

文章编号: 1672-8785(2019)09-0001-05

512×8 像素级数字化长波红外探测器研究

李忠贺 康 健 王成刚 张 敏 陈彦冠

胡尚正 周立庆 吴 卿 袁 媛

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 像素级数字化红外探测器具有更高的性能水平和更强的抗干扰能力, 是红外探测器技术发展的重要方向之一。通过突破像素级数字化读出电路设计、低峰谷碲镉汞材料外延、器件制备工艺以及倒装互连等关键技术, 研制出了一种 512×8 像素级数字化长波红外探测器组件, 并对其性能进行了测试。此探测器的响应波段为 7.85~10.17 μm , 平均峰值响应率为 1.4×10^{11} LSB/W, 响应率非均匀性为 9.13%, 有效像元率为 97.5%, 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 4.4 mK, 动态范围为 90.6 dB。测试结果表明, 该探测器能够满足系统要求。

关键词: 碲镉汞; 红外探测器; 长波红外; 数字化

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.09.001

Research on 512×8 Pixel-Level Digital Long-Wave Infrared Detector

LI Zhong-he, KANG Jian, WANG Cheng-gang, ZHANG Min, CHEN Yan-guan,

HU Shang-zheng, ZHOU Li-qing, WU Qing, YUAN Yuan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The pixel-level digital infrared detector has higher performance and anti-interference ability, which is one of the important directions of infrared detector technology development. By breaking through key technologies such as pixel-level digital readout circuit design, low peak-valley HgCdTe material epitaxy, device fabrication process, and flip-chip connection, a 512×8 pixel-level digital long-wave infrared detector assembly is developed, and its performance is tested. The results show that this detector assembly can meet the system requirements, with spectral response range of 7.85–10.17 μm , average peak responsivity of 1.4×10^{11} LSB/W, responsivity non-uniformity of 9.13%, operable pixel factor of 97.5%, noise equivalent temperature difference (NETD) of 4.4 mK and dynamic range of 90.6 dB.

Key words: HgCdTe; infrared detector; long-wave infrared; digital

收稿日期: 2019-08-15

作者简介: 李忠贺(1981-), 男, 内蒙古赤峰人, 高级工程师, 主要从事红外探测器方面的研究。

E-mail: zhli1981@163.com

0 引言

为了取得现代高技术战争中的制信息权,欧美各国在发展碲镉汞焦平面探测器组件方面不遗余力。随着红外技术的不断进步,高性能红外探测器正向着高分辨率、双/多色、数字化等方向发展。其中,以数字化红外焦平面探测器为代表的第三代红外焦平面技术已经在侦察预警、精确制导与打击等领域得到了广泛应用。焦平面探测器的数字化不仅可以大大提升红外系统可探测的灵敏度极限水平,而且还可提高系统的响应速度和作战效能,并使其同时具备更强的抗干扰能力。因此,与第二代红外探测器相比,红外焦平面技术水平有了极大提升。

根据模拟数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)所在位置的不同,数字化红外焦平面探测器主要分为芯片级、列级和像素级三种类型。其中,芯片级数字化芯片在信号传输的末端进行模数转换。由于这种方式无法充分发挥出数字化电路的优势,采用此类设计的数字化焦平面探测器已经基本没有相关研究。列级数字化芯片在信号传输的中间阶段进行模数转换。该方式具有转换速率高、面积不受限等优势,但其功耗较大,无法大幅提升信噪比。像素级数字化芯片在信号传输的初始阶段进行模数转换,能够提供超大电荷处理能力,且在长积分时间的工作条件下可获得很高的信噪比^[1-5]。

本文从像素级数字化读出电路设计、碲镉汞材料及焦平面阵列制备等方面介绍了 512×8 像素级数字化长波红外探测器组件的研制过程,并对所制备的探测器组件进行了性能测试。

1 像素级数字化读出电路设计

读出电路对探测器组件的性能影响很大,是实现探测器组件集成数字化的关键。对于扫描型红外焦平面探测器,读出电路的主要功能是对来自光伏二极管的瞬时信号进行积分、像素级模数转换、采样-保持、存储以及时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI),并以多

路传输的方式完成 512×8 (共计 4096 个) 光伏二极管数字信号的 18 bit 并行输出。由于制冷型红外焦平面组件对小型化和低功耗的要求,读出电路设计受到探测器的像元面积、制冷机冷量等各方面的限制,因此在 ADC 的结构选取上需综合考虑 ADC 的精度、功耗和转换速度等方面的因素。通过对主流 ADC 的结构特征以及具有 TDI 功能的读出电路的工作特征进行详细分析,我们在设计电路系统时采用了积分同时读出的工作方式,在 ADC 结构的选择上采用了电荷包计数型结构。该结构具有功耗低、帧频高、结构简单、易在有限像元面积内实现等优势。如图 1 所示,它主要由积分管 T_{inj} 、积分电容 C_{int} 、比较器、计数器和寄存器组成^[6]。

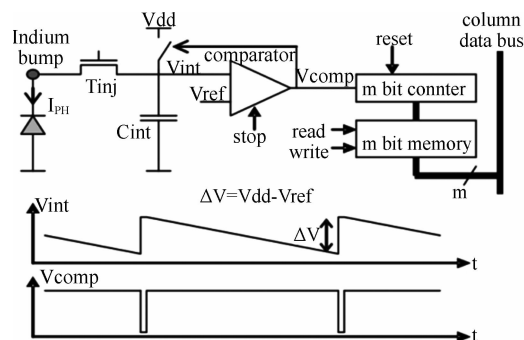


图 1 电荷包计数 ADC 的工作原理

在读出电路的版图设计上,为了达到最高的信噪比,将模拟偏置信号的传输路径与数字输出信号的传输路径分开,即采用双边引线的方式:模拟偏置信号的焊盘从读出电路芯片的上边缘引出,数字输出信号由读出电路的下边缘引出。这种走线方式可以保证模拟信号与数字信号的隔离性,从而避免数字信号对模拟信号的干扰。图 2 所示为单个像素的版图布局。采用 $0.18 \mu\text{m}$ 硅互补金属氧化物半导体技术制备读出电路流片。

2 长波 512×8 数字化探测器芯片制备

采用液相外延工艺制备 512×8 长波探测器芯片材料,即在碲镉汞衬底上通过低峰谷值外延技术完成高均匀性长波碲镉汞薄膜材料的生长。该材料的组分值为 0.2272,半峰宽为 $30.04''$ 。低峰谷值外延技术的采用显著降低了

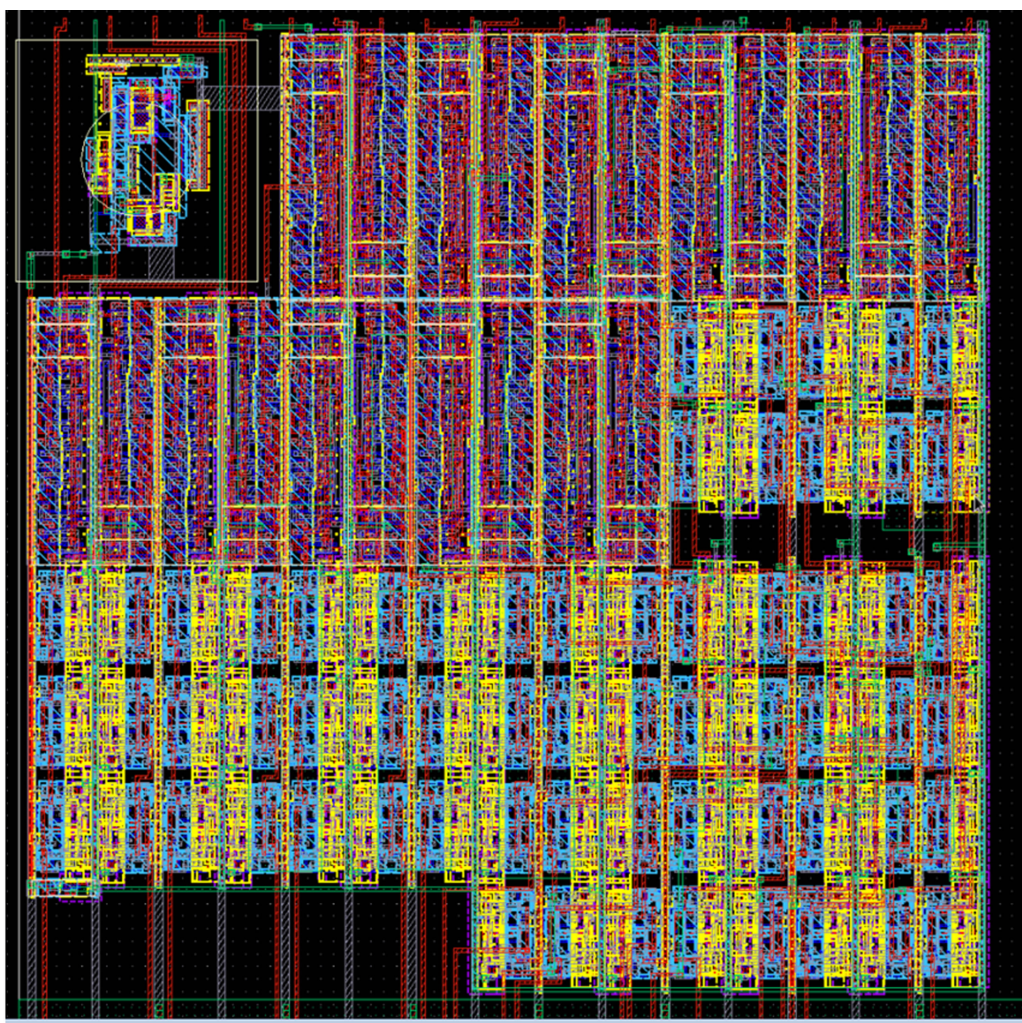


图 2 读出电路单个像素的版图布局

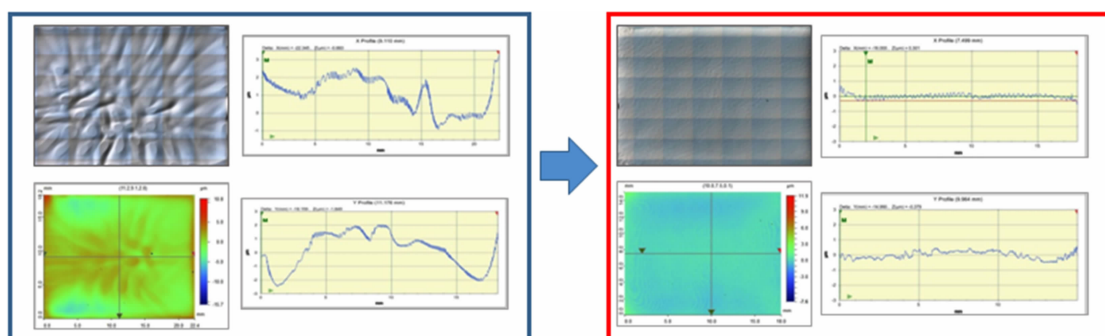


图 3 普通液相外延材料与低峰谷值外延材料的测试对比

吸收层的厚度差异, 提高了材料的均匀性水平, 同时也给后续的器件互连工艺提供了较大的冗余度。图 3 所示为普通液相外延材料与低峰谷值外延材料的测试对比情况。

在器件工艺方面, 采用溅射的 CdTe/ZnS 复合膜系进行低漏电流表面钝化, 经退火后形

成 P 型。光敏元采用平面型 B^+ 离子注入成结, 电极接触孔采用全干法低损伤刻蚀工艺完成, 电极金属化采用溅射工艺制备。经划片后, 最终形成长波碲镉汞光电二极管阵列。图 4 所示为该器件的光敏元结构排列及尺寸。图 5 所示为 77 K 温度下的器件 I-V 测试结果。

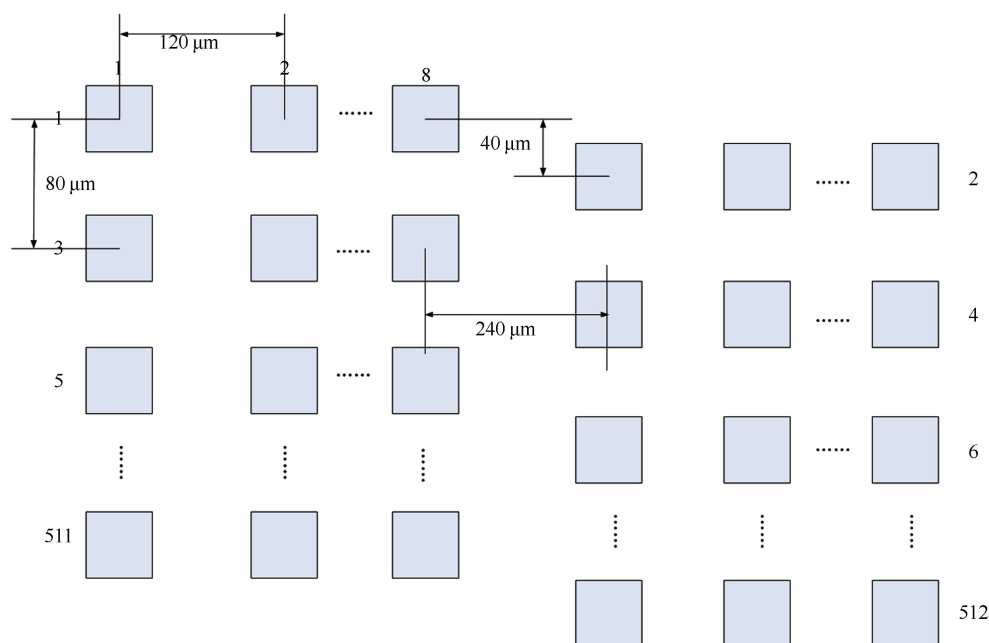


图 4 光敏元的结构排列图

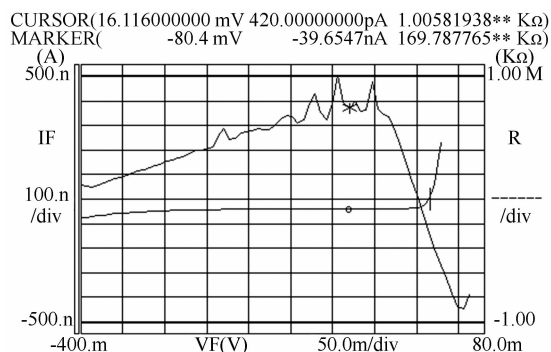


图 5 77 K 下的器件 I-V 测试结果

在碲镉汞光电二极管阵列完成工艺后，基于倒装互连回流焊技术，用钢柱对碲镉汞探测器芯片与硅读出电路进行互连耦合，形成 512×8 长波碲镉汞探测器混成芯片。图 6 为单个碲镉汞器件、读出电路芯片和混成芯片的照片。

3 探测器组件测试

在将混成芯片封装于金属微杜瓦中并耦合制冷机后，对探测器组件进行了性能测试。由于探测器的 NETD 值很小，在测试方面采取了部分优化措施。一方面，根据测试的低噪声需求，改进了外围驱动电路以降低其噪声影响；另一方面，为了对数字化红外焦平面的性能参数进行测试，研制了一种基于 Camera-Link 协议传输测试数据的现场可编程门阵列

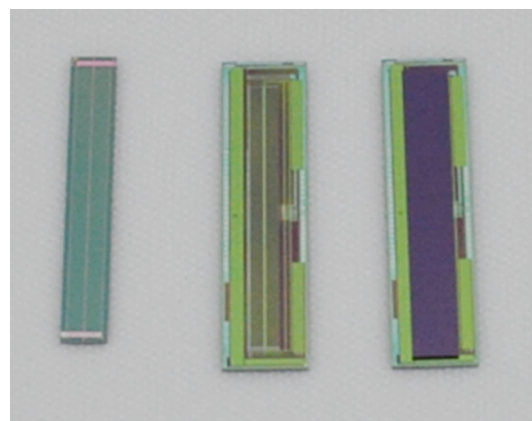


图 6 碲镉汞器件(左)、读出电路芯片(中)和混成芯片(右)

(Field Programmable Gate Array, FPGA) 芯片测试电路板。此电路板可将探测器输出的 18 bit 数据直接采集到 FPGA 芯片中，然后按协议将数据编码，并将其传输至带有 Camera-Link 协议图像采集卡的电脑端。此时获取数字信号，并计算出探测器的性能指标。在 60 K 温度下，探测器组件的光谱响应范围为 $7.85 \sim 10.17 \mu\text{m}$ ，如图 7 所示。表 1 列出了 30 ms 积分时间下其他主要性能指标的测试结果。

从以上测试结果中可以看出，基于优化后的像素级数字化读出电路设计以及碲镉汞材料与器件制备工艺，本文研制的 512×8 像素级

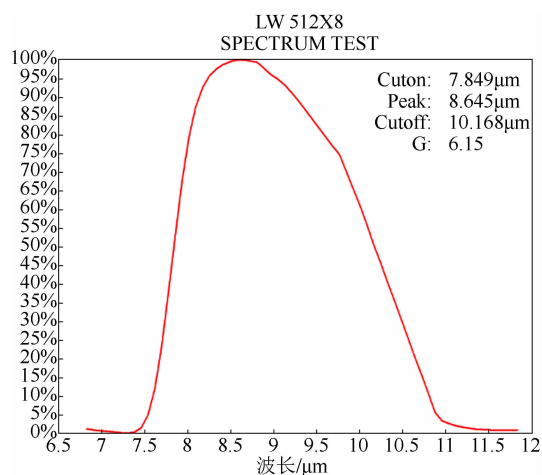


图 7 光谱响应测试结果

表 1 主要性能指标测试结果

序号	测试项目	测试值
1	平均峰值响应率	1.4×10^{11} LSB/W
2	响应率非均匀性	9.13%
3	有效像元率	97.5%
4	噪声等效温差	4.4 mK
5	动态范围	90.6 dB
6	探测器输出位数	18 bit
7	单抽头读出速率	2.01 MHz
8	行频	32.0 Hz

数字化长波红外探测器组件实现了较大的动态范围和超小的 NETD, 显著提高了长波红外探测器的灵敏度, 能够满足多种高端红外系统对数字化碲镉汞长波红外探测器组件的要求。我们下一步将主要对材料生长缺陷控制和器件工艺控制等方面进行优化, 进一步提升探测器组件的有效像元率和降低响应率的非均匀性, 从而制备出性能更好的 512×8 像素级数字化长波红外探测器组件。

4 结束语

像素级数字化红外探测器具有更高的性能

水平和更强的抗干扰能力, 是红外探测器技术发展的重要方向之一。本文通过突破像素级数字化读出电路设计、低峰谷碲镉汞材料外延工艺、器件制备工艺以及倒装互连等关键技术, 研制出了 512×8 像素级数字化长波红外探测器组件, 并对其性能进行了测试。结果表明, 该探测器的响应波段为 $7.85 \sim 10.17 \mu\text{m}$, 平均峰值响应率为 1.4×10^{11} LSB/W, 响应率非均匀性为 9.13%, 有效像元率为 97.5%, NETD 值为 4.4 mK, 动态范围为 90.6 dB, 可满足多种高端红外系统对数字化碲镉汞长波红外探测器组件的要求, 同时为后续各类规格像素级数字化红外探测器的研制奠定了良好的技术基础。

参考文献

- [1] 白丕绩, 赵俊, 韩福忠, 等. 数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(1): 0102003–0102008.
- [2] 王忆锋, 陆剑鸣. 向数字化发展的红外焦平面阵列 [J]. 红外技术, 2013, **35**(4): 195–201.
- [3] Matthew G B, Justin B, Curtis C, et al. Digital-pixel Focal Plane Array Development [C]. SPIE, 2010, **7608**: 76082H.
- [4] Radford W A, Radford W A, Patten E A, et al. Third Generation FPA Development Status at Raytheon Vision Systems [C]. SPIE, 2005, **5783**: 331–339.
- [5] Fillon P, Dugalleix S, Pistone F, et al. Digital Output for High Performance MCT Staring Arrays [C]. SPIE, 2006, **6206**: 62060U.
- [6] Guellec F, Peizerat A, Tchagaspian M, et al. A $25 \mu\text{m}$ Pitch LWIR Focal Plane Array with Pixel-level 15-bit ADC Providing High Well Capacity and Targeting 2 mK NETD [C]. SPIE, 2010, **7660**: 76603T.