

# 光学学报

## 高帧频 384 × 288 长波数字红外焦平面探测器

张济清, 钟昇佑, 李正芬, 毛文彪, 陈楠, 白丕绩, 韩庆林, 姚立斌\*

昆明物理研究所, 云南 昆明 650223

**摘要** 高帧频红外焦平面探测器在红外武器系统、光谱成像和高速测温中有着重要应用。目前,我国高帧频红外焦平面技术还比较落后,这严重制约着我国高端红外武器装备、光谱成像技术、高速测温仪器的发展。针对高帧频红外成像应用,设计并流片加工了一款 384 × 288 面阵、像元间距为 25 μm 的数字读出电路,与长波 HgCdTe 红外探测器芯片进行倒装互连,形成混合探测器芯片,并封装于金属真空杜瓦中,再配置斯特林制冷机,成功研制出了高帧频 384 × 288 长波数字红外探测器组件。经测试,所研制器件最高帧频达到 1012 Hz,噪声等效温差(NETD)为 16.8 mK,动态范围达到 95.2 dB。采用所研制器件成功捕捉到了打火机点火瞬间的红外图像,该图像清晰呈现了火焰产生、迸出的过程,获得了良好的成像效果。

**关键词** 探测器; 红外探测器; 读出电路; 数字像素; 高帧频红外成像; 高动态范围

中图分类号 TN215

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2036001

### High Frame Rate 384 × 288 Long-Wave Digital Infrared Focal Plane Array Detector

Zhang Jiqing, Zhong Shengyou, Li Zhengfen, Mao Wenbiao, Chen Nan,  
Bai Piji, Han Qinglin, Yao Libin\*

*Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China*

**Abstract** High frame rate infrared focal plane array detectors have important applications in infrared weapon systems, spectral imaging, and high-speed temperature measurement. Currently, in our country, lag in high frame rate infrared focal plane array technology limits the development of high performance infrared weapon, spectral imaging, and high-speed temperature measurement technologies. Targeting at high frame rate infrared imaging applications, a 384 × 288 array, 25-μm pitch digital readout integrated circuit is designed and fabricated, and then, hybridized to a long-wave HgCdTe detector array. A high frame rate 384 × 288 long-wave digital infrared detector assembly is implemented by assembling the hybrid focal plane array in a metal vacuum dewar and coupling with a Stirling cryocooler. Measurement results demonstrate that the maximum frame rate is 1012 Hz, noise equivalent temperature difference (NETD) is 16.8 mK, and dynamic range reaches 95.2 dB. An ignition of a lighter is successfully captured by the developed detector. In addition, the details of flame growth and spurting are clearly presented, and a good imaging effect is obtained.

**Key words** detectors; infrared detector; readout integrated circuit; digital pixel; high frame rate infrared imaging; high dynamic range

**OCIS codes** 040.3060; 100.2550; 110.3080

高帧频红外焦平面探测器是实现高速红外成像系统的关键,在高速导弹红外导引头、多光谱成

像技术和高速测温领域都有着非常重要的应用<sup>[1-2]</sup>。目前,国外针对高速红外成像应用,已研

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-05-06; 录用日期: 2021-05-17

基金项目: 国防预研基金(30102040104)

通信作者: \*libin\_yao@163.com



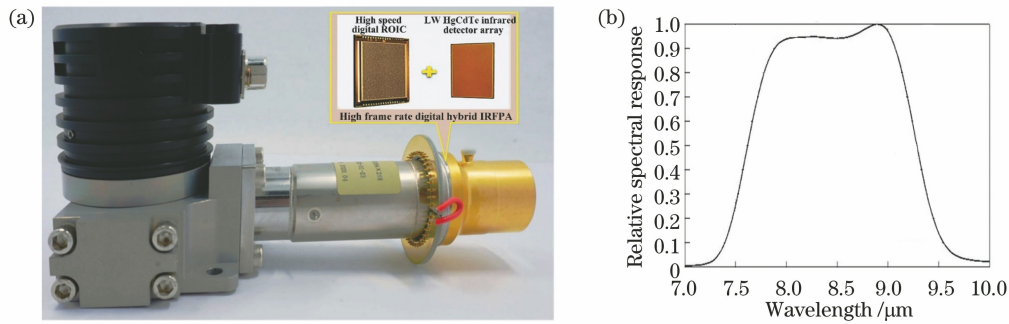


图 2 所研制高帧频数字红外焦平面阵列探测器组件及其光谱响应曲线

Fig. 2 Developed high frame rate digital infrared focal plane array detector and spectral response curve

红外相机产品的 NETD 普遍高于  $20 \text{ mK}$ <sup>[4]</sup>)。图 3 给出了此测试条件下,器件对  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  目标温差 ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$

和  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  黑体目标)的信号响应图,响应率非均匀性为  $5.3\%$ 。图 3 还给出了 NETD 直方图统计结果。

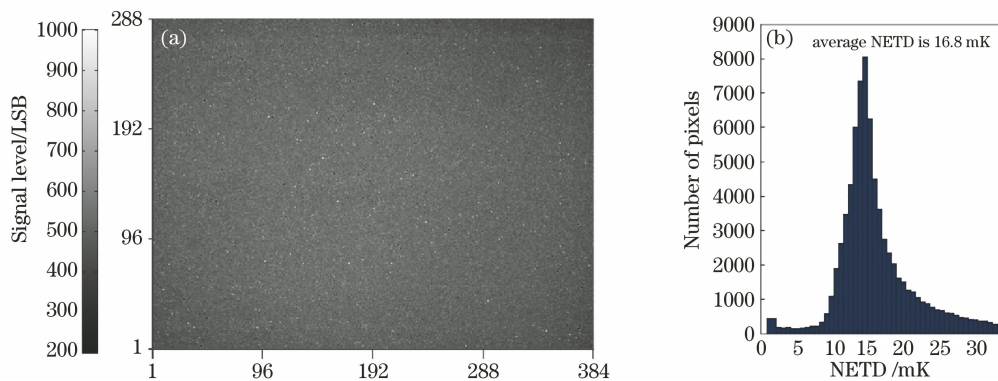


图 3 所研制探测器信号响应和 NETD 测试结果

Fig. 3 Response map and NETD histogram of developed detector

为了测试器件的动态范围,需要采用高温目标使器件趋于饱和,并测出饱和输出值。由于普通黑体最高温度仅能达到  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,无法使器件饱和,故采用酒精灯将物体加热到几百摄氏度的方式来获得高温目标。测试中,使用酒精灯持续对一个热电偶温度计的探头进行加热,一方面可以获得高温目标,另一方面可通过温度计读数获知目标温度信息。随着探头温度升高,器件输出值逐渐增大。当温度达  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  时(已是温度计可测的最高温度),器件输出值达到 33590 水平。依据 GB/T 17444—2013《红外焦平面阵列参数测试方法》,可计算得出器件的动态范围已达  $95.2 \text{ dB}$ 。对于所设计 16 bit 像素 ADC,其理论最大输出可达到 65535,器件最大的动态范围理论上可以达到  $101 \text{ dB}$ 。因此,可推知所研制器件的动态范围在  $95.2 \text{ dB}$  到  $101 \text{ dB}$  之间,远远高于一般红外焦平面器件  $75 \text{ dB}$  左右的动态范围。

配置红外镜头后,对所研制器件进行了高速成像验证。用一个煤油齿轮打火机作为目标,对点火

的瞬间进行了捕捉,成像效果如图 4 所示,展示了点火后的第 1, 2, ..., 7 ms 时刻,和第 31, 32, ..., 39 ms 时刻所捕捉到的图像,清晰呈现了火焰产生、迸出的整个过程,获得了良好的高速红外成像效果。从成像图片中还可以看出,人手 ( $36 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 和火焰 ( $\text{数百}^\circ\text{C}$ ) 可同时成像,而且可分辨出手上的指甲和火焰的层次,图像不饱和,充分展现出了所研制器件超高动态范围特性。

基于全自主设计的高帧频像素级 ADC 数字红外焦平面读出电路,完成了一款  $384 \times 288$  规格、像元间距为  $25 \text{ } \mu\text{m}$  的高帧频长波数字红外焦平面探测器。该探测器达到了最高  $1012 \text{ Hz}$  的工作帧频,NETD 为  $16.8 \text{ mK}$ ,初步评估动态范围达到  $95.2 \text{ dB}$ 。此款高速探测器的成功研制,打破了国外对我国高帧频红外焦平面器件的技术封锁,实现了 kHz 级别国产红外焦平面探测器技术突破,具有重要意义。基于此探测器组件,进一步集成光学、结构和高速成像电路,开发高速红外相机产品是本研究团队下一步重要工作。

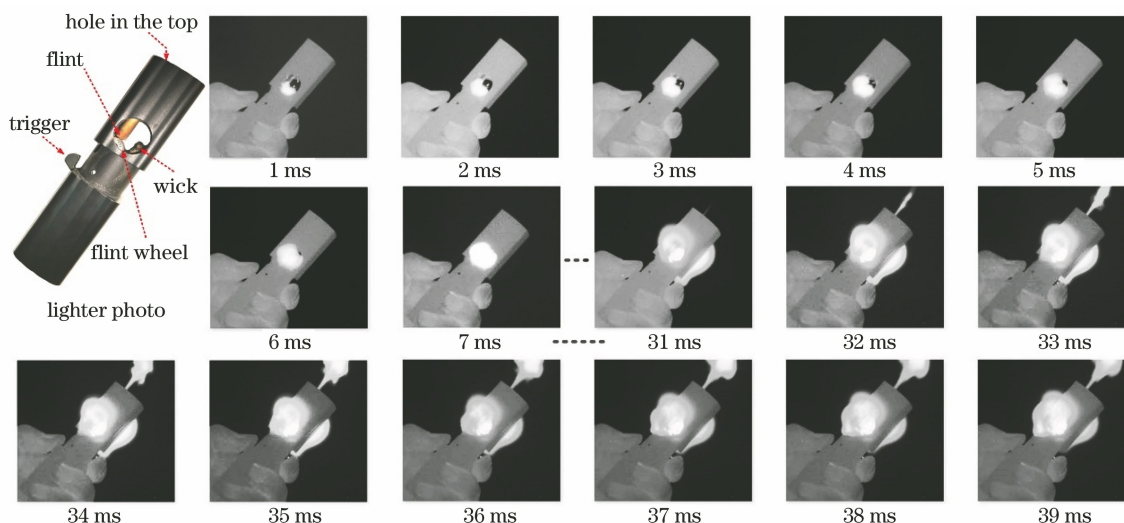


图 4 所研制高帧频红外探测器捕捉到的打火机点火过程

Fig. 4 Lighter ignition process captured by developed high frame rate infrared detector

### 参 考 文 献

- [1] Lü J, Luo Y, Qing S, et al. Application analysis of infrared guidance technology in air-to-air missile[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12): 70-74.  
吕洁, 罗勇, 卿松, 等. 红外制导技术在空空导弹中的应用分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 70-74.
- [2] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (7): 0722002.  
杨福臻, 陈新华, 赵知诚, 等. 面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统[J]. 光学学报, 2020, 40 (7): 0722002.
- [3] Brown M G, Baker J, Colonero C, et al. Digital-pixel focal plane array development [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7608: 76082H.
- [4] Telops. High-speed IR cameras[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-04]. <https://www.telops.com/cn/products/high-speed-cameras>.
- [5] Yue D Q, Ma J, Li J G, et al. Design of ROIC for LWIR hyperspectral detector[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(8): 1014-1018.  
岳冬青, 马静, 李敬国, 等. 高光谱用长波红外探测器读出电路设计[J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 1014-1018.
- [6] Liang Q H, Jiang D Z, Chen H L, et al. Design of  $640 \times 512$  infrared ROIC based on time-sharing method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1004001.  
梁清华, 蒋大钊, 陈洪雷, 等. 基于分时共享方案的  $640 \times 512$  红外读出电路设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1004001.
- [7] Li Y, Wang B, Bai P J, et al. High performance ROIC applied in MCT infrared focal plane array for missiles[J]. Infrared Technology, 2014, 36(9): 700-704.  
李煜, 王博, 白丕绩, 等. 高性能弹用碲镉汞红外焦平面读出电路[J]. 红外技术, 2014, 36(9): 700-704.
- [8] Ma Q, Deng G R, Su Y H, et al. Response of InSb infrared detector with mesa PN structure [J]. Infrared Technology, 2016, 38(4): 305-309.  
马启, 邓功荣, 苏玉辉, 等. 台面 PN 结 InSb 红外探测器响应时间研究[J]. 红外技术, 2016, 38(4): 305-309.
- [9] Yao L B, Chen N. High-performance low noise digital readout circuit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(1): 83-92.  
姚立斌, 陈楠. 高性能低噪声数字读出电路[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 83-92.