

百万帧频中波红外图像传感器研究

张济清¹, 邓功荣¹, 毛文彪¹, 钟昇佑¹, 陈楠¹, 陈浩森², 姚立斌^{1*}¹昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;²北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081

摘要 设计了一款 64×64 面阵规格、片上集成存储器的超高速红外焦平面数字读出集成电路, 将其与中波红外焦平面探测器芯片进行了互连, 成功研制出超高速 64×64 中波红外图像传感器。实验结果表明, 所研制超高速红外图像传感器的帧频达到 1 MHz, 存储深度为 100 帧, 对黑体温度呈现近似线性响应, 具有优于 3.6 K 的温度分辨率。

关键词 图像处理; 超高速成像; 红外成像; 高速测温; 红外焦平面

中图分类号 TN215

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2136001

Development of Mid-Wave Infrared Image Sensor with Frame Rate of 1 MHz

Zhang Jiqing¹, Deng Gongrong¹, Mao Wenbiao¹, Zhong Shengyou¹, Chen Nan¹,
Chen Haosen², Yao Libin^{1*}¹Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China;²Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A 64×64 ultra-high-speed digital readout integrated circuit (DROIC) with an on-chip integrated memory is designed for infrared focal plane signal readout. By bonding the DROIC with a mid-wave infrared focal plane array detector, an ultra-high-speed mid-wave infrared image sensor is developed. Experimental results demonstrate that the developed infrared image sensor achieves a frame rate of 1 MHz and a record length of 100 frame, with approximately linear response to blackbody temperature and a temperature resolution better than 3.6 K.

Key words image processing; ultrafast imaging; infrared imaging; high-speed temperature measurement; infrared focal plane

OCIS codes 100.0118; 110.3080; 120.6780; 100.2550

超高速成像技术是研究爆炸、燃烧、碰撞、冲击波、材料裂变等过程的重要手段^[1]。超高速的红外图像传感器既可实现对极快变化过程的图像捕捉, 又可以获取温度变化信息, 在动态断裂、绝热剪切、金属切削等研究(要求成像系统具有百万帧每秒的图像捕捉速度)中具有重要应用^[2-3]。2000 年 Zehnder 等^[4]研制成功面阵规模为 8×8、帧频为 1 MHz 的超高速红外成像系统, 实现了超高速红外

成像和温度检测, 但其采用分立放大器读出技术方案, 系统庞大, 面阵扩展和速度提升较为困难。2015 年 Etoh 等^[5]提出基于高速 CCD 电路互连红外探测器芯片实现百万帧频红外图像传感器的构想, 分析了所面临的众多技术难题, 但其并未给出具体的解决手段。2015 年至今, 仍未见基于读出集成电路的面阵形百万帧频红外图像传感器的相关报道。目前的高速红外相机产品的成像帧频多为数百 Hz

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-04-02; 录用日期: 2021-04-16

基金项目: 国防预研基金

通信作者: *libin_yao@163.com

到 3 kHz,局部开窗后最高可达到 150 kHz 水平^[6],达不到百万帧频的应用要求。在超高速物理现象的研究中,可使用的红外传感器仍多为线列器件^[7-8],其只能获取一个维度上的信息,使得研究工作非常局限。本研究团队自 2019 年开始进行超高速红外图像传感器的研究,针对高时间、空间分辨率的高速红外测温系统应用,于 2020 年设计完成一款超高速红外焦平面数字读出集成电路,将其与 64×64 InAsSb 中波红外焦平面探测器芯片(光谱响应范围为 $3.0 \sim 4.5 \mu\text{m}$)倒装互连后实现了 1 MHz 帧频、 64×64 面阵规模的超高速红外图像传感器研制。开发了触发控制和图像采集电路,完成了百万帧频红外图像传感器的测试评估和超高速成像验证。

所研制的超高速红外图像传感器的原理如图 1 所示,通过以下两项关键技术将传感器的光电信号采样周期缩短至 $1 \mu\text{s}$ 以下,实现百万帧每秒的图像采集速度。两项关键技术为:1)高速光电信号转换

技术,该技术将光电流高速转换成 MOS 管的栅源电压(V_{gs}),将此电压作为响应电压信号进行采样和存储,无积分操作,实现光电流信号到电压信号的高速转换;2)高速片上存储技术,该技术基于片上集成存储器,传感器为猝发(burst)工作模式^[9],且存储器集成在像素内,将信号传输路径缩至最短级别,从而大大缩短信号传输时间,实现信号的高速传输和存储。在像素电路中设计了 BDI 输入级结构,一方面可为探测器提供稳定的偏置电压,另一方面可实现光电流 I_{PD} 到 MOS 晶体管 V_{gs} 的对数转换,使传感器可以处理超过 4 个数量级范围的光电流信号,获得更宽的温度探测范围。通过设计延迟控制电路,可精确控制曝光操作和触发信号之间的延迟,保证曝光和目标过程的精确同步。在片上集成 10-bit 逐次逼近型(SAR)模数转换器,实现传感器输出的数字化。

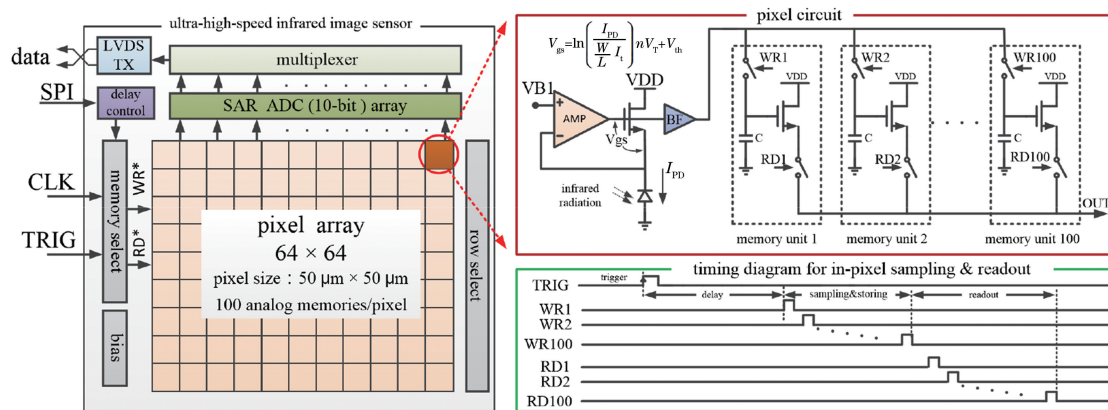


图 1 所研制超高速中波红外图像传感器原理

Fig. 1 Principle of developed ultra-high-speed mid-wave infrared image sensor

为验证所研制超高速中波红外图像传感器而搭建起来的测试系统和所采集到的红外图像如图 2 所示。超高速红外图像传感器封装于杜瓦瓶中,在杜瓦瓶中灌满液氮以保证传感器的 77 K 低温工作条件。为验证 $1 \mu\text{s}$ 的光电信号采样,采用高速旋转的调制盘作为观测目标,其半径为 5 cm。传感器曝光帧频为 1 MHz,缓存 100 帧图像,捕捉时间为 $100 \mu\text{s}$ 。实验中,受测试条件的限制,调制盘最高转速达到 76.6 circle/s,盘外侧线速度达到 24 m/s。图 2 中展示了第 10, 20, ..., 100 帧图像。从成像图片可看出,红外成像清晰呈现了 $100 \mu\text{s}$ 内的调制盘旋转位移情况,成像无拖尾。

图 3 给出了传感器对于不同黑体温度的响应和噪声测试结果。如图 3(a)所示,黑体温度从 323 K

变化到 723 K,输出信号变化 235 lsb (1 lsb = 1.17 mV,以 323 K 时的输出为参考点)。从输出曲线可看出,输出信号随温度的增加呈近似线性增大。这是由于物体红外辐射能量与温度呈 4 次方关系,在采用 $I-V$ 对数转换技术后,传感器呈现出近似线性的温度响应特性。受目前测试系统黑体温度范围的限制,黑体温度最高测试到 723 K。1 lsb 所对应的平均温度变化为 1.7 K。从图 3(b)所示的噪声测试结果可看出,随着黑体温度的升高,均方根(RMS)噪声呈下降趋势。在温度低于 398 K 时,器件噪声较大,初步分析这是由于在较低的黑体温度下,光电流太小,即像素电路反馈环路的工作电流太小,电路工作不稳定所致。当黑体温度高于 398 K, RMS 噪声值趋于稳定,低于 2.1 lsb,可推算出在此温度区

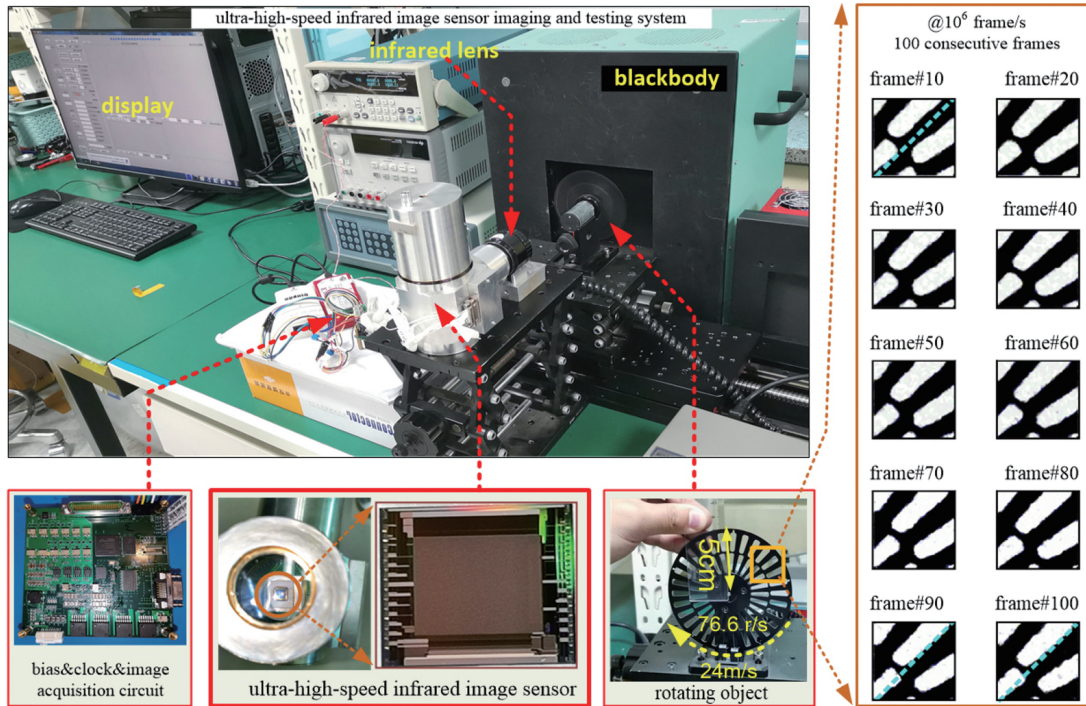


图 2 超高速红外图像传感器测试系统及高速旋转目标成像效果

Fig. 2 Ultra-high-speed infrared imaging system and imaging of high-speed rotating object

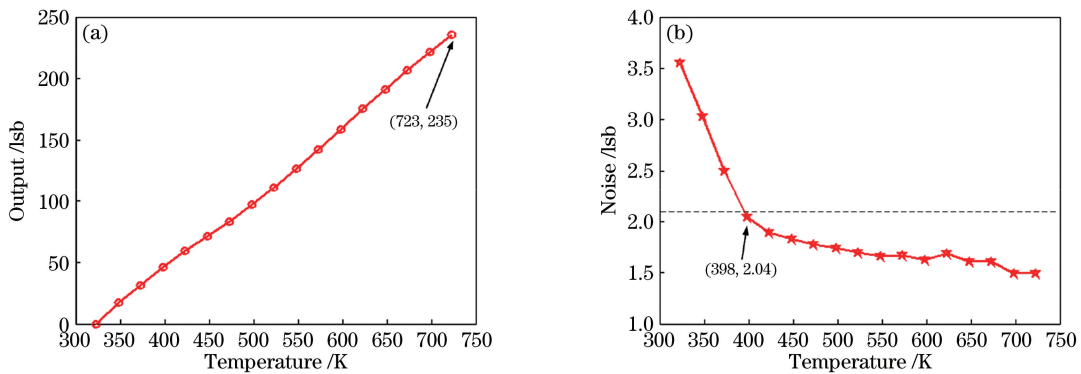


图 3 不同黑体温度下输出信号值和噪声。(a)输出信号值;(b)噪声

Fig. 3 Output signal and noise versus blackbody temperature. (a) Output signal; (b) noise

间,百万帧频速度下传感器可实现优于 3.6 K 的温度分辨率。

对于 burst 模式器件,曝光操作与目标过程的同步尤其困难。本文所述传感器专门设计了延迟调整功能。器件在检测到触发信号上升沿后,使用内部高精度计数器进行计数,实现一段精确时间的延迟,之后进行曝光操作。延迟时间长短可通过串行接口进行在线配置,调整范围为 0~65 ms,调节步长可达到 1 μ s 精度。通过对延迟时间的调节,可以更加方便地进行系统调试,实现曝光和目标过程的准确同步。图 4 为在 2 ms 延迟时间设置下,示波器抓取到的触发信号以及传感器曝光的控制信号波形,图 4 示意出了器件触发、延迟和曝光的工作原

理。另外,传感器还具有连续图像输出模式,可即时输出每帧的成像信息,非常便于光学系统对焦。图 5 所示为连续图像输出模式下电烙铁成像效果(仅简单扣除了背景)。

本文报道了基于单片式读出电路、面阵达到 64×64 规模的百万帧频红外图像传感器,在国内首次完成了百万帧频面阵形红外图像传感器的研制和成像验证,以及器件温度响应特性和噪声性能的测试评估。超高速读出电路是实现百万帧红外图像传感器的关键。本文所讲述的超高速读出电路不仅适用于 InAsSb 材料中波器件,对于 InSb、HgCdTe 材料的中波、长波光伏型器件也同样适用。将传感器面阵扩展到 256×256 规模,最高帧频提高到

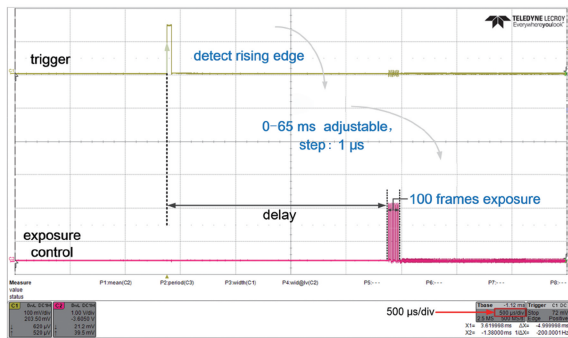


图 4 Burst 模式下的触发、延迟和曝光

Fig. 4 Illustration of trigger, delay, and exposure under burst mode

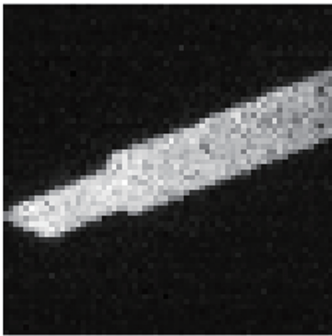


图 5 连续成像模式电烙铁成像

Fig. 5 Image of solder iron in continuous imaging mode
10 MHz 量级, 温度分辨率提升到 1 K 水平是本团队下一步研究工作的重要目标。

参 考 文 献

- [1] Yao X F, Liu W, Wang S. Design principles and photomechanical applications for high-speed array camera systems: a review [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(3): 365-383.
- [2] Potdar Y K, Zehnder A T. Temperature and deformation measurements in transient metal cutting [J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(1): 1-9.
- [3] Guo Y Z, Ruan Q C, Zhu S X, et al. Temperature rise associated with adiabatic shear band: causality clarified [J]. Physical Review Letters, 2019, 122: 015503.
- [4] Zehnder A T, Guduru P R, Rosakis A J, et al. Million frames per second infrared imaging system [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3762-3768.
- [5] Etoh T G, Dao V T S, Nguyen Q A, et al. Fusion: ultra-high-speed and IR image sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9555: 95550N.
- [6] High-speed IR cameras [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-03-29]. <https://www.telops.com/products/high-speed-cameras>.
- [7] Pawelko R, Pina V, Hervé P. Development of a dual infrared and visible near-infrared measurement system for the observation of adiabatic shear bands [J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(12): 124902.
- [8] Chen H S, Guo Y Z, Zhu S X, et al. On the development of multi-point high speed infrared temperature measurement system [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2): 240-248. 陈浩森, 郭亚洲, 朱盛鑫, 等. 多点式高速红外测温系统研制 [J]. 实验力学, 2019, 34(2): 240-248.
- [9] Tsuji K. The micro-world observed by ultra high-speed cameras [M]. Cham: Springer, 2018.