

文章编号: 1672-8785(2020)01-0015-06

晶圆级封装非制冷大面阵红外 探测器应用分析

陶俊伟 王宏臣 董 珊 王丽丽

(烟台艾睿光电科技有限公司, 山东烟台 264006)

摘 要: 红外成像系统已经应用到军事和民用领域多年, 但一直没得到广泛应用, 主要原因是其分辨率低、成本高、工艺不稳定和技术门槛高等。解决这些问题需要从传感器工艺、探测器封装、红外图像处理芯片等方面加以改进。红外技术未来会朝低成本、专用处理芯片、高分辨率等方向发展。目前, 国内厂商陆续推出了晶圆级封装(Wafer-Level Package, WLP)、高分辨率探测器和专用图像处理芯片等方面的新产品。但采用这些新器件的红外成像系统却没有得到相应的研究。本文主要基于烟台艾睿光电科技有限公司新推出的晶圆级封装的 1280×1024 元红外探测器以及专用图像处理芯片的实际应用, 在系统架构、结构散热、成像算法等方面对由新器件构建的红外成像系统进行了验证分析。

关键词: 非制冷红外探测器; 非均匀性校正; 无 TEC 算法

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.01.004

Application Analysis of Wafer-Level Packaged and Large-Format Uncooled Infrared Detector

TAO Jun-wei, WANG Hong-chen, DONG Shan, WANG Li-li

(Yantai IRay Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: Infrared imaging systems have been used in the military and civilian fields for many years, but have not been widely used, mainly due to their low resolution, high cost, unstable process and high technical threshold. Solving these problems requires improvements in sensor technology, detector packaging and infrared image processing chips. Infrared technology will develop in the future in the direction of low cost, dedicated processing chips and high resolution. At present, domestic manufacturers have successively launched new products such as wafer-level packaging, high-resolution detectors and dedicated image processing chips. However, there is no corresponding research on the infrared imaging system of these new devices. This article is mainly based on the practical application of Yantai IRay Technology Co., Ltd.'s new wafer-level packaged 1280×1024 infrared detector and the special image processing chip. The infrared imaging system is verified and analyzed in terms of system architecture, structural cooling and imaging algorithms.

Key words: uncooled infrared detector; non-uniform correction; TEC-less algorithm

收稿日期: 2019-01-09

作者简介: 陶俊伟(1981-), 男, 山东烟台人, 硕士, 主要从事非制冷红外热成像研究。

E-mail: jwtao@iraytek.com

0 引言

红外成像系统已被应用到军事和民用领域多年。其主要应用特点是,面阵规模集中在 640×512 和 384×288 两种,极少数红外探测器高端机型采用 1024×768 面阵规模;探测器的封装以金属为主,以陶瓷为辅,WLP 产品较少;处理器主要采用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)方案,没有标准的图像处理芯片。这些应用特点决定了红外成像系统的特点:价格高、开发难度大和开发周期长。这些特点制约着红外成像系统的大面积推广。

红外成像系统的普及需降低成本和开发难度。晶圆级封装探测器加上专用集成电路(Application-Specific Integrated Circuit, ASIC)芯片,在大幅降低成本的同时也大幅降低了开发难度,因此必然是未来的发展趋势;相关行业已开始这种尝试。美国 FLIR 公司推出的成像模组 Lepton 就是晶圆级封装小面阵探测器加上 ASIC 芯片的初步尝试。从成像效果上看,它可以满足民用低端市场的需求。

随着探测器制造工艺的进步和像元尺寸的缩小,大面阵探测器的应用开始增多。与 640×512 元探测器相比,大面阵探测器更适于观察类应用。同样的焦距下,大面阵探测器覆盖的场景更广阔,观察的细节更丰富。随着制造技术的进步和成本的降低,大面阵探测器的应用方向会越来越多。

目前几乎没有关于晶圆级封装大面阵探测器和专用红外图像处理芯片的应用,也缺少这方面的技术积累。本文主要基于烟台艾睿光电科技有限公司开发的 1280×1024 元晶圆级封装探测器以及专用的图像处理芯片进行大面阵探测器的应用分析,即在系统架构、结构散热、成像算法等方面进行实践验证。

1 系统设计

1.1 探测器

本文采用艾睿光电科技有限公司研发的

WLP 封装、数字输出、 1280×1024 阵列规模的非制冷红外探测器。该探测器的功能框图如图 1 所示。

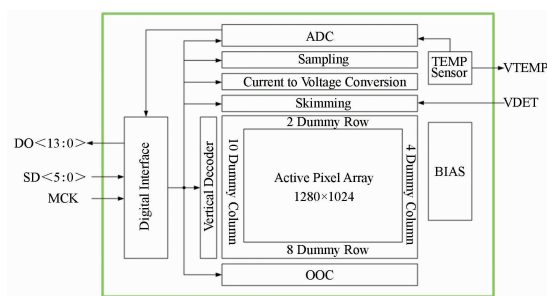


图 1 RTDS121W 框图

RTDS121W 探测器已集成了 14 bit 的模数转换器(Analog Digital Converter, ADC)和非均匀性校正(On-chip Offset Calibration, OOC)功能。对外的数字接口主要有三部分,分别是时钟输入(MCK)、数字输入(SD<5:0>)和数字输出(DO<13:0>)。该探测器的主要特性见表 1。

表 1 RTDS121W 组件产品的技术规格

项目	指标
技术	氧化钒微测辐射热计
响应谱段	8~14 μm
像素中心距	12 μm
阵列规模	1280 \times 1024
可操作率	>99.5%
NETD	<50 mK (@f/1.0, 30 Hz, 300 K)
帧频	30 Hz
功耗	<650 mW (@30 Hz, 300 K)
镜像功能	X 方向、Y 方向镜像
工作温度范围	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~ +85 $^{\circ}\text{C}$
封装形式	WLP 真空封装
封装尺寸	23.82 \times 23.59 \times 1.45 mm ³
封装重量	\leq 1.8 g

1.2 红外图像处理芯片

本系统采用的红外图像处理芯片(Image Signal Processor, ISP)为艾睿光电科技有限公司开发的专门针对红外图像处理的 RS001 型集成电路芯片。该芯片是我们专门为自产红外探测器定制的红外图像处理芯片,可以取代当前应用中的 FPGA 芯片,缩小系统尺寸,降低成

本和功耗。RS001 芯片的主要功能如下:

(1) 内部集成 8051 控制器, 速度高达 120 MHz。

(2) 接口部分包括驱动红外探测器的数字接口和两路并行数字视频输出接口, 外部的控制接口采用集成电路总线(Integrated Circuit, IIC)或者通用异步收发传输器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)。

(3) ISP 的最大处理能力为 $1280 \times 1024 @ 60 \text{ fps}$, 最快主时钟为 100 MHz; 输入数据的精度为 14 bits, 输出为 8 bits、10 bits、14 bits 的灰度图像或者是 YUV422 彩色图。

(4) ISP 的功能包括非均匀性校正、CDC 短坏列纠正、去横竖纹、去盲元、时域滤波、去锅盖、镜像、空域滤波、自动增益补偿(Automatic Gain Control, AGC)、数字图像细节增强(Digital Detail Enhancement, DDE)、GAMMA 调整和缩放等功能。

(5) 最大功耗为 600 mW。

(6) 芯片的封装尺寸仅为 $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 。

1.3 系统设计

成像系统主要由电源转换部分、探测器、ISP、通用串行总线控制器(Universal Serial Bus, USB)和 Camera Link 信号收发器组成。其中, 电源转换部分的主要功能是将输入电源转换为各芯片需求的电压。探测器和 ISP 在前两节已介绍。USB 控制器将上位机通过 USB 发送的命令信号转换为 IIC 信号并将其发送给 ISP, 从而实现 ISP 芯片的配置。Camera Link 信号收发器主要将 ISP 输出的数字图像转换为 Camera Link 标准信号, 以便于上位机进行采集分析。整个系统的原理框图如图 2 所示。

1.4 系统热设计

大面阵红外探测器在实际应用中的难点是功耗高、温度变化快, 图像均匀性容易受到影响。所以最好针对探测器进行专门的散热设计, 使系统温度不太高, 同时使红外焦平面的温度足够稳定。本文对最终成像组件进行了热仿真(结果见图 3)。其中探测器的温度如图 4

所示。从仿真结果看, 整个组件的最高温度为 40°C , 探测器整体的温度均匀性不超过 0.2°C , 基本满足设计要求。

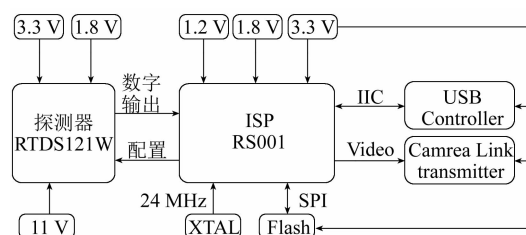


图 2 系统框图

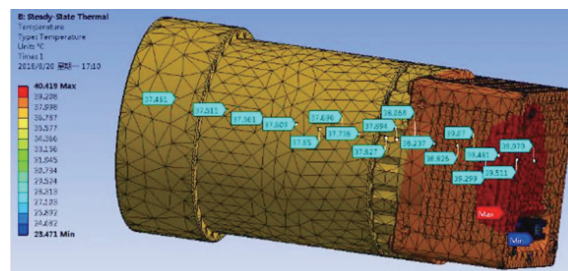


图 3 组件系统的热仿真结果

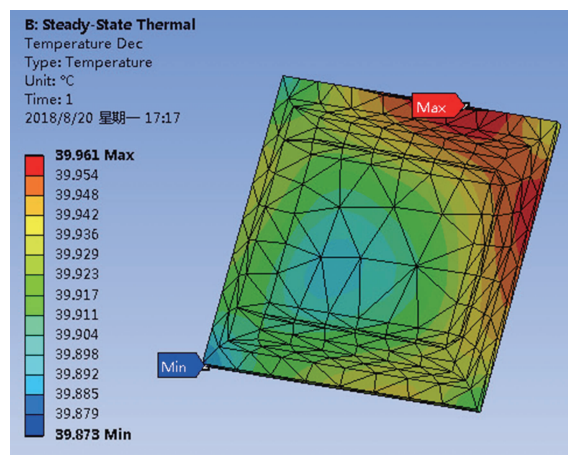


图 4 探测器的热仿真结果

2 非均匀性校正

非均匀性校正是红外成像算法的第一步, 也是关键一环。本文不做深入研究, 只介绍艾睿探测器自带的校正技术(片上非均匀性校正)和业内常用的非均匀性校正方法(两点校正法)。

2.1 片上非均匀性校正

片上非均匀性校正属于粗略的均匀性校正, 主要目的是使红外焦平面上每个像素的输出集中在某个均值附近, 即每个像素的原始输出在合理的动态范围之内。实现方式是在

RTDS121W 探测器芯片上集成 OOC 功能。通常情况下,在没进行 OOC 校正之前,探测器每个像素的输出差异较大。图 5 所示为面对均匀黑体辐射源时探测器的原始输出数据。从图 5 中可以看出,原始输出分布在 2000~14000 之间,探测器的整个动态范围为 0~16383。很多像素的原始输出已经接近动态范围的边缘,因此无法有效利用整个动态范围。这些差异主要是由加工工艺导致的。为了让像素之间的原始输出差异足够小,需要对每个像素配置不同的 OOC 值,以调节输出。通过探测器数字输入引脚配置 OOC 值。图 6 所示为探测器面对均匀黑体辐射源并经片上非均匀性校正后的输出统计数据。由图 6 可以看出,探测器所有像素的输出都集中在 8000~9000 之间。对比图 5 和图 6 可知,经片上非均匀性校正后,整个面阵的均匀性已达到比较高的水平。校正之后的图像数据大多集中在校正目标左右;对于少数无法校正的像元,可将其作为盲元处理。

2.2 两点校正

红外探测器的非均匀性有两种。一是与输入信号无关的偏移量非均匀性,由加工工艺引入。偏移量非均匀性在焦平面温度固定时是不变的,可以认为是直流分量。二是由探测器像素对输入信号响应不均匀造成的增益非均匀性。偏移量非均匀性和增益非均匀性同时存在,二者叠加在一起,对探测器的响应信号产生影响。因此,通过对焦平面阵列各像素的增益非均匀性和偏移量非均匀性进行校正,能有效提高图像的质量^[2-4]。

两点校正的理论推导过程^[2-4]如下:红外焦平面阵列单个像素在均匀黑体辐射下的响应可以表示为

$$x_{ij}(\phi) = u_{ij}(\phi) + v_{ij} \quad (1)$$

式中, ϕ 为辐射通量, u_{ij} 和 v_{ij} 分别为坐标 (i,j) 单元的增益和偏移量。

对于单个像素, u_{ij} 和 v_{ij} 的值都是固定的,不随时间变化。但探测器不同像素的响应不一

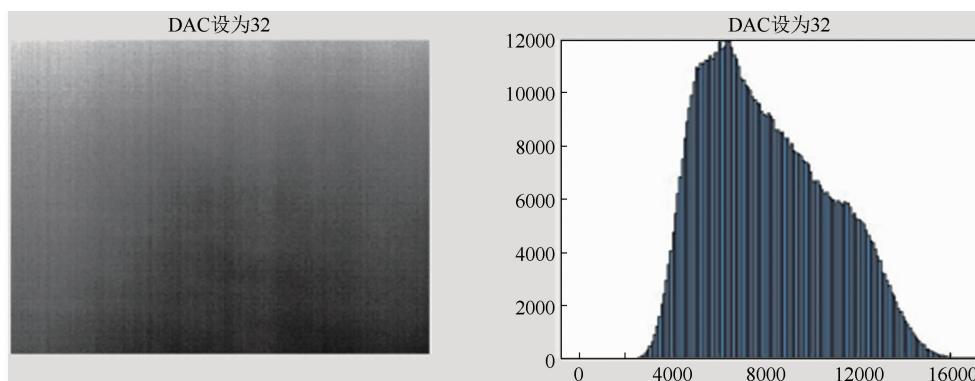


图 5 原始数据

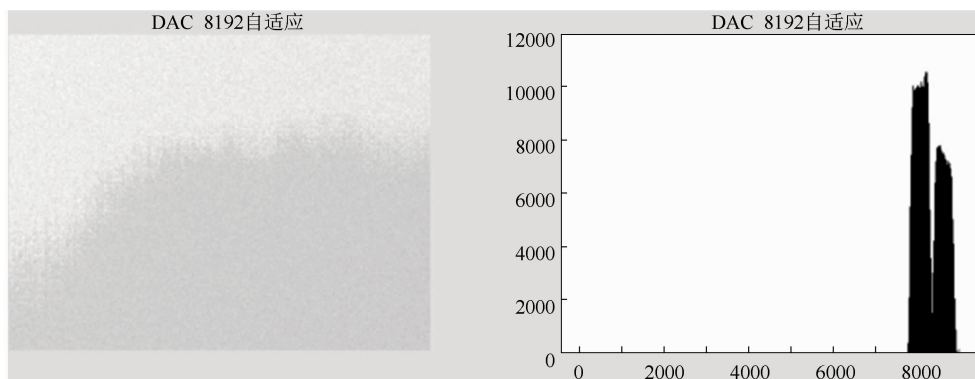


图 6 OOC 校正后的数据

致。所以在同一辐射通量入射时, 各个 x_{ij} 值互有差异。必须对这差异进行校正, 即

$$y_{ij}(\phi) = G_{ij}x_{ij}(\phi) + O_{ij} \quad (2)$$

式中, G_{ij} 和 O_{ij} 分别为增益校正和偏移量校正, y_{ij} 为校正后的输出。

增益校正 G_{ij} 和偏移量校正 O_{ij} 的计算式为

$$G_{ij} = \frac{V_H - V_L}{x_{ij}(\phi_H) - x_{ij}(\phi_L)} \quad (3)$$

$$O_{ij} = \frac{V_H x_{ij}(\phi_L) - V_L x_{ij}(\phi_H)}{x_{ij}(\phi_L) - x_{ij}(\phi_H)} \quad (4)$$

式中, V_L 和 V_H 分别为所有像素单元在低温 T_L 和高温 T_H 下的平均响应。

$$V_L = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}(\phi_L)}{M \times N} \quad (5)$$

$$V_H = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}(\phi_H)}{M \times N} \quad (6)$$

图 7 展示了两点校正之后面对均匀黑体辐射源的图像数据。片上非均匀性校正将探测器的输出集中在 8000~9000 之间。两点校正之后整个数据集中在 8240~8420 之间, 整幅图像的数据更集中, 整个画面的均匀性更好。

3 无 TEC 算法

本次采用的 WLP 封装的探测器没有半导体制冷器 (Thermal Electric Cooler, TEC)。该探测器的功耗较高、发热多, 本身的温度波动大, 尤其是刚开机的一段时间内, 温度变化快, 导致上面的均匀性校正误差变大。这对探测器的应用非常不利。为解决此问题, 有两种方法。第一种是在机芯温度稳定之前较频繁地打快门, 以更新 OOC 校正和两点校正中的偏移量校正。实际应用中, 大概每分钟打一次快

门就能达到较好的效果。另一种方法是应用 TECLESS 算法。其核心思想是, 在工作温度范围内, 在不同温度下获取探测器的原始输出, 然后通过算法拟合探测器的输出随温度变化的漂移, 从而得到拟合系数; 在成像时根据探测器的温度变化, 补偿由温度变化导致的探测器输出变化量, 以减小探测器输出随温度变化的非均匀性。

本文在拟合算法上尝试了 Polynomial 模型, 其公式为

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}, \quad n = 4 \quad (7)$$

图 8 所示为其中一个像素拟合完后的曲线。横坐标 D_{temp} 为焦平面阵列 (Focal Plane Array, FPA) 温度的数字输出值, 纵坐标为探测器像素输出中心化后的值。从拟合结果看, 效果可以接受。

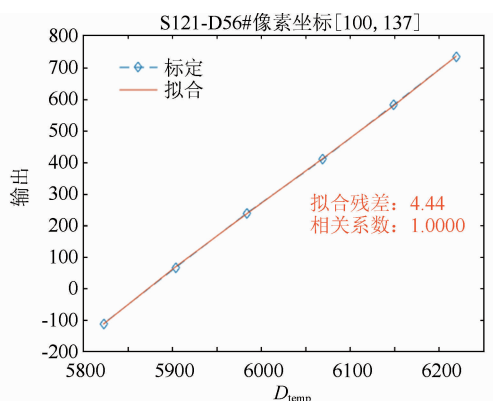


图 8 单个像素的拟合结果

通过无 TEC 算法处理可以缓解由温度变化导致的增益漂移, 但实际应用中则很难完全消除增益漂移。最终的成像效果如图 9 所示。

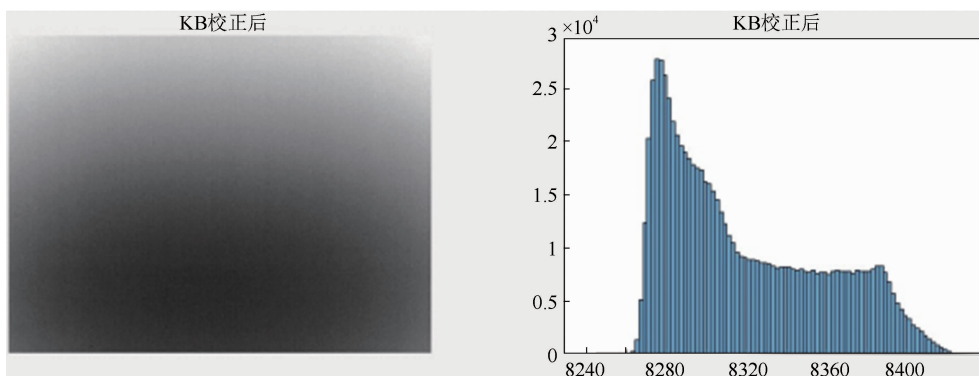


图 7 两点校正后的成像结果

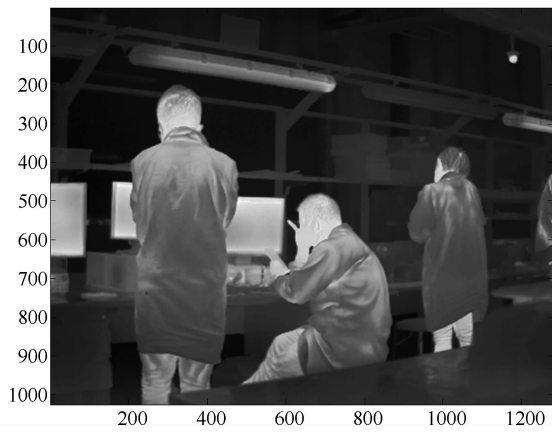


图 9 加上无 TEC 算法的图像

4 结论

从以上应用可以看出，WLP 封装的非制冷大面阵红外探测器初步具备了实际应用特性，且实际成像效果不错。同时也存在一些问题，比如大面阵探测器的发热量大，不利于产

品的小型化。实际成像中虽然加入了无 TEC 算法，但仍不能完全弥补由温度漂移引起的增益漂移。为解决此问题，我们在产品设计之初就需考虑系统散热，或者研究更准确的无 TEC 算法，以弥补漂移。

参考文献

- [1] 刘子骥. 非制冷红外焦平面探测器试及验证成像技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [2] 沈晓燕, 皮德福. 一种红外焦平面非均匀性校正改进方法的研究 [J]. *红外技术*, 2002, **24**(1): 4-7.
- [3] 何小娟. 红外焦平面探测器的非均匀性校正与算法实现 [J]. *红外*, 2001, **32**(6): 1-9.
- [4] 唐遵烈. 焦平面红外图像的非均匀性校正技术 [J]. *光电技术应用*, 2002, **23**(5): 344-346.