

碲镉汞焦平面阵列无效像元(盲元)特征与成因

李建林¹, 谢刚¹, 刘炼², 陈晓燕¹, 董伟¹, 雷永畅¹

(1. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;
2. 空军装备部驻昆明地区军事代表室, 云南昆明 650223)

摘要: 中波或长波红外焦平面阵列有效像元率递减的变化趋势, 必然是由制造工艺缺陷、特定的工作应力或环境应力引起的某种机理造成。根据红外探测器输出信号电压的数学模型, 通过信号传输分析、性能评价测试数据统计分析, 运用统计图形、响应曲线及输出信号电压灰度图等可视化手段, 直观地呈现无效像元的类型、数量、位置、分布, 以及像元信号电压、噪声电压和响应电压等无效像元特性。统计分析显示, 像元中心距 15 μm 的中波 320 \times 256 探测器杜瓦制冷机组件, 在使用过程中平均表观有效像元率相对于初始有效像元率减小 1.07 个百分点, 平均有 86.45% 的表观无效像元为不稳定的闪元和漂移像元, 设计和制造缺陷导致使用无效像元的响应直线呈水平状、响应电压趋于 0, 热适配引起的应力是造成线状分布使用无效像元簇的原因。提出用不同黑体温度条件下像元信号电压超出平均值 $\pm(6\%\sim 7.5\%)$ 的判别准则筛选识别无效像元的方法。

关键词: 故障物理; 失效分析; 红外焦平面阵列; 盲元; 可靠性

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200202

Characteristics and causes of non-effective pixels of HgCdTe FPA

Li Jianlin¹, Xie Gang¹, Liu Lian², Chen Xiaoyan¹, Dong Wei¹, Lei Yongchang¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
2. Military Representation Office of Equipment Department of China PLA Air Force in Kunming Area, Kunming 650223, China)

Abstract: The reduced trend of operable pixel factor of medium wave or long wave infrared focal plane array must be resulted from some failure mechanism caused by manufacturing process defects, specific working stress or environmental stress. Mathematical model based on the output signal voltage of infrared detector, through the analysis of signal transmission and the statistical analysis of performance evaluation test data, visualization means such as statistical graphs, response curves and output signal voltage grayscale were used to visually express non-effective pixel characteristics, such as the types, number, locations, distribution, and output signal voltage, noise voltage, response voltage. Statistical analysis shows that the average apparent operable pixel factor is reduced by 1.07 percentage points relative to the initial operable pixel factor during use of the medium wave 320 \times 250 detector Dewar cooler assembly of pixel pitch 15 μm , 86.45% of apparent non-effective pixels are unstable flickering pixels and drifting pixels on average. Design and manufacturing defects cause the response line of non-effective pixels to be horizontal, and the response voltage tends to 0. The thermal adaptation stress is the reason for non-effective pixel clusters of linear. A method was proposed to screen and identify non-effective pixels based on the criterion that the pixel signal voltage exceeded the average value of $\pm(6\%\sim 7.5\%)$ under different blackbody temperatures.

Key words: physics of failure; failure analysis; IRFPA; blind pixel; reliability

0 引言

中波或长波红外焦平面阵列长期存在噪声大、无效像元(盲元)多及响应率不均匀性等问题,严重影响热成像系统的成像质量,降低了系统的空间分辨率、温度分辨率、探测距离和辐射量度量的精确度,制约着系统的最终性能,以及信息收集和作战空间感知的应用。红外成像系统高清化、数字化和智能化的发展方向,推动红外焦平面阵列像元中心距从 $50\ \mu\text{m}$ 不断缩小,2000 年前主要介于 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ 。近年来, $12\ \mu\text{m}$ 中心距已成为中波和长波红外器件的标准,还出现了 10 、 8 、 $5\ \mu\text{m}$ 中心距的碲镉汞焦平面阵列,尺寸、重量和功耗 (Swap³) 的减小已成为研究热点^[1-3]。先进红外焦平面阵列规模做到 2048×2048 、 4096×4096 ,芯片尺寸增大,像元尺寸减小,无效像元出现的几率增大,对材料工艺和器件工艺提出了更高要求。

红外焦平面阵列的像元总数扣除无效像元后,称为有效像元 (operable pixel) 数。有效像元数占像元总数的百分比,称为有效像元率,一般要求 96% 以上。2000 年前,在 Si 衬底上液相外延 HgCdTe 的缺陷密度降低到 $500\ \text{cm}^{-2}$,已制造出盲元率 2% 的中波红外焦平面阵列,用 CdZnTe 作衬底的中波阵列一般具有小于 1% 的盲元率,发达工业国家的红外焦平面阵列制造工艺已经可以达到盲元率小于 0.5%。近年来,美国 DRS 公司像元中心距 $5\ \mu\text{m}$ 中波或长波 1280×720 的噪声缺陷盲元率分别为 0.05%、0.4%,法国 Sofradir 公司像元中心距 $10\ \mu\text{m}$ 中波 1280×720 的盲元率为 0.5%,德国 AIM 公司中心距 $12\ \mu\text{m}$ 中波 1280×720 的盲元率为 0.08%^[2]。国内, InAs/GaSb 中/短波双色 320×256 焦平面阵列中/短波的盲元率分别为 1.54%、1.94%, InGaAs 短波 256×1 焦平面阵列的盲元率为 3%, HgCdTe 中波或长波 320×256 焦平面阵列的盲元率分别小于 0.3%、0.5%。

无效像元可以区分为出厂时既有的由制造工艺缺陷产生的初始无效像元,以及在寿命周期使用过程中潜在制造缺陷被激发产生的使用无效像元。初始无效像元或使用无效像元必然是由制造的工艺缺陷、特定的工作应力或环境应力引起的某种机理造成。无效像元具有固定位置、随机位置的统计特性,它的分布呈现孤立的单个像元、两个或多个成簇像元,形成点、线、面的无效像元集。无效像元簇呈现稀疏分

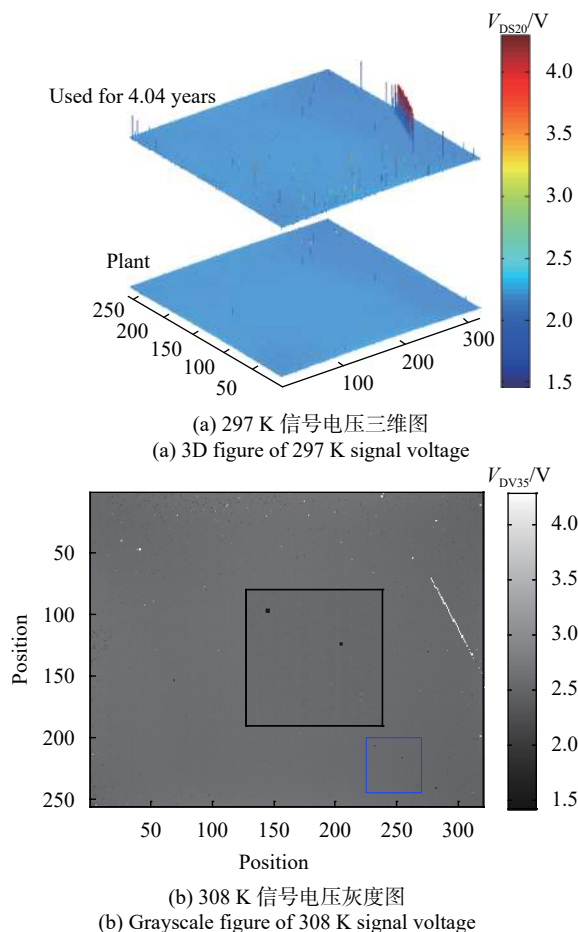
布,而且不断变化。响应特性恒定为过响应或欠响应的无效像元分布在焦平面阵列的固定位置。有些随机位置无效像元是由通道故障或外界因素(环境温度、工作状态)引起,随机出现过响应、欠响应和正常响应,在时间和空间上存在不确定性。

导致无效像元故障的原因十分复杂,涉及众多设计和制造过程。虽然可以通过分析热图像或性能评价测试灰度图确定无效像元的类型、数量、位置、分布,以及像元信号电压、噪声电压、响应电压等无效像元特性,从材料、器件和结构角度分析无效像元产生的原因,确定其故障机理、造成无效像元的应力及其制造缺陷。但是要获得完整的分析结果,细化追溯到各个工艺步骤并不十分容易。因为,有些无效像元故障是设计、制造和使用的原因综合作用的结果。对碲镉汞焦平面阵列从物理、化学等微观结构研究无效像元故障机理,分析工作条件、环境应力和使用时间对性能退化或使用无效像元故障的影响,能够为红外焦平面阵列可靠性设计、制造、使用的改进和工艺优化提供依据。

1 无效像元故障

闪元、死像元和过热像元等无效像元以离散或簇的形式随机分布在焦平面阵列上,产生的空间噪声干扰主要呈尖峰状,在输出热图像中表现为亮点或暗点,随长时间使用和工作温度的变化其数量会增加,如图 1 所示。当无效像元分布在焦平面阵列中心、数量较大或者空间连续分布时,这种噪声对成像系统性能影响较大,尤其对点或斑状目标的识别、跟踪干扰严重,通常不允许出现连续分布和中心分布的无效像元。对于观察型系统,这种干扰比时域噪声、轻度非均匀性导致的空间噪声更加令人讨厌^[4];而对于目标检测跟踪系统,则会影响系统对点或斑状目标的检测跟踪性能^[5]。

例如,某一热像仪出厂检测 MRTD 为 0.2 K,使用 9 个月后 MRTD 的检测值为 0.9 K。热成像系统的最小可分辨温差 (MRTD) 递增退化到某一门限值,即包括人眼特性在内的系统空间分辨率和热灵敏度的噪声限阈值,使得热图像不能满足规定探测、识别和认清用途使用需求。这是因为使用过程中焦平面阵列像元的光电转换性能不稳定,电学特性参数、物理



(a) 297 K 信号电压三维图
(a) 3D figure of 297 K signal voltage

(b) 308 K 信号电压灰度图
(b) Grayscale figure of 308 K signal voltage

图 1 像元信号电压灰度和三维图

Fig.1 Grayscale and 3D figure of pixel signal voltage

参数达不到设计与用户规定指标参数的要求,发生性能退化失效,在热图像上表现为新产生的亮点或暗点及其过亮点或过暗点。像元性能不稳定性导致的空域噪声会影响热成像系统的最小可分辨温差和作用距离。因此,热图像受制造工艺技术水平决定的盲元率、响应率不均匀性和非线性度等像元性能参数,以及使用性能参数稳定性和工作条件稳定性影响,红外成像的实际空间分辨率和温度分辨率不高,普遍存在噪声大、图像对比度低和灰度范围窄的现象^[6]。

无效像元 (non-effective pixel) 包括像元响应率不在规定阈值内的死像元 (Dead pixel) 和像元噪声电压超过规定阈值的过热像元 (Over hot pixel), 及像元噪声等效温差大于规定阈值的像元。死像元信号电压不随辐照能量的变化而变化,在热图像中表现为过暗点或过亮点;过热像元信号电压随时间的变化而变化,在热图像中表现为闪烁点。无效像元区分为响应率过小的弱像元 (Weak pixel) 和表现为时域噪声的闪

元 (Flickering pixel) 与漂移像元 (Drifting pixel) 三种类型^[7-8]。有人把使用过程中一直表现为无效像元的像元称为过热像元 (Hot pixels), 将随机表现为无效像元的像元称为闪元 (Flickering pixels)。闪元的信号电压波动较大,有一定的信息获取能力,会随使用时间逐渐增多,与 $1/f$ 噪声有关;闪元在多帧平均值中与正常像元难以区分,但是标准差值会持续偏大^[9]。闪元的存在率是面积和缺陷密度的函数^[10]。

不同应用系统定义无效像元的阈值不尽相同。GB/T 17444—2013《红外焦平面阵列参数测试方法》用固定阈值分类无效像元,规定响应率小于平均值 1/2 的为死像元、噪声电压大于平均值 2 倍的为过热像元,没有考虑响应特征的分布特点和红外成像的实际要求,辨识无效像元过于宽松容易出现漏判。法国 Sofradir 公司将噪声等效温差大于平均值 2 倍、响应率超出平均值 $\pm 30\%$ 、漏电流超出平均值 30% 的像元定义为无效像元;德国 AIM 公司规定噪声等效温差大于平均值 2 倍、响应率小于平均值 50% 或者大于 1 倍、噪声电压大于平均值 5 倍的像元为无效像元^[11];也有规定响应率超出中值 $\pm 20\%$ 、噪声电压超出中值 $\pm 50\%$ 、直流输出超出中值 $\pm 30\%$ 的像元为无效像元^[12]。在天文观测应用中规定输出信号偏离平均值 10% 的像元为无效像元。

2 探测器物理结构与工艺

碲镉汞焦平面探测器杜瓦组件的物理结构如图 2 所示。图 2(a) 为台面型的光伏探测器单像元结构示意图,图 2(b) 为封装结构电气互连示意图。碲镉汞焦平面阵列与硅读出集成电路通过钢栅阵列倒装互连,用粘接剂连接到陶瓷基板形成探测器芯片。探测器芯片用粘接剂连接到制冷机的冷头上。由于这几种材料热膨胀系数的差异,探测器芯片高低温度循环热适配引起的应力会造成碲镉汞材料的损伤或钢栅阵列失效,国内外主要制造商都在研究解决这个问题的办法。

碲镉汞焦平面阵列像元 p-n 结信号电流的路径有纵向、横向流动,流动过程呈现电流的发散、汇集效应,构成了完整的三维流动路径,它的机理模型是三维模型。依据碲镉汞材料的特性、半导体材料载流子涨落的统计规律和 p-n 结的光电转换性质,由矢量微

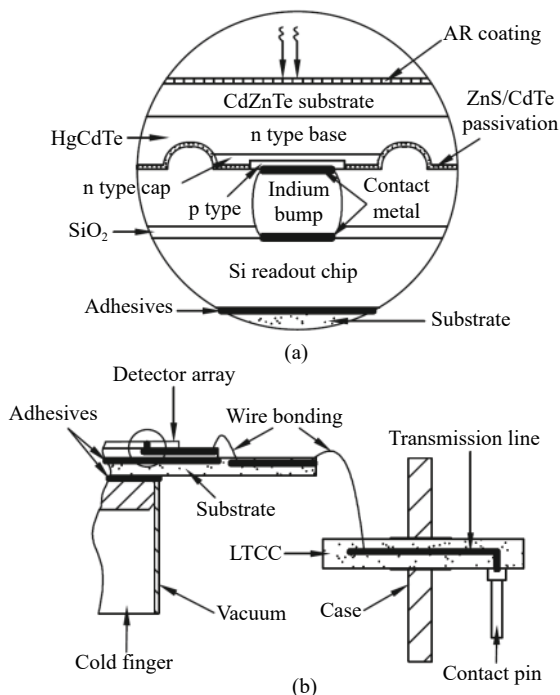


图 2 探测器阵列和杜瓦瓶的典型封装结构

Fig.2 Typical package architecture of detector array and Dewar flask

分方程数学模型求得 p-n 结的整体载流子运输过程的各个有关物理量包括: 碲镉汞材料中激活的施主杂质浓度分布函数 $N_D(x,y,z,T)$ 和受主杂质浓度分布函数 $N_A(x,y,z,T)$, 以及 p-n 结运输过程中空穴浓度分布函数 $p(x,y,z,T)$ 、电子浓度分布函数 $n(x,y,z,T)$ 、电子迁移率分布函数 $\mu_n(x,y,z,T)$ 、空穴迁移率分布函数 $\mu_p(x,y,z,T)$ 、电子扩散系数分布函数 $D_n(x,y,z,T)$ 、空穴扩散系数分布函数 $D_p(x,y,z,T)$ 。正是这些内部载流子的运输机理与物理性质决定了 p-n 结的性能, 工作在准静态的 p-n 结性能参数只是焦平面阵列空间坐标和焦平面阵列工作温度的函数, 不随时间变化^[13]。现有制造工艺技术水平并不能生产出理想的碲镉汞焦平面阵列, 接收均匀辐照输出幅度完全一样的信号电压。因此, 它的性能参数取决于碲镉汞材料、器件制造工艺。

像元量子效率和暗电流的变化都会引起像元响应率改变, 像元的响应特性并非稳定不变, 而是随着使用过程发生一定的变化^[14]。决定量子效率和暗电流大小的因素很多, 包括材料和器件工艺、工作温度等。制造工艺的影响有碲镉汞材料及掺杂的均匀性、载流子浓度、结深以及组份 x 等因素, 表现为信号乘性和加性的变化, 在图像上的表现模式是固定的; 影

响量子效率的因素包括 p 区厚度、工作温度以及碲镉汞组分比 x 、晶体缺陷, 这些因素空间分布的梯度导致了量子效率的不均匀性; 由光刻工艺决定的像元 p-n 结光敏面积差异, 不但影响像元的增益, 而且还影响暗电流的大小, 它表现为固定的乘性和加性噪声; 偏置电压和工作温度的大小、一致性及稳定性影响暗电流、增益的大小, 工作状态对焦平面阵列像元输出电参数的大小、一致性和稳定性具有重要的影响, 其表现形式为乘性和加性噪声; 量子效率的波长相关性所引起的不均匀性差异称为光谱空间噪声, 整体上仍然属于非线性响应导致的不均匀性^[15]。

暗电流与偏压、温度和截止波长有关。碲镉汞像元的噪声、响应率、量子效率等性能参数与暗电流直接相关。暗电流极易受到材料生长和器件工艺的影响, 碲镉汞光伏焦平面阵列性能的优质因子 R_0A 主要由暗电流决定。暗电流主要包括扩散电流、产生-复合电流、直接隧穿电流、陷阱辅助隧穿电流和表面漏电流^[16], 四个主要组成都与焦平面阵列的工作环境有关, 扩散电流和产生复合电流是热电流机制, 与温度的倒数呈指数变化, 随着温度的降低电流下降显著^[17]。温度对暗电流信号和背景辐射随机涨落噪声的影响起主要决定作用, 抑制暗电流噪声有效的措施是保持焦平面阵列像元在稳定的低温环境中。暗电流涉及众多因素, 它是碲镉汞焦平面阵列像元光电性能的综合反映, 来自于扩散区、耗尽区和表面, 能追溯到制造过程中的各个相关工艺步骤。

碲镉汞焦平面阵列制造工艺复杂, 要经历 300 多道工序, 每一个工序都有核心的技术诀窍, 都有可能残留影响性能参数和产生无效像元的缺陷, CdZnTe 与 HgCdTe 材料生长工艺和光刻、刻蚀、钝化等光伏器件工艺, 以及互连、减薄、组装等封装工艺过程容易产生无效像元。例如, 倒装互连工艺产生接触电阻大的缺陷, 引起像元信号电流减小, 读出电路的输入级单元电路的输入电阻会增大、注入管的跨导会减小, 导致注入效率下降、像元响应率小于正常值, 而像元信号电压大于正常值。由于 p-n 结损坏或钝化膜等因素造成像元信号电流增大、引起动态电阻减小, 导致注入效率下降、响应率减小, 而像元信号电压小于正常值。无论输出信号电压大于或小于正常值, 该像元的注入效率减小、响应率小于正常值^[18]。

3 无效像元的特征

3.1 探测器响应数学模型

碲镉汞焦平面阵列光电转换的信号电流通过栅阵列传输到读出集成电路进行预处理,单像元 p-n 结耦合匹配的读出电路结构有多种形式,常用的直接注入 (DI) 和电容反馈跨阻抗放大器 (CTIA) 具有结构简单、偏置稳定、注入效率高、低噪声等特点。虽然这些电路结构形式不同,一般都是运用光生信号电流 (包括暗电流) 在电容上积分实现电流电压的转换,因此输出信号电压的数学模型为^[19]:

$$V_{out} = G \frac{[I_{dark}(V, \lambda, T) - i_g(\lambda)] T_{int}}{C_{int}} + G V_{ref} + V_N + V_Z \quad (1)$$

式中: $i_g(\lambda)$ 为像元接收红外辐射光子经过光电效应转换产生的光电流; $I_{dark}(V, \lambda, T)$ 为材料、器件工艺决定的暗电流; V 、 T 为像元 p-n 结的偏置电压和工作温度; λ 为接收辐射的波长; G 为源跟随器、列缓冲器和输出缓冲器增益 G_1 、 G_2 、 G_3 的乘积; C_{int} 为积分电容; T_{int} 为积分时间; V_{ref} 为运算放大器正向输入端的参考电压; V_N 为像元的输出噪声; V_Z 为封装信号传输阻抗产生的压降。

像元信号电压随积分时间变化的斜率跟像元的有效量子效率、吸收系数、光敏面积、暗电流、积分电容及电路增益有关。由公式 (1) 可知,对于正向输出白热的红外焦平面阵列组件。当异常像元与正常像元电流差小于 0 时,输出信号电压小于正常值,像元电流增大;当异常像元与正常像元电流差大于 0,输出信号电压大于正常值,像元电流减小。

用接收黑体温度 293 K、308 K 条件下辐照功率的输出信号电压作像元响应直线如图 3 所示。理想

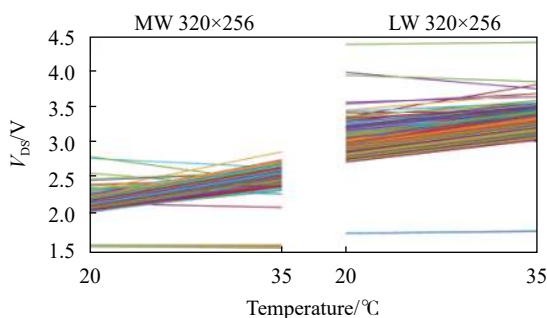


图 3 碲镉汞焦平面阵列响应曲线

Fig.3 Response curve of HgCdTe FPA

的碲镉汞焦平面阵列,接收均匀辐照输出幅度完全一样的信号电压,它的响应曲线重叠为一条曲线。那些偏离理想曲线的异常曲线,它们的斜率、截距不同于正常值。有 10 种类型的异常响应曲线:斜率大于零、小于或大于正常值,斜率等于零、截距小于或大于正常值,斜率小于零、截距小于或大于零,斜率趋于或等于正常值、截距小于或大于正常值。

3.2 无效像元输出信号特性

中波或长波 320×256 探测器杜瓦制冷机组件性能评价测试数据可视化如图 4、图 5 所示。按超出信号电压±7.5% (A、B)、响应电压±30% (C、C')、噪声电压±2×(D、D')、NETD±2×(E) 平均值甄别无效像元。如图 4(a) 所示,无效像元的输出信号电压具有如下特性:

- (1) 信号电压大于正常值的无效像元,它的噪声电压大于正常值;
- (2) 信号电压小于正常值的无效像元,它的噪声电压小于正常值;
- (3) 只有响应率超出规定阈值的无效像元,绝大多数的信号电压大于正常值;
- (4) 信号电压大于正常值,绝大多数是仅有响应率超出规定阈值的无效像元,这类像元在热图像中表现为过亮点;
- (5) 信号电压小于正常值,绝大多数是噪声电压和响应率都超出规定阈值的无效像元,反之不一定成立,这类像元在热图像中表现为过暗点。

运用箱线图直观地识别出性能评价数据中的正常值和异常值,离群值用红色“+”标记,如图 4(b) 所示。像元信号电压、响应电压的正常值集中在上边缘一侧,分布呈现左偏态;响应电压异常值集中在下边缘一侧。像元噪声电压、NETD 正常值集中在下边缘一侧,分布呈现右偏态;像元噪声电压、NETD 异常值集中在上边缘一侧。在虚线之外明显小于或大于正常值的极端异常值,以及异常小值或异常大值都是无效像元。无效像元的像元信号电压、噪声电压明显小于或大于正常值,响应电压、NETD 小于或等于 0 的像元都是无效像元,响应电压、NETD 明显大于正常值的像元也是无效像元。图 4(a)、图 4(c) 直观地可视化了无效像元剔除的效果,其中 C'、D'、E' 是响应电压超出±30% 平均值、噪声电压大于 2×平均值、NETD 大于 2×平均值甄别的无效像元。由此可见,任何单

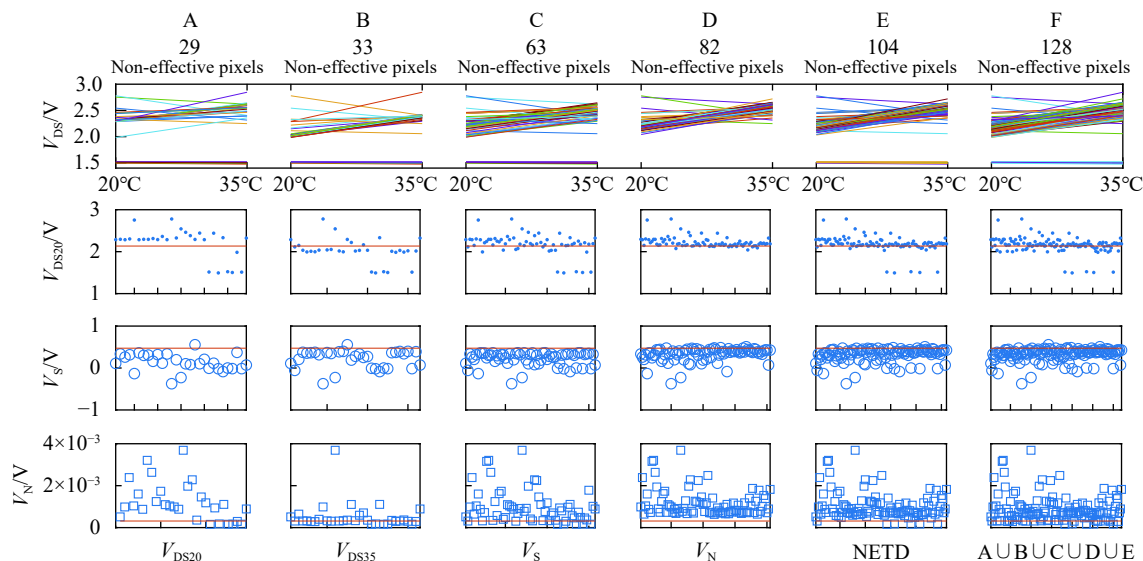
一判断筛选标准都不能有效地甄别出全部无效像元。

图 5 是 297 K 黑体温度下的像元信号电压 V_{DS20} 、响应电压 V_s 、噪声电压 V_N 和 NETD 绘制的四维散点图,有助于直观了解它们之间的相依关系,分析有效像元或无效像元的性能参数及分布特性。

在人眼的视网膜中,视细胞的响应存在 $\pm 10\%$ 的差异,人眼的阈值对比度(临界对比度) $2\% \sim 5\%$ [20]。因此,超出 $\pm(6\% \sim 7.5\%)$ 正常值输出的像元很容易被人

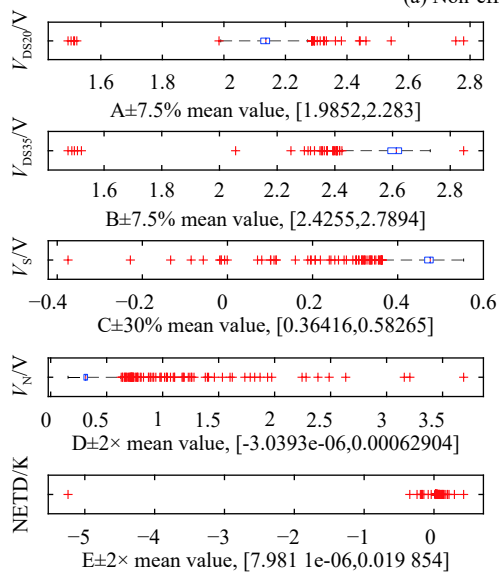
眼识别区分出亮或暗。过亮点有响应、输出远大于正常值,过暗点没有响应、输出远小于正常值。亮点或暗点有响应、输出随入辐射的变化而变化,相较于正常像元有明显差异,表现为响应太大或太小,它们的输出明显大于或小于正常像元。

测量不同黑体温度条件下的输出信号电压,黑体温度推荐从 $-45\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $+55\text{ }^\circ\text{C}$ 变化,间隔不同温度测量点不少于 5 点,用超出 $\pm(6\% \sim 7.5\%)$ 平均值剔除无效像元最直接有效,仅 297 K、302 K 两个温度点信号电压

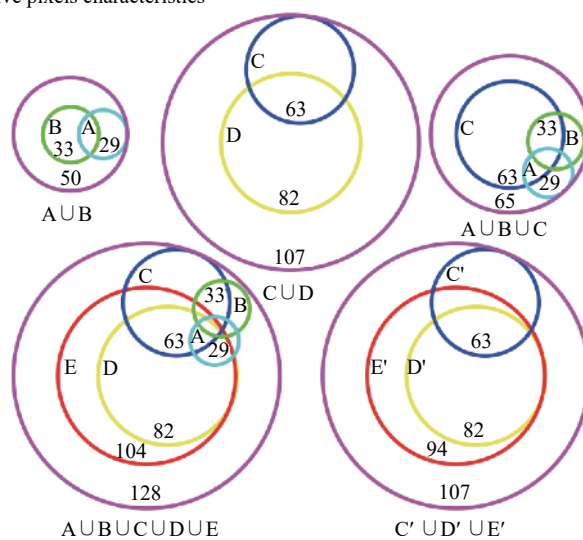


(a) 无效像元特性

(a) Non-effective pixels characteristics



(b) 箱线图
(b) Boxplot



(c) 用不同标准甄别出无效像元数的并集、交集示意图
(c) Union and intersection graphics of non-effective pixels using different criteria to identify

图 4 出厂性能评价测试数据统计分析

Fig.4 Statistical analysis of production performance evaluation test data

剔除的无效像元就接近响应电压超出 $\pm 30\%$ 平均值的剔除效果。性能评价测试数据用 AUBUCUDUE=F 标准处理, 甄别剔除的无效像元数大于常规 C'UD'

UE'=F'方法。无效像元最有效的单一判断标准是 NETD 超出 $\pm 2 \times$ 平均值 (或大于 $2 \times$ 平均值 (E'), < 0)。

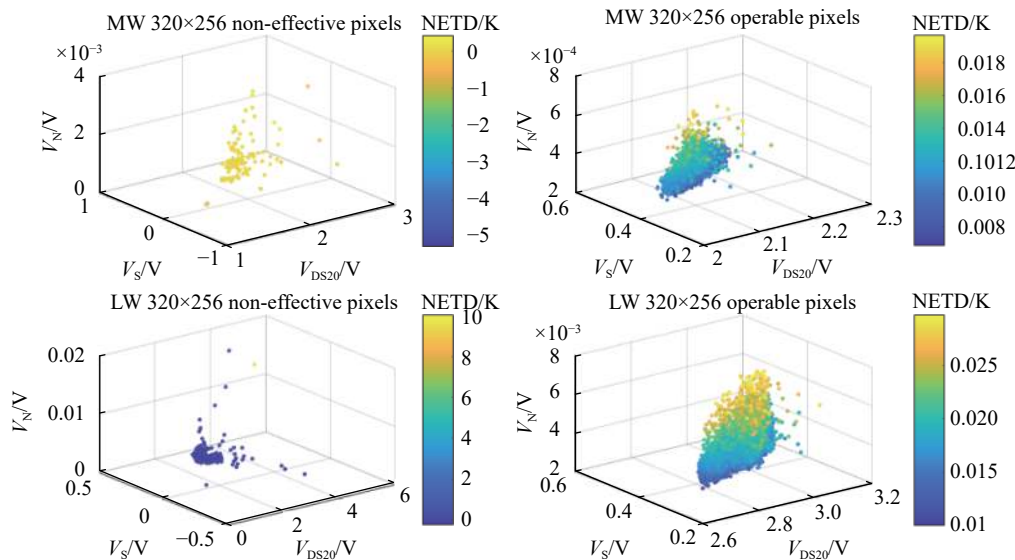


图 5 出厂性能评价测试数据四维散点图

Fig.5 Four dimensional scatter of production performance evaluation test data

3.3 典型无效像元

典型无效像元如图 6。蓝色响应直线的像元是初始无效像元与使用无效像元重叠的无效像元。实线像元的信号电压和噪声电压小、响应电压为 0, 热图中恒定显示为过暗点 (图 1(b)); 虚线恒定过热像元初始为信号电压和噪声电压大、响应电压大的亮点, 使用退化为信号电压大、噪声电压小、响应电压为 0 的过亮点)。绿色响应直线的像元是热应力导致位错引起的新增使用无效像元, 像元信号电压大、噪声电压小, 响应电压为 0 (图 1(b))。红色响应直线的像元是热应力导致位错引起的新增使用无效像元, 响应直线呈水平状的像元信号电压大、噪声电压小, 响应电压为 0, p-n 结短路损坏, 而另两个像元的信号电压大、噪声电压大, 响应电压不为 0; 青色响应直线的像元是新增使用无效像元, 像元信号电压大、噪声电压小, 响应电压为 0。品红虚线的像元是初始无效像元, 它的钢栅阵列没有连通, 像元信号电压、噪声电压小, 响应电压为 0; 品红实线的像元是使用无效像元, 它的钢栅阵列没有连通, 像元信号电压、噪声电压小, 响应电压为 0; 黑色响应直线的像元是热应力导致位错引

起的初始无效像元, 过热无效像元的信号电压大、噪声电压小, 响应电压大。

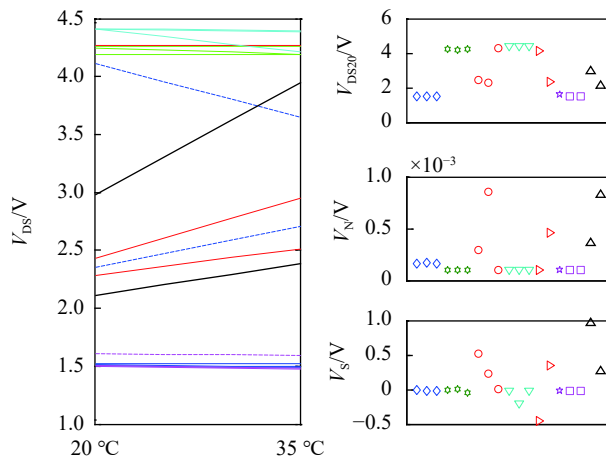


图 6 典型无效像元输出特性

Fig.6 Typical output characteristics of non-effectives pixel

3.4 不稳定无效像元

由 15 只中波 320x256 探测器杜瓦制冷机组件 293 K、308 K 输出信号电压绘制的无效像元响应直线, 如图 7 所示。第 1、2 行为出厂时检测得到的无效像元, 第 3、4 行为返厂时检测得到的无效像元。其

中,第 2、4 行是出厂时与返厂时检测得到的无效像元的交集,即恒定不变的初始无效像元。

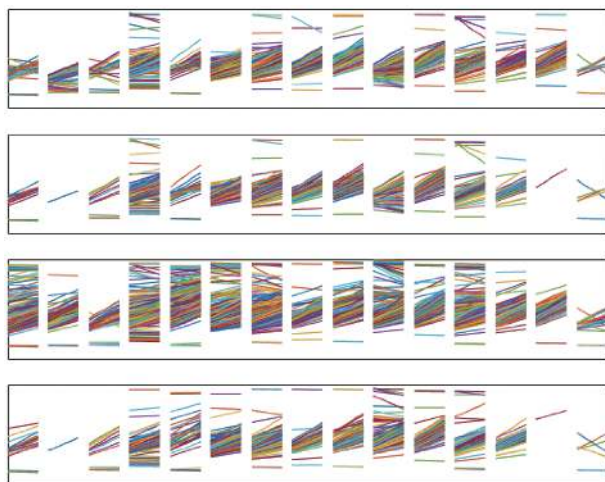


图 7 初始、使用无效像元及其交集可视化响应直线

Fig.7 Visual response line of initial non-effective pixels and using non-effective pixels and their intersection

表 1 给出 15 只组件出厂 (F1)、返厂 (F2) 由 AU BUCUDUE 标准确认的无效像元实测数据。在使用过程中,平均有 57% 的初始无效像元转变为有效像元,这部分新的有效像元在热像仪从新校正前,仍然表现为暗点或亮点;返厂时,平均有 72% 的无效像元是新增使用无效像元。所以,在热像仪从新校正前,使用过程中的表观无效像元,包括转变为有效像元的初始无效像元、恒定不变的初始无效像元和新增的使

用无效像元,平均有 86.45% 的表观无效像元属于不稳定的闪元和漂移像元。平均表观有效像元率相对于初始有效像元率减小 1.07 个百分点为 98.41%。初始过热像元平均占无效像元的比例为 65%,使用过热像元平均占无效像元的比例为 44%。过热像元占比减小,显示存在系统性缺陷,使得像元的响应直线呈水平状。因为,经历开关机高低温度循环,以及振动、冲击和过饱和辐照等环境应力作用,导致潜在制造缺陷被激发,引起无效像元的类型、分布偏离初始状态。

由图 7、表 1 可知,过热像元在无效像元里的比例较大,而且大多数过热像元与有效像元响应直线的斜率相差不多,信号电压随时间的变化而变化,在热图像中表现为闪烁或跳变点。使用后有 7 只组件响应直线的斜率趋近于 0、等于 0 和小于 0,且输出信号电压(响应直线截距)明显大于或小于正常值的过热像元或死像元增多。15 只组件平均能用时间 2.24 年,过热像元的数量以平均每年 289 个的速率递增,死像元的数量以平均每年 223 个的速率递增,无效像元的数量以平均每年 525 个的速率递增。作为比较,国外太空望远镜,使用 4.5 年长波 HgCdTe 焦平面阵列中过热像元的数量以每年 60 个的速率递增,使用 1.5 年中波 HgCdTe 焦平面阵列出现大量暗电流偏大的像元,暗电流从原来的小于 $0.01 \text{ e}^- \text{ s}^{-1}$ 增大为 $0.1 \text{ e}^- \text{ s}^{-1} \sim 60 \text{ e}^- \text{ s}^{-1}$ [19]。

表 1 AU BUCUDUE 标准确认的出厂、返厂检测无效像元数

Tab.1 Number of non-effective pixels of test results in the factory and returned factory confirmed by AU BUCUDUE standards

| | S201 | S418 | S510 | S528 | S535 | S099 | S224 | S291 | S403 | S406 | S501 | S520 | S522 | S701 | S015 | Mean |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F1 non-effective pixels | 128 | 109 | 34 | 465 | 98 | 974 | 399 | 105 | 207 | 340 | 100 | 245 | 277 | 112 | 13 | 240 |
| D/F1 over hot pixels ratio/% | 64 | 70 | 68 | 50 | 23 | 72 | 75 | 68 | 85 | 48 | 73 | 74 | 67 | 63 | 38 | 65 |
| (F1-F1∩F2)/F1/% | 78.13 | 99.08 | 61.76 | 53.55 | 61.22 | 83.26 | 53.88 | 30.48 | 43.96 | 54.71 | 32.00 | 58.37 | 65.34 | 32.14 | 53.85 | 57.45 |
| F2 non-effective pixels | 768 | 541 | 207 | 3 173 | 2 652 | 1 634 | 1 472 | 165 | 618 | 1 527 | 157 | 1 412 | 1 317 | 157 | 26 | 1 055 |
| D/F2 over hot pixels ratio/% | 63 | 33 | 11 | 28 | 58 | 43 | 38 | 43 | 60 | 36 | 79 | 47 | 33 | 75 | 12 | 44 |
| (F2-F1∩F2)/F1∪F2/% | 85.25 | 83.20 | 85.09 | 86.41 | 96.39 | 60.16 | 76.35 | 46.70 | 70.80 | 80.15 | 47.09 | 84.24 | 81.51 | 41.97 | 60.61 | 72.40 |
| (F1∩F2) | 28 | 1 | 13 | 216 | 38 | 163 | 184 | 73 | 116 | 154 | 68 | 102 | 96 | 76 | 6 | 89 |
| $\frac{F1+F2-2(F1\cap F2)}{F1\cup F2}/\%$ | 96.77 | 99.85 | 94.30 | 93.69 | 98.60 | 93.33 | 89.09 | 62.94 | 83.64 | 91.01 | 64.02 | 93.44 | 93.59 | 60.62 | 81.82 | 86.45 |
| Up time/y | 4.04 | 3.66 | 2.59 | 1.47 | 3.45 | 2.66 | 2.51 | 1.04 | 2.51 | 2.48 | 0.13 | 2.50 | 2.50 | 0.02 | 2.05 | 2.24 |

4 产生无效像元的原因

4.1 材料器件工艺缺陷

现有制造工艺技术水平不可能生产出理想的碲镉汞焦平面阵列,接收均匀辐照输出幅度完全一样的信号电压。由于制造焦平面阵列 p-n 结的碲镉汞材料不均匀(杂质浓度、晶体缺陷、内部结构的不均匀性等)、缺陷、工艺条件等影响,它的输出幅度并不相同。凝视红外焦平面阵列的视频输出不均匀性是探测器、读出电路、半导体特性以及放大电路等各种因素综合的结果^[6]。杂质、缺陷、界面陷阱等一般表现为噪声大,应力会导致过热无效像元增加或出现闪烁无效像元、暗电流增大或动态电阻降低;材料缺陷或工艺缺陷被激发,造成钝化膜脱落、金属电极电迁移、汞溢出和扩散、界面态发生改变,引起暗电流增大、动态电阻降低、光谱响应变差、响应率变化、噪声异常^[21]。p-n 结短路损坏的像元信号电压大于正常值或过饱和。

随机性缺陷由制造工艺过程中工作介质里的杂质颗粒、设备和环境中的悬浮颗粒沉积造成,例如,真空沉积钝化膜、电极膜容易产生小于或大于像元的颗粒污染物。系统性缺陷是指由制造工艺过程所涉及的人、机、料、法、环产生的缺陷。例如,拾取、转运、键合、贴装、对位等工艺操作,造成划痕、擦痕、压痕等损伤;清洗、刻蚀、光刻等工艺造成污染、异物及电学连通不良等缺陷。表面缺陷还包括材料固有缺陷,由衬底、薄膜材料制造工艺缺陷产生,例如,圆坑、平台等会产生无效像元、表面漏电流。如果光刻的图形边缘不齐整或有毛刺,会导致电流密度分布不均匀,引入额外的噪声。

4.2 钢栅阵列缺陷

碲镉汞材料平面度大(翘曲),倒装焊接工艺找平误差、钢栅阵列高度、焊接压力、冷压或回流等互连工艺质量缺陷,以及钢栅阵列制备等工艺缺陷造成钢栅阵列互连电学传输质量不可靠,容易出现接触不良的现象,产生 1/f 噪声或压降,形成像元信号电压为 0 或较小的无效像元。焊接压力影响位错密度与 R_0 A 的分布关系。钢栅阵列互连缺陷,包括像元 p-n 结与读出电路输入级开路、相邻像元钢栅阵列相互连通形成短路、连通不可靠接触电阻不稳定。相邻像元钢

栅阵列短路,不能通过均匀辐照像元信号电压或响应电压检测识别,因为相连缺陷像元的信号电压或响应电压与正常像元的信号电压或响应电压基本相同^[22]。没有连通形成开路的像元响应电压为 0(理想情况下),其周围最相邻像元的响应电压相比正常像元增加约 1.25 倍^[23]。

图 8 给出 2 只组件 308K 输出信号电压的灰度图。出厂初始无效像元(行 137,列 54)的钢栅阵列没有连通,周围最相邻像元(137,53)(136,54)(137,55)(138,54)的响应电压相比正常像元增加约 1.26 倍,如图 8(a)。返厂组件在使用状态应力作用下出现“十字”形无效像元故障,是钢栅阵列互连缺陷在热应力激励下连接质量特性退化,造成(214,81)(132,242)像元 p-n 结与读出电路输入级开路的使用无效像元,如图 8(b)所示。

碲镉汞红外焦平面探测器杜瓦制冷机组件工作时,碲镉汞焦平面阵列从自然环境温度制冷到低温 80 K 工作温度,结束工作碲镉汞焦平面阵列从工作温度升温恢复到自然环境温度,寿命周期内经历数千甚至上万次的工作温度循环,造成焊点疲劳和失效。在经历振动冲击、高低温循环、过压或过流等应力激发,钢栅阵列制备的不完整、高度不一致等工艺缺陷造成连接可靠性下降,引起钢栅阵列蠕变、相连、接触不良、脱开等现象发生,连通率下降。

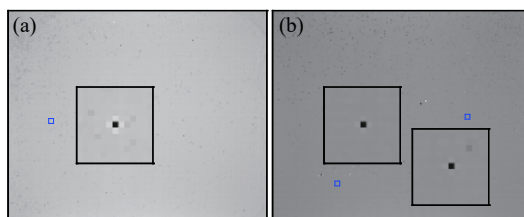


图 8 钢栅阵列没有连通产生“十字”形无效像元

Fig.8 “Cross” shaped non-effective pixels produced by unconnected indium bumps

4.3 热致损伤缺陷

探测器芯片用粘接剂连接到制冷机的冷头上,多层异种材料热适配产生热应力,碲镉汞焦平面阵列受到应力作用,在像元 p-n 结中储存的应变能变大,达到临界值发生应变弛豫、产生失配位错,碲镉汞材料通过晶体滑移形成失配位错来实现应力释放。因此,碲镉汞焦平面阵列像元性能退化形成线状无效像元

簇,是应力作用产生晶格滑移导致位错形成后的应变引起,并非是碲镉汞材料断裂导致线状无效像元簇。所以,失效分析中常常不能观察到显见的断裂裂纹,而又存在线状无效像元簇。早期应变能相对较小,像元信号电压变大为过热像元,在热图像中表现为亮点如图 9(a) 所示。当应变能积累达到强度极限时,才会出现碲镉汞材料的断裂裂纹,此时像元输出电压变小为死像元,在热图像中表现为暗点如图 9(c) 所示。在碲镉汞 (111) B 衬底上生长液相外延碲镉汞薄膜,其滑移面与 (111) B 生长面的 3 条交线构成一个夹角 60° 正三角形,3 条交线均等价于 [110] 方向^[24]。图 9(b)、图 9(c)、图 9(d) 中交叉线状无效像元簇的夹角呈现 60° 或 120°。在焦平面阵列中,碲镉汞材料中的应变会降低材料的载流子寿命,从而增大像元 p-n 结的暗电流、降低响应率。

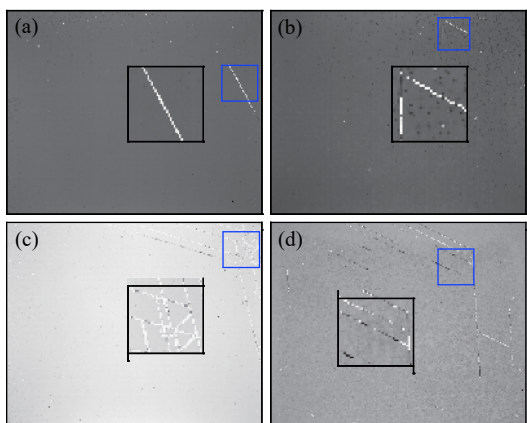


图 9 线状无效像元簇灰度图

Fig.9 Grayscale of linear invalid pixel clusters

4.4 信号传输路径缺陷

红外焦平面阵列的电气互连主要有碲镉汞焦平面阵列与硅读出集成电路的钢栅阵列互连、硅读出集成电路与陶瓷基板金属化焊盘的引线键合、陶瓷基板金属化焊盘与杜瓦引出布线金属化焊盘的引线键合等。封装电信号路径由引线键合、互连线几何版图、材料特性和它们的几何尺寸等构成,存在于封装结构中的寄生电容和电感等分布参数是噪声产生的重要因素,电气互连设计就是要降低这些寄生效应。根据制造工艺能力和封装材料特性确定封装结构的最小线宽、线间距、传输线和介质层厚度、介电常数、电导率等物理参数,有效减小或抑制与交叉串扰、时钟

干扰和电磁干扰有关的噪声源。

模拟信号传输路径构成的传输网络中,有些电压或电流能传递到邻近区域网络上,通过分布参数耦合有害噪声形成串扰噪声,如图 10。多路输出的焦平面阵列像元信号线上存在着自感和互感,快速变换的时钟线和积分信号线能造成电流变化率,像元信号线上耦合的感生电压为^[25]:

$$V_N = L_m \frac{\Delta V}{T_{10\% \sim 90\%} Z} \quad (2)$$

式中: V_N 为线路 1 在线路 2 上产生的感生电压; L_m 为线路互感; Z 为线路上的负载阻抗。假设数字信号电平在转换的过程中电平转换为 ΔV , 转换时间为 $T_{10\% \sim 90\%}$ 。

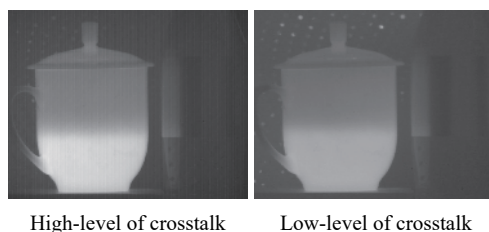


图 10 串扰噪声^[25]

Fig.10 Crosstalk noise

碲镉汞焦平面阵列与硅读出集成电路互连和信号传输引线键合的接触缺陷是 $1/f$ 噪声的一个重要来源^[26], $1/f$ 或闪烁噪声很大程度上由接触电阻变化产生,已确信是由表面态势的杂乱变化引起的。

5 结论

制造生产响应特性一致稳定的碲镉汞焦平面阵列组件并非易事。减少无效像元的数量,可以提高有效像元率,并显著减小响应不均匀性,从而降低成本、提高性能。提升制造工艺稳定性、一致性,从材料、器件工艺的自动化途径,减少工艺缺陷产生的无效像元;优化电传输互连设计,摒弃手动和半自动引线键合,提高电气互连质量与可靠性,有效抑制 $1/f$ 噪声,减少过热像元;重视封装结构热设计和优化组装工艺,减少封装热应力和组装机应力产生的无效像元。

无效像元筛选标准不同,剔除的无效像元数差异很大。制造工艺技术水平限制焦平面阵列的一致性和稳定性。中波 320×256 探测器杜瓦制冷机组件,恒

定不变的无效像元(初始无效像元 \cap 使用无效像元)平均占表观无效像元的 13.55%, 平均有 86.45% 的表观无效像元不稳定, 使用过程中表观无效像元率的相对变化量是初始无效像元率的 3.65 倍; 初始有效像元率 99.71%, 使用有效像元率 98.64%。性能评价测试确认的无效像元与热像仪图像处理校正的无效像元并不一致, 最有效地甄别无效像元的方法, 是测量不同黑体温度条件下的输出信号电压, 超出 $\pm(6\% \sim 7.5\%)$ 平均值的即为无效像元。

使用过热像元平均占无效像元的比例减小, 像元的响应直线呈水平状, 是封装结构固有热应力引起碲镉汞晶体滑移位错所致。必须重视电传输路径的设计和连通键合工艺的优化, 它是 $1/f$ 或闪烁噪声干扰不可忽略的来源。

参考文献:

- [1] Wang Yifeng, Lu Jianming. Toward digitization in infrared focal plane array [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(4): 195-201. (in Chinese)
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.
- [2] Yang Chaowei, Li Dongsheng, Li Lihua, et al. Review of small-pixel HgCdTe infrared focal plane detector [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(11): 1003-1011. (in Chinese)
杨超伟, 李东升, 李立华, 等. 小像元碲镉汞红外焦平面阵列的研究进展[J]. 红外技术, 2019, 41(11): 1003-1011.
- [3] Ding Ruijun, Yang Jianrong, He Li, et al. Development of technologies for HgCdTe IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0103010. (in Chinese)
丁瑞军, 杨建荣, 何力, 等. 碲镉汞红外焦平面器件技术发展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0103010.
- [4] Bart Dierickx, Guy Meynants. Missing pixels correction algorithm for imager sensor[C]//Proc SPIE, 1998, 3410: 200-203.
- [5] Sanders-Reed J N, Duncan M J, Boucher W B, et al. Multi-target tracking in clutter[C]//Proc SPIE, 2002, 4724: 30-36.
- [6] Chen Qian. The Status and development trend of infrared image processing technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 311-318. (in Chinese)
陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311-318.
- [7] Gross W, Hierl T, Schulz M. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5): 862-869.
- [8] Schulz M, Caldwell L. Nonuniformity correction and correlatability of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, 36: 763-777.
- [9] Liu Gaorui, Sun Shengli, Lin Changqing, et al. Analysis and suppression method of flickering pixel noise in images of infrared linear detector [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2018, 37(4): 421-426. (in Chinese)
刘高睿, 孙胜利, 林长青, 等. 红外线性探测器阵元噪声分析与抑制方法[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(4): 421-426.
- [10] Sun Ting, Liao Qingjun, Ye Zhenhua. Performance improvement of mercury cadmium infrared detector from production process [J]. *Infrared*, 2019, 40(5): 1-9. (in Chinese)
孙婷, 廖清君, 叶振华. 从生产过程实现碲镉汞红外探测器的性能提高[J]. 红外, 2019, 40(5): 1-9.
- [11] Chen Xing. Research on the related technology of HgCdTe infrared focal plane detector reliability[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Techcial Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
陈星. 碲镉汞红外焦平面可靠性相关技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [12] Cathignol A, Vauquelin G, Brunner A, et al. RMS noise modeling and detection for high-reliability HgCdTe infrared focal plane arrays development[C]//SPIE, 2015, 9451: 945126.
- [13] Zeng Gehong. Fundamentals of p-on-n HgCdTe infrared detectors and their detectivity calculations [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(5): 249-258. (in Chinese)
曾戈虹. p-on-n HgCdTe 红外探测器机理分析与性能计算[J]. 红外技术, 2013, 35(5): 249-258.
- [14] Greiner M E, Smith R L, Timlin H A. Uniformity and stability in 2-dimensional infrared focal plane arrays[C]//Proceedings of SPIE, 1994, 2225: 176-184.
- [15] Shi Yan. Study on the image pre-processing method and system software for staring IR imaging information processing system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 26-27. (in Chinese)
石岩. 凝视红外成像信息处理系统图像预处理方法与系统软件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 26-27.
- [16] Bart Dierickx, Guy Meynants. Missing pixels correction algorithm for imager sensor[C]//Proc SPIE, 1998, 3410: 200-203
- [17] 叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(2): 86-90.
- [18] Chen Baoguo, Fan Yangyu, Wang Wei. Research on relations among defective element criterions of IRFPA [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(2): 186-189. (in Chinese)

- 陈宝国, 樊养余, 王巍. 红外焦平面阵列盲元判据的相关性研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(2): 186-189.
- [19] Cui Kun, Chen Fansheng, Su Xiaofeng, et al. A fast screening method of pixels with unstable response rate in IRFPA [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(2): 130-135. (in Chinese)
崔坤, 陈凡胜, 苏晓锋, 等. 红外焦平面阵列响应率不稳定像元快速筛选方法[J]. *红外技术*, 2017, 39(2): 130-135.
- [20] Hirsch J, Curcio C A . The spatial resolution capacity of human foveal Retina [J]. *Vision Research*, 1989, 29(9): 1095-1101.
- [21] Hao Lichao, Huang Aibo, Lai Canxiong, et al. Discussion of reliability analysis on IRFPAs by bad pixel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504004. (in Chinese)
郝立超, 黄爱波, 赖灿雄, 等. 盲元作为红外焦平面可靠性分析手段的探讨[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0504004.
- [22] Hou Zhijin, Fu Li, Si Junjie, et al. Identification and orientation of connected defective elements in FPA [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2017, 36(2): 208-213. (in Chinese)
侯治锦, 傅莉, 司俊杰, 等. 面阵探测器相连缺陷元识别定位[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(2): 208-213.
- [23] Hou Zhijin, Fu Li, Lu Zhengxiong, et al. Causes and characteristics of indium bump defects in InSb focal plane array [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 325-331. (in Chinese)
侯治锦, 傅莉, 鲁正雄, 等. InSb面阵探测器钨栅阵列缺陷成因与特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(3): 325-331.
- [24] Kong Jincheng, Qin Gang, Qin Qiang, et al. Crosshatch pattern on HgCdTe FPA response imaging [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(2): 101-106. (in Chinese)
孔金丞, 覃钢, 秦强, 等. 碲镉汞红外焦平面响应图“交叉线”特征起源探讨[J]. *红外技术*, 2019, 41(2): 101-106.
- [25] Liu Ning, Chen Qian, Gu Guohua, et al. The noise analysis and inhibition technology of the driving circuits of the 640×512 IR focal plane detector [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(10): 572-575. (in Chinese)
刘宁, 陈钱, 顾国华, 等. 640×512 红外焦平面阵列前端噪声分析及抑制技术[J]. *红外技术*, 2010, 32(10): 572-575.
- [26] Takagi K, Mizunami T, Suzuki J, et al. $1/f$ noise in metal contacts and granular resistors [J]. *IEEE Trans*, 1986, 9(2): 141-144.



第一作者简介: 李建林(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事红外探测器封装技术、真空获得技术、环境工程、可靠性和性能评价方面的研究。在封装杜瓦产生真空以及真空寿命、出气速率、热负载测量等设计与工艺技术领域有深入的研究和实践经验, 涉猎高屏蔽效率冷屏蔽罩设计、黑体辐射源设计、焦平面阵列寿命评估及像元失效研究等。Email: lijianlin12@21cn.com