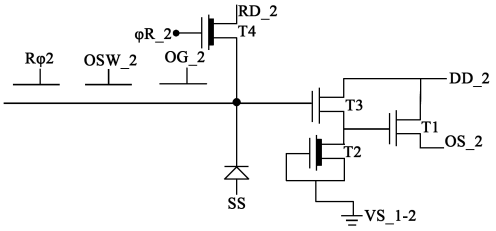


图 3　放大器 2 结构示意图

1.2　电荷倍增与不倍增的选择

CCD 倍增寄存器共做有 600 级，倍增倍数受倍增电压的控制，当单级倍增倍数为 1.011 6 时，倍增可达 1 000 倍。但是，倍增倍数是宏观的统计值，微观上倍增与否存在一定的随机性，这种随机性用噪声因子来评价[5]。因此，仅仅就 CCD 倍增寄存器而言，由于倍增的随机性，随着倍增倍数的增加，倍增后信噪比不断下降，当倍增倍数达到 10 倍时，信噪比的下降达到饱和值$\sqrt{2}$，倍增的优势在于倍增后信号电子数增多，可抑制放大器的噪声[6]。当信号电子数较多，倍增后信噪比下降的弊端超出了抑制放大器噪声带来的好处，此时倍增是不利的。当信号电子数小于放大器噪声电子数的平方时，倍增后从放大器输出的信号较不倍增直接输出信噪比更优。如果信号电子数大于放大器噪声电子数的平方，倍增后从放大器输出的信号较不倍增直接输出信噪比更差。该器件放大器 3 的均方根噪声电子数为 60 e^-，故根据放大器 1 对信号检测的结果，小于 3.6 ke^-的信号倍增后从放大器 3 输出，大于 3.6 ke^-的信号不倍增从放大器 2 输出。

另外，如果信号电子数较多，倍增后信号电子更多，较多的信号电子无论是在 CCD 片上处理还是在 CCD 片外处理都较为麻烦。大动态高灵敏 1 024×1 024 EMCCD 的小信号从放大器 3 倍增放大后输出，大信号从放大器 2 直接输出，检测能力覆盖 1～150 ke^-，动态范围可达 15 万倍。

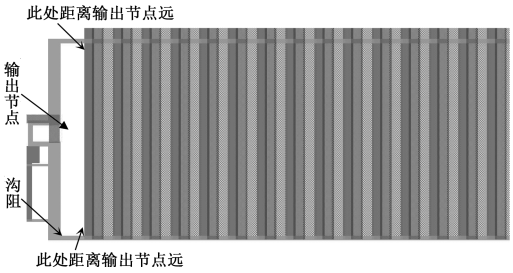
1.3　倍增寄存器结构

如图 1 所示，倍增区呈喇叭状，随着信号的倍增，信号电子数增多，倍增区也逐渐变宽。这样的好处是保证最大满阱电子数的同时，降低了时钟相的电容，特别是倍增相电容的减小降低了驱动电路的压力。

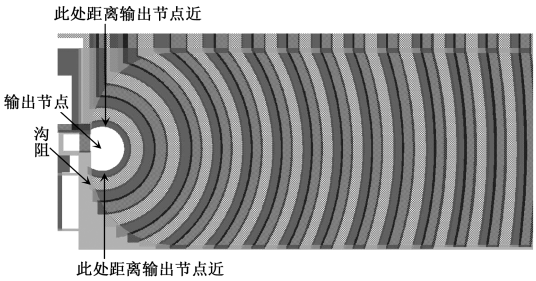
1.4　同时实现大信号处理和高频转移的末端结构

传统 CCD 的末端结构如图 4(a)所示，为了大的信号处理量，通常会增加 CCD 信道的宽度，信道宽度的增加使得 CCD 末端的电子经历较长的距离，降低了其频率特性。沟阻形状从传统的直线型改进成圆弧形，靠近输出节点的 CCD 多晶硅转移电极从传统的直线型改进成圆弧形，这样的改进可以同时

兼顾 CCD 信号处理量和高频转移的问题[7]，参见图 4(b)。



(a) 传统结构



(b) 同时实现大信号处理和高频转移的 CCD 结构

图 4 CCD 的末端结构

2 研制结果

大动态高灵敏 1 024×1 024 EMCCD 实物照片如图 5 所示，采用了半导体制冷封装，最低制冷温度为－40 ℃。成像效果如图 6 所示，CCD 靶面照度为 1.0×10^{-4} Lx，图 6 中暗的区域为不倍增从放大器 2 输出的信号，亮的区域为倍增后从放大器 3 输出的信号，两个区域的成像对比也可看出 EMCCD 微光成像的优势。表 1 是大动态高灵敏 1 024×1 024 EMCCD 的参数。

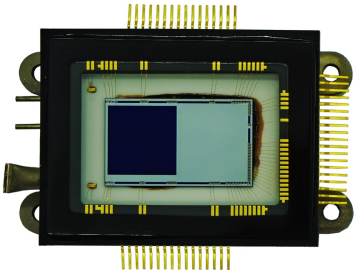


图 5 1 024×1 024 EMCCD 实物照片

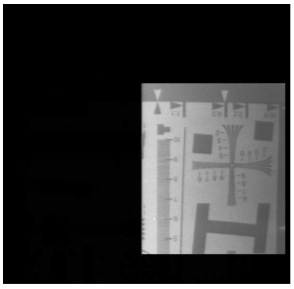


图 6 1 024×1 024 EMCCD 靶标成像结果

表 1 大动态高灵敏 1 024×1 024 EMCCD 的参数

参数名称	指标
像元规模	1 024×1 024
像元尺寸/μm^2	12×12
填充系数/%	100
输出端口数	1
波长范围/nm	200～1 060
峰值量子效率/%	91
最大增益倍数	1 000
灵敏度/Lx	1.0×10^{-5}
传函(MTF)	0.40@650 nm
读出噪声(RMS)/e^-	60
等效噪声(RMS)/e^-	1
满阱电荷/ke^-	150
寄存器满阱电荷/ke^-	560
暗电流密度/(pA/cm^2)	0.23@－40 ℃
响应非均匀性/%	1.6
响应非线性/%	2.8
垂直转移效率	0.999 99
水平转移效率	0.999 95
最大像元读出速率/MHz	15

参考文献：

[1] 汪朝敏，郑 渝，董 杰，等. 高帧频 64×64 元蓝光响应增强 CCD[J]. 半导体光电，2016，37(5)：615-617.
Wang Chaomin，Zheng Yu，Dong Jie，et al. A kind of 64×64 pixels enhanced blue spectrum response CCD with high frame rate[J]. Semiconductor Optoelctronics，2016，37(5)：615-617.

[2] Madan S K，Bhaumik B，Vasi J M. Experimental observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices[J]. IEEE Trans. Electron Devices，1983，30：694-699.

[3] Gajar S A，Burke B E. Charge amplification by impact ionization in charge-coupled devices[J]. IEEE Trans. Electron Devices，1988，35：2435-2436.

[4] Hynecek J. CCM-a new low-noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors[J]. IEEE Trans. Electron Devices，1992，39：1972-1975.

[5] Hynecek J，Nishiwaki T. Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs[J]. IEEE Trans. Electron Devices，2003，50：239-245.

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

[7] 汪朝敏，周建勇，韩恒利，等. 一种避免边缘出现杂散信号的背照式 CCD 结构：202110394941.8[P]. 2021-04-13.

作者简介：

汪朝敏(1971－)，男，研究员级高级工程师，主要从事 CCD 图像传感器方面的研究。