

# 高光谱用中波红外焦平面探测器组件

于小兵,岳冬青,王成刚,宁 提,李敬国,李艳红  
(中国电子科技集团公司第十一研究所,北京 100015)

**摘 要:**本文介绍了高光谱用中波  $2048 \times 256$  红外焦平面探测器组件的研究结果。中波  $2048 \times 256$  红外焦平面探测器由单片中波  $1024 \times 256$  红外焦平面探测器拼接而成,采用非真空密封的高光谱相机集成封装结构。经测试,中波  $2048 \times 256$  红外焦平面探测器组件各项功能正常,性能良好。

**关键词:**高光谱;中波;碲镉汞;探测器;读出电路;拼接

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.011

## The medium wave infrared focal plane detector assembly for hyperspectral applications

YU Xiao-bing, YUE Dong-qing, WANG Cheng-Gang, Ning Ti, LI Jing-guo, LI Yan-hong  
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The research results of a medium wave  $2048 \times 256$  infrared focal plane detector assembly for hyperspectral applications are introduced, in this paper. The medium wave  $2048 \times 256$  infrared focal plane detector is spliced from two single medium wave  $1024 \times 256$  infrared focal plane detectors, which adopts a non-vacuum sealed detector package structure integrated with hyperspectral camera. The test results show that the medium wave  $2048 \times 256$  infrared focal plane detector assembly has normal functions and excellent performance.

**Keywords:** hyperspectral; medium wave; HgCdTe; detector; readout circuit; splice

### 1 引 言

高光谱成像技术是在多光谱技术基础上发展起来的新型探测识别技术。与单一波段或多光谱探测和识别目标方式相比,高光谱数据具有光谱范围宽、谱段多(谱段窄)、光谱连续、光谱分辨率高、信息量大的优点,在获取目标二维图像信息的基础上,同时获取目标的一维光谱信息,能够反映出被探测目标的外形影像以及理化特征。高光谱数据是一个光谱图像的立方体,其空间图像维描述地表二维空间特征,其光谱维揭示图像每一像元的光谱曲线特征,由此实现了遥感数据图像维

与光谱维信息的有机融合,具有“图谱合一”的特点,由于不同目标会因其物理化学属性性质的不同而具有的独一无二的特征光谱曲线,因此通过高光谱成像探测可以对目标的特征辐射进行“指纹识别”,实现精确识别目标。

采用中波红外焦平面探测器组件的红外高光谱成像系统在昼夜均具备快速精确的鉴别能力,可应用于探测识别飞行器尾喷气流、引擎外壁、红外诱饵、红外告警、爆炸气体等<sup>[1]</sup>。本文介绍了针对国内中波红外高光谱探测相机使用的中波  $2048 \times 256$  红外焦平面探测器的研究结果。

## 2 高光谱用中波碲镉汞红外焦平面探测器设计

在红外高光谱成像应用中,红外焦平面探测器接收到的目标光辐射比较小,红外焦平面探测器应具有高增益低噪声性能,在较长的积分时间条件下,获得微弱信号的高信噪比。由于目标不同红外波段的能量差距较大,探测器输出相应谱段信号差异比较大,探测器还应具有更高的动态范围、响应线性度、较低的暗电流、高量子效率等特点。

本文介绍的高光谱用中波  $2048 \times 256$  碲镉汞红外焦平面探测器由 2 只单片中波  $1024 \times 256$  红外焦平面探测器拼接而成。中波  $1024 \times 256$  红外焦平面探测器采用在几百微米厚碲镉汞衬底上液相外延大尺寸碲镉汞薄膜材料,离子注入 n-on-p 型平面同质 pn 结碲镉汞光电二极管阵列芯片,独立自主设计、外协流片高光谱读出电路,碲镉汞光电二极管阵列芯片与读出电路芯片通过高精度倒装互连耦合及底部填充背减薄形成混成探测器芯片,混成探测器芯片可以经受几千次开关机制冷工作循环,具有较长的使用寿命。探测器像元排列如图 1 所示。

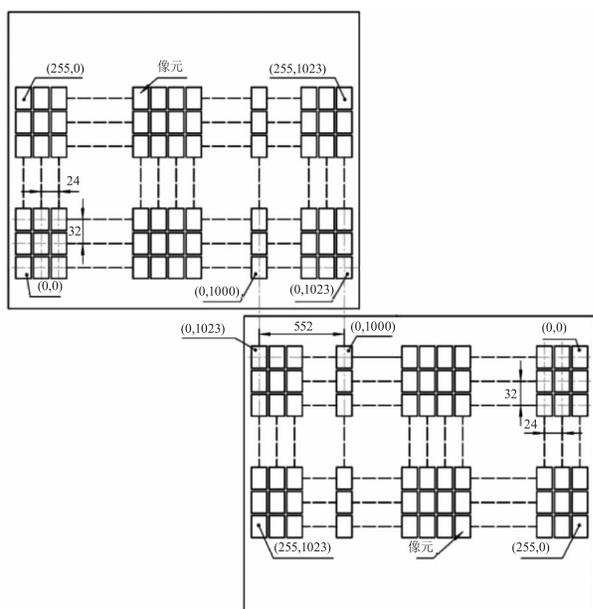


图 1 中波  $2048 \times 256$  红外焦平面探测器像元分布及尺寸

Fig. 1 The medium wave  $2048 \times 256$  infrared focal plane detector pixel distribution and size

## 3 电路设计

读出电路基于  $0.35 \mu\text{m}$  CMOS 5V 工艺设计,采用快拍模式 (Snapshot),对来自光伏二极管的瞬时

信号进行积分、存储、行选通以及信号的采样保持,以多路传输的方式完成  $1024 \text{ 列} \times 256 \text{ 行}$  共计 262144 个光伏二极管的信号输出。像素输入级为电容反馈互阻抗放大器 (CTIA) 结构,工作方式为积分同时读出 (IWR) 模式;积分时间可调,调整步长为 8 个 MC (主时钟);四档增益可调;输出通道 4、8、16 路可选。

读出电路设计包括五个主要部分:像素输入级电路、列级电路、输出级电路、数字控制电路以及版图设计,总体结构如图 2 所示,图 3 为整体版图。

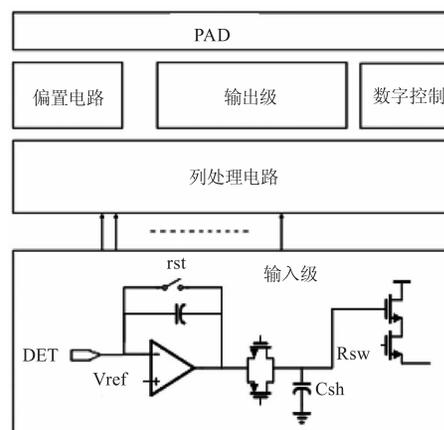


图 2 读出电路总体构成

Fig. 2 The overall composition of the readout circuit

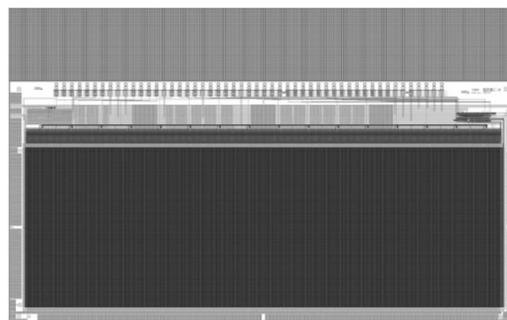


图 3 读出电路整体版图

Fig. 3 The overall layout of readout circuit

### 3.1 像素输入级

CTIA (电容跨阻放大器) 型像素输入级电路具有优秀的电源抑制比、低噪声和良好的探测器偏压控制等特性,<sup>[2]</sup>同时中波探测器暗电流比较小,高光谱应用中的光电流也比较小,因此高光谱用中波  $1024 \times 256$  焦平面探测器输入级采用 CTIA 结构。CTIA 结构在积分工作期间,反馈放大器的大增益使输入保持固定电平,这样既保持了对探测器偏压的控制,又防止了电荷积分在探测器电容上,使光电流

几乎全部累积在积分电容上。由于积分电容器的密勒效应,它的电容能做的很小,以获得高的增益,电路如图 4 所示。

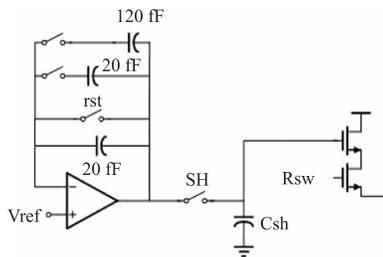


图 4 CTIA 输入级电路

Fig. 4 CTIA input stage circuit

像素输入级电容设计为 20 fF、20 fF、120 fF,通过开关切换组合,可将积分电容分为 4 档,分别是 20 fF、40 fF、140 fF、160 fF。

### 3.2 列级电路

信号在输入级完成积分和采样,经行选通开关后进入列级处理电路,并完成信号转移至输出级<sup>[2]</sup>,列处理电路如图 5 所示。

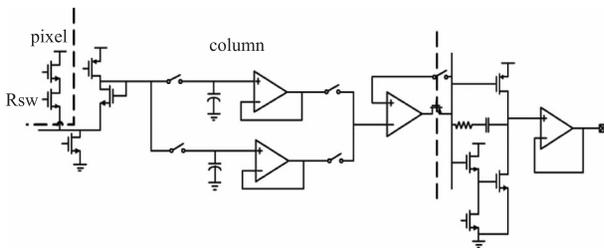


图 5 列处理电路

Fig. 5 The line processing circuit

列处理电路采用乒乓结构,即采用两路处理电路,分别对两行的信号进行传输放大和读出处理。这样可以在不影响读出速度的情况下,减小输出信号对列运算放大器工作速度和带宽的要求,简化电路的细节设计,并大大节省功耗。

### 3.3 输出级电路

输出级电路设计有 4、8、16 通道可选功能,电路采用了分块处理方式,对应 16 路输出,将 1024 列分成了 16 块,每一块都有独立的数字控制电路。

输出通道数由数字电路控制开关切换,输出级对不用的通道做了隔离处理,减轻通道上的输出负载,保证不同输出通道时具有同样的读出速率,输出级电路如图 6 所示。

### 3.4 数字控制电路

数字控制电路完成时序控制功能,包括行译码、

列译码、复位、信号转移、增益可选、4、8、16 输出通道可选等功能,数字输入脉冲有 INT 和 MC 两个脉冲,输出脉冲 datavalid,代表有效信号输出时间,INT 的高电平为积分时间,长短可调,可调的最小步长为 8MC。数字电路预留了部分数字脉冲测试管脚。

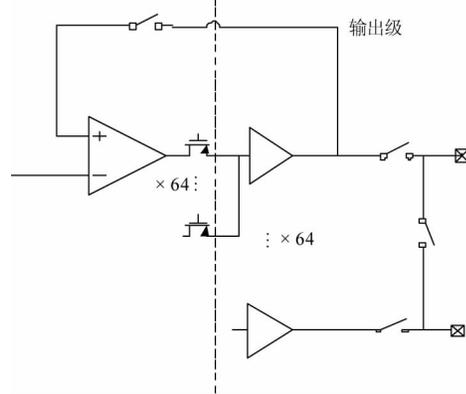


图 6 输出级电路

Fig. 6 The circuit of output stage

## 4 封装结构设计

在制备出单片中波 1024 × 256 红外焦平面探测器基础上,用 2 个中波 1024 × 256 红外焦平面探测器拼接成中波 2048 × 256 红外焦平面探测器后进行封装,集成于相机低温光学和制冷系统。

中波 2048 × 256 红外焦平面探测器为非真空封装的金属结构,主要由背板、拼接基板、多层陶瓷框架、柔性电路板、电连接器、窗座、窗口、冷屏等部分组成,如图 7 所示。背板采用高导热率、低膨胀系数的钼铜材料,机械连接拼接结构、相机结构和制冷机冷链,保证探测器低温工作的温度均匀性,降低结构间低温热失配应力。拼接基板采用高导热率、低膨胀系数的宝石材料,2 个单片中波 1024 × 256 红外焦平面探测器在其上拼接为 2048 × 256 探测器。单片中波 1024 × 256 红外焦平面探测器分别独立电学引出,管脚连接多层导线陶瓷框架,通过多层陶瓷框架优化探测器电学通路布线,消除电学通路间干扰,降低外部电干扰。采用聚酰亚胺柔性电路板实现探测器长距离电学输出,柔性电路板一端与多层陶瓷框架连接,一端连接电连接器,图 8 为 1024 × 256 探测器组件图。

根据 2 个单片中波 1024 × 256 红外焦平面探测器拼接尺寸在宝石基板上设计出探测器高精度拼接标记,用专用精密设备将 1024 × 256 探测器

上的基准标记与宝石基板上设计的高精度拼接标记进行对准,实现中波 2048 × 256 红外焦平面探测器高精度拼接,保证各方向的拼接精度优于 20 μm。

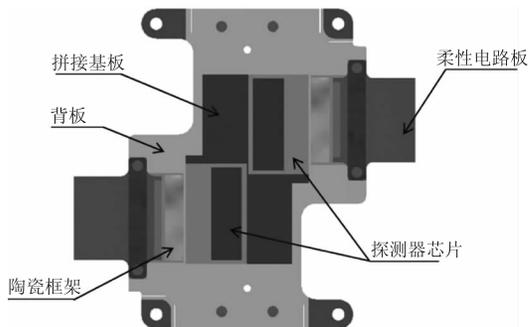


图 7 中波 2048 × 256 红外焦平面探测器拼接封装结构  
Fig. 7 The medium wave 2048 × 256 infrared focal plane detector splicing package structure

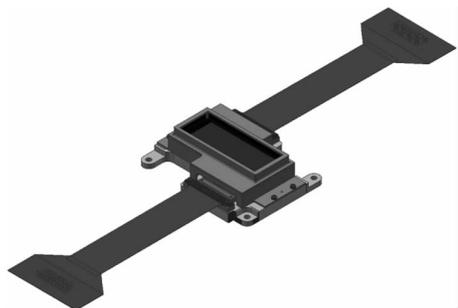


图 8 中波 1024 × 256 红外焦平面探测器组件  
Fig. 8 The medium wave 1024 × 256 infrared focal plane detector assembly

### 5 研究结果

中波 2048 × 256 红外焦平面探测器拼接实物图见图 9,性能测试结果见表 1,相对光谱响应见图 10,实物见图 11。

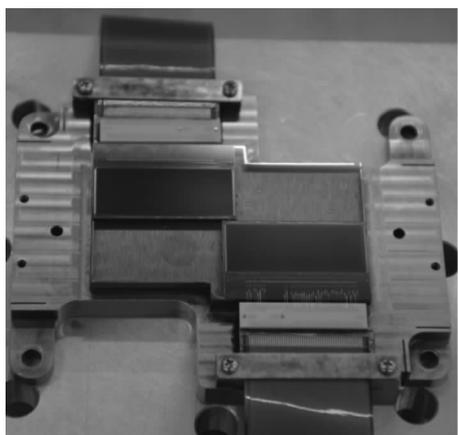


图 9 中波 2048 × 256 红外焦平面探测器拼接实物图  
Fig. 9 The medium wave 2048 × 256 infrared focal plane detector spliced structure photo

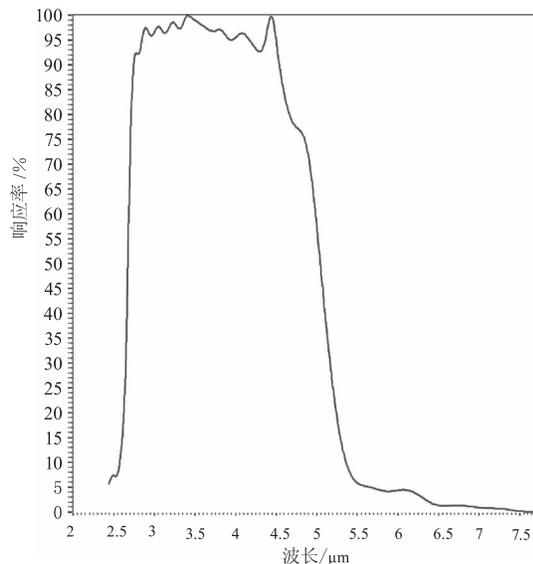


图 10 中波 2048 × 256 红外焦平面探测器相对光谱响应曲线  
Fig. 10 Relative spectral response curve of the MW 2048 × 256 infrared focal plane detector

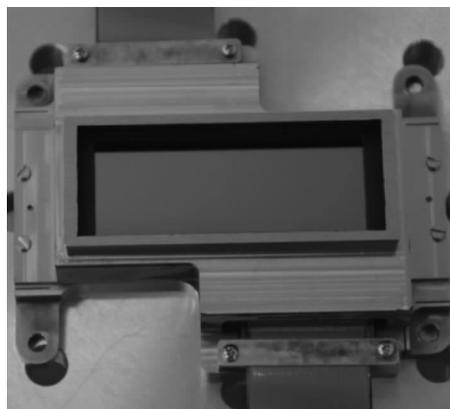


图 11 中波 2048 × 256 红外焦平面探测器组件实物图  
Fig. 11 The medium wave 2048 × 256 infrared focal plane detector assembly photo

表 1 中波 2048 × 256 红外焦平面探测器组件主要性能检测结果

Tab. 1 The main performance of the medium wave 2048 × 256 infrared focal plane detector

序号	指标	性能参数
1	光谱响应范围/μm	2. 679 ~ 5. 044
2	像元规模	2048 × 256
3	像元中心间距/μm	24 × 32
4	工作方式	IWR
5	积分电容/fF	G1 : 20; G2 : 40; G3 : 140; G4 : 160
6	平均峰值探测率/(cm · Hz <sup>1/2</sup> · W <sup>-1</sup> )	3. 4 × 10 <sup>11</sup>
7	响应率不均匀性/%	4. 1
8	盲元率/%	0. 66
9	帧频/Hz	255

(续表)

序号	指标	性能参数
10	平均量子效率/%	74.5
11	读出噪声/( $e^-$ )	G1:97;G2:145; G3:355;G4:386
12	暗电流/( $e^- \cdot \text{pixel}^- \cdot \text{s}^{-1}$ )	$2.76 \times 10^6$
13	线性度/%	99.9
14	满阱输出电压/V	3.4
15	探测器工作温度/K	79

## 6 结论

高光谱用中波  $2048 \times 256$  红外焦平面探测器组件后截止波长为  $5.044 \mu\text{m}$ , 4 档高增益具有较低的读出噪声, 平均峰值探测率达到  $3.4 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , 响应率不均匀性达到 4.1%, 平均量子效率达到 74.5%, 暗电流达到  $2.76 \times 10^6 (e^- \cdot \text{pixel}^- \cdot \text{s}^{-1})$ , 组件功能正常, 性能良好, 具有广泛的应用适用性。

## 参考文献:

- [1] Xu Hong, Wang Xiang jun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 13 - 17. (in Chinese)  
许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13 - 17.
- [2] Zhuo Yi, Yue Dongqing, Li Jingguo, et al. A hyperspectral SWIR FPA ROIC design[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(11): 1382 - 1385. (in Chinese)  
卓毅, 岳冬青, 李敬国, 等. 短波高光谱红外焦平面系统电路设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 1382 - 1385.