

盲元作为红外焦平面可靠性分析手段的探讨

郝立超¹, 黄爱波², 赖灿雄¹, 陈星², 陈辉¹, 郝明明¹, 路国光¹, 黄云¹, 恩云飞¹

- (1. 工业和信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 红外焦平面器件广泛应用于国防安全、空间探测、环境监测、工业控制等各个领域,但是由于量少价高的特点,可靠性成为其技术发展的主要瓶颈之一。盲元是红外焦平面的失效像元,是对器件工作特性的反映,因此,可以用作可靠性评价和失效分析手段的重要参数。以出厂时间为界,将盲元分为初始盲元和使用盲元,并分析了其类型、性质、数量、位置及分布等方面的特征。根据红外焦平面器件结构特点,从探测器、互联网柱和读出电路三个方面分析了盲元形成原因,全面探讨了盲元分析在研究器件损伤应力、失效位置、损伤机理上的应用,以及准确评价器件性能和提高盲元剔除精度的可行性,为器件结构的优化和工艺的改进提供了支撑。

关键词: 盲元; 红外焦平面; 可靠性; 失效分析; 性能评价

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0504004

Discussion of reliability analysis on IRFPAs by bad pixel

Hao Lichao¹, Huang Aibo², Lai Canxiong¹, Chen Xing², Chen Hui¹, Hao Mingming¹,
Lu Guoguang¹, Huang Yun¹, En Yunfei¹

- (1. Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, the Fifth Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;)

Abstract: The infrared focal plane arrays (IRFPA) have been applied in various areas, e.g. safety, space exploration, environmental monitoring, industry control. Due to the characteristics of small amount and high price, reliability has become a major bottleneck problem for IRFPAs' development. As failure pixel, bad pixel is an objective reflection of IRFPA's performance, so it is very suitable for failure analysis and reliability evaluation. Bad pixels were divided into initial bad pixels (IBPs) and used bad pixels (UBPs) by the boundary of delivery time, and their characteristics were analyzed such as type, nature, quantity, location and distribution et al. At the same time, according to hybrid IRFPAs' structure, the cause of bad pixel was studied by three aspects: the detector chip, indium bump and ROIC. Meanwhile, the feasibility

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-03

作者简介: 郝立超(1986-), 男, 工程师, 博士, 主要从事红外焦平面器件可靠性方面的研究。Email: hao_li_chao@163.com

通讯作者: 黄爱波(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外焦平面设计、测试及筛选等方面的研究。Email: hab-888@163.com

to study IRPFAs' damage stress, failure position, damage mechanism and device evaluation were discussed all around. The research of bad pixel can be used to optimize the structure and process, and it also can improve the accuracy of bad pixel identification and replacements.

Key words: bad pixel; IRFPA; reliability; failure analysis; performance evaluation

0 引言

红外焦平面是新一代红外探测系统中最核心的部件,主要功能是将辐射图像信号变成在空间与其对应的电信号阵列,并将所获取的空间电信号阵列按一定次序输出,获取目标和背景的图像信息^[1]。目前,红外技术已在现代社会中占有十分重要的地位,广泛应用于红外热成像、侦察夜视、精确制导、搜索跟踪及监视预警等领域中,成为各国争先发展的一项关键技术^[2]。

可靠性研究是基于产品设计、生产及使用全过程的研究。红外焦平面器件由于其使用环境比较严苛复杂,且第三代器件的制备技术尚不够成熟,可靠性是其正常工作、良好应用的根本保障,也逐渐成为制约红外焦平面器件应用的瓶颈^[3]。现阶段一般采用抽样加速试验的方法评价红外焦平面器件的可靠性,但是存在着器件量小、抽样统计不确定性较大、试验周期过长、失效分析手段匮乏以及损伤位置难以定位等问题^[4]。

红外焦平面器件性能下降或失效的主要原因是器件中存在各类潜在缺陷^[5]。这些潜在缺陷在器件工作初期和正常工作应力条件不会引起器件性能的变化或退化,但在长时间工作之后或是在过应力的作用下会被激发,从而引起器件性能退化或失效。而器件性能退化或是失效最直观的一种表现形式就是像元失效,形成盲元。盲元的判定主要有响应率、噪声和直流电平三种判据^[6],响应率判据主要是指因响应率过小而形成的死像元,噪声判据主要是指因噪声过大而形成的过热像元,而直流电平判据包括电平偏高、过高、偏低、过低、毛刺等细节。盲元形成原因的不同或判据的改变,会导致其在种类、性质、数量、位置和分布等特征上的表现发生变化。通过分析盲元的特征表现,可以定位器件的失效位置,分析器件性能退化机理,从而作为失效分析和可靠性评价的一种手段,进而为结构优化和工艺改进提供支持。

1 红外焦平面器件结构

红外焦平面器件可以分为红外探测器阵列和读出电路两个部分,依据其结构的不同可将其分为单片式和混成式。单片式红外焦平面阵列的探测器和读出电路制作在同一衬底上,一般衬底采用特定的具有合适光谱效应的红外探测器材料。混成式红外焦平面阵列是通常采用倒焊的方式实现探测器芯片与读出电路之间的电、热和机械特性连接,从而达到既有红外信号获取又具有信号处理功能的目的,其详细结构如图 1 所示^[7]。

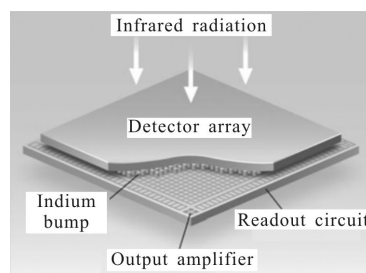


图 1 混成式红外焦平面的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of hybrid IRFPAs

现阶段普遍采用这种混成式结构,混成式红外焦平面阵列的探测器和读出电路可以分别选用最合适自身的材料和工艺制作,而且可以分别进行测试筛选,确定其最优性能,挑选出最好的芯片进行倒焊互联,所以能够有效保证整个焦平面的性能处于较为理想的状态。

红外焦平面探测器是一个由 GaAs 基或 CZT 基探测器芯片、互连钢柱区、硅读出电路、低温粘接胶、引线基板(蓝宝石、陶瓷等材料),以及金属支撑结构组成的多层材料体系,且在制备、封装、贮存和应用过程中面临非常复杂的应力环境,而以小像元、大面阵技术为主流的第三代红外焦平面更是对其可靠性提出了更高的要求,现阶段亟需一种有效的失效分析和可靠性评价方法。

该研究选用的探测器是基于 ZnCdTe 衬底的由

液相外延法制备的碲镉汞外延薄膜材料上加工制造的阵列和线列探测器,其详细结构如图 2 所示。器件的工艺为:ZnCdTe 衬底上液相外延生长的 As 掺杂 P 型材料上进行 B⁺离子注入形成 N 型区,从而形成 N-on-P 型光伏探测器。采用 ZnS/CdTe 作为双层钝化膜,采用生长的 Au 作为金属电极,并在金属电极上生长 In 柱,通过钢柱倒焊实现探测器和读出电路之间的互联。

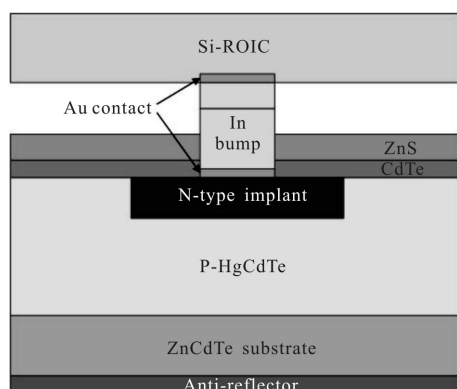


图 2 红外 HgCdTe 探测器剖面图

Fig.2 Sectional view of infrared HgCdTe detector

2 红外焦平面器件像元损伤机理

红外焦平面器件的盲元是指输出信号不符合正常光电转换规律的像元,又称为失效像元或无效像元。依据红外焦平面器件的出厂时间为分界线,盲元可以分为初始盲元和使用盲元两部分。初始盲元是由器件结构、材料选择及制造工艺等方面的原因引起,红外焦平面阵列中出厂时就存在的盲元,也是评价器件性能的一个重要指标。使用盲元是出厂之后在使用过程中产生的盲元,主要是由于器件潜在缺陷被激发,从而导致像元性能退化或失效,产生新的盲元。同时,广义上讲可靠性加速试验是为了在较短时间内模拟器件长期的使用可靠性,因此这个过程产生的失效像元也是使用盲元。使用盲元产生的原因很多,归结起来表现为探测器、互联钢柱和读出电路三个方面^[9-10]:

(1) 红外焦平面阵列探测器材料缺陷或工艺缺陷被激发,造成钝化层脱落、电极电迁移、Hg 溢出和扩散、界面态发生改变等现象,引起暗电流增大、结阻抗降低、光谱响应出现偏差、响应率发生变化或噪声异常等,导致探测器单元性能恶化,造成红外焦平

面器件像元失效;

(2) 由于钢柱生长的不完整性、高度的不一致性、剥离造成的残余钢渣、材料的不平整造成的器件连通可靠性下降等因素,焦平面器件在经过振动冲击、高低温循环或过压/过流等应力激发后会产生钢柱缺陷,引起互连钢柱蠕变、粘连、接触不良、脱开等现象发生,造成红外焦平面器件像元失效。

(3) 在采用移位读出的读出电路中,过压、过流及高低温冲击等应力会造成单元电路或其余电路模块受损,导致传输率下降或是通道障碍,使相关像元信号输出严重变形,从而形成无效像元。

在上述引起像元失效的因素中主要的还是器件结构、材料、工艺造成的潜在缺陷被激发,引起像元的响应率或是噪声发生变化。在现有材料和工艺水平下要从红外焦平面阵列探测器上根本地消除可能产生盲元的缺陷几乎不可能的,因此在使用过程中会有大量的使用盲元产生,从而严重影响红外成像图像质量。

3 盲元用于红外焦平面器件可靠性分析

红外焦平面的应用领域决定了器件使用过程中会面临极端复杂的振动、冲击、过压、过流、辐照等环境,而制冷型红外焦平面探测器常温(300 K)存储、低温(80 K)工作的特点决定了器件会经过成千上万次的高低温冲击。在这些过程中,探测器始终承受较大的不断变化的应力和形变影响,因此与其它一些电子封装结构相比,红外焦平面器件更容易疲劳失效,造成钢柱互联失效、光敏元性能退化以及材料蠕变失效等,从而引起焦平面阵列像元的噪声、响应率及直流电平发生变化,产生使用盲元,导致盲元的类型、性质、数量、位置和分布等特征也随之改变。

3.1 盲元可以用于研究引起失效的损伤应力

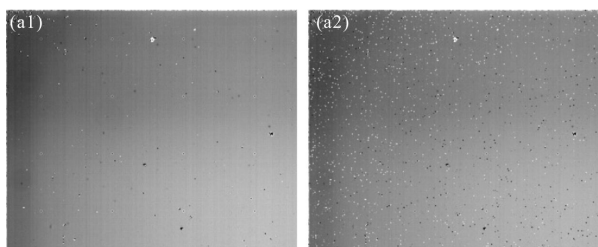
红外焦平面器件在使用过程中主要的应力环境包括振动、冲击、超重、失重等机械应力,静电击穿(ESD)、过电应力(EOS)、电压偏移等电学应力,高低温循环、热冲击、高温烘烤和真空热浸等热应力,X射线、 γ 射线、质子、中子、重离子等辐照应力,以及现阶段研究较多的激光致盲,如表 1 所示,这些都会导致焦平面阵列的噪声、响应率发生变化,表现为示波器显示的直流电平和灰度图特征改变。

表 1 IRFPA 面临的主要环境应力

Tab.1 Major environment stresses of IRFPA

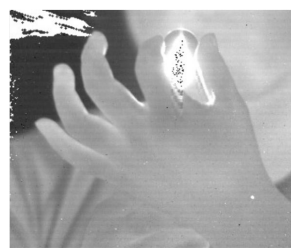
Environment stress	Main affected zone	Typical stress
Mechanical stress	IRPFAs' structure	Vibration
		Shock
		Overweight
		Weight loss
		ESD
Electrical stress	Detector chip ROIC	EOS
		Voltage offset
Thermal stress	Indium bump detector chip	Temperature cycling
		Thermal shock
		High temperature baking
		Vacuum hot-dip
		X-rays, γ -rays
Radiation stress	ROIC	Protons, Neutrons Heavy ions
Optical stress	Detector chip	Laser

在实际测试并结合国内外的文献中发现, 由于不同加速应力各自的特点, 其导致的像元失效特征会有所不同, 盲元特征具有一定的典型性。因此, 通过分析盲元的直流电平、灰度图、直方图、不同类型分布图等特征, 可以研究引起失效的加速应力^[11]。例如图 3(a1)为正常探测器焦平面的背景图, 图 3(a2)是高低温循环冲击造成焦平面芯片发生热失配, 产生了大量盲元, 图 3(b)是曝光过量, 进入探测器的能量过高, 导致器件中心区域积分饱和, 产生了大量响应电压饱和的使用盲元。



(a) 高低温循环冲击失效

(a) High and low temperature cycling failure



(b) 曝光过量失效(烙铁头处有黑点)

(b) Excessive exposure failure(The black spots corresponding to electric soldering bit on the image map)

图 3 不同应力引起的典型盲元分布特征

Fig.3 Two typical bad pixels induced by different stresses images

3.2 盲元可以用于定位器件的失效位置

红外焦平面器件是一种多层材料体系的复杂结构, 在现有结构、材料和工艺条件下, 其可靠性并不是太成熟, 任何一个部分的损伤都会导致器件失效, 而采用扫描电镜、聚焦离子束、热成像等传统手段定位失效位置耗时耗力, 其结果也不太理想。盲元本身就是一种像元的失效现象, 因此盲元的位置和分布是对失效位置直观形象的表现。在测试和使用过程中, 通过观察使用盲元的产生和变化, 在成像平面上就能确定失效点的位置, 再进一步分析盲元的类型、分布特点、变化规律, 基本可以确定器件的失效位置。比如在实际测试中发现多数盲元是相伴出现, 一般是由于钢柱生产工艺不成熟, 在热应力作用下发生粘连, 如图 4 所示; 直流电平一定程度的偏离通常是由于探测器缺陷被激发, 其暗电流升高或结电阻降低引起, 此时会伴随着噪声大小和频谱的变化等。

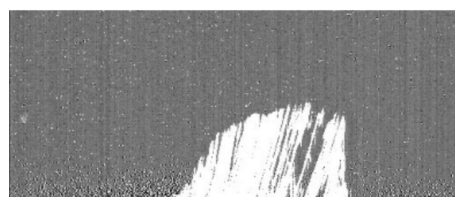


图 4 钢柱发生粘结图像

Fig.4 Three-dimensional image of indium bump adhesions

3.3 盲元可以用于分析器件的损伤机理

红外焦平面器件的损伤主要集中在探测器芯片、互联钢柱和读出电路三个部分。探测器芯片的杂质、缺陷、界面陷阱等一般表现为噪声异常^[12], 应力加速试验会导致噪声盲元增加或是出现闪烁盲元; 同时, 探测器的暗电流会增大或结电阻降低^[13]。因此

可以根据噪声盲元的噪声大小和频谱分析,并结合探测率盲元的偏离特征研究探测器的损伤机理。例如解析噪声盲元的频谱特性,通过对热噪声、散粒噪声、 $g-r$ 噪声、 $1/f$ 噪声分析可以确定缺陷的位置、类型和作用机理。图 5 是对某型 MW512X1 器件连续采集 100 帧获得的 512X100 图像盲元,其中黑色为噪声盲元,粗线为响应率盲元。由图 5 可见,一部分噪声盲元有时表现为盲元,而有时则表现为正常像元,可以通过噪声特性的研究来进一步确定其存在的潜在缺陷。

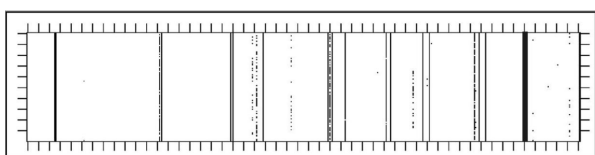


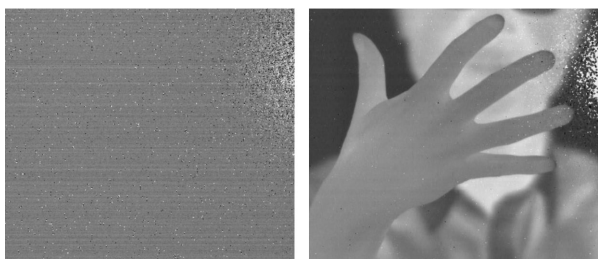
图 5 红外焦平面器件存在的闪烁盲元

Fig.5 Flicker bad pixels of IRFPA

互联网柱和读出电路的损伤机理主要是通过盲元的位置和分布特点进行分析,例如整行整列的盲元产生通常是由于读出电路的行或列放大器损伤引起,机械作用下盲元的时有时无一般是互联网柱的焊接不良或是虚焊引起的,类似的案例还非常多,在此不再赘述。

3.4 盲元可以用于评价器件的工作性能

在国标 GB/T 17444-2013 中涉及到盲元的性能指标只有盲元率这一项,但这并不能充分反应器件的性能,在器件使用过程中器件四周的盲元对成像质量的影响较小,而器件中心的盲元对其影响非常大,并且很多盲元是以盲元簇的形式出现,在探测预警领域中使用很容易造成目标丢失。如图 6 所示,



(a) 探测器背景图

(b) 经过 NUC 校正后成像图

(a) Background image of IRFPA (b) Correction image after NUC

图 6 分散盲元与团簇盲元在成像上的差异

Fig.6 Difference between dispersed and cluster bad pixels

在探测器实际应用中,对于离散的盲元点,经过非均

匀性校正(NUC)后基本不会影响成像质量,而对于团簇的盲元点则会造成成像信息的缺失,影响应用。所以判断探测器的优劣,仅从盲元数目上考核是不够的,需要准确的评价盲元类型与分布。

现阶段很多大面阵的焦平面器件都是采用中规模面阵的器件拼接而成。由于单个器件的四角容易出现使用盲元,当拼接到一起时,会在拼接的大面阵器件中心位置出现大量的盲元,严重影响器件的有效使用。综上所述,完整有效地评价焦平面器件的工作性能,除了盲元率以外,还需要研究盲元的分布及盲元间的关系等盲元特征。

另外,使用盲元可以用于研究器件的工作寿命。研究器件寿命的加速寿命试验方法需要针对不同失效力、不同工作模式进行大规模试验,需要大量试验样品,而红外焦平面器件量少价高,特别是一些航天级焦平面器件更是珍贵。在对其寿命的研究中,笔者正探索利用单像元代替整个焦平面,通过对使用盲元的分析,反推器件的工作寿命,大幅降低对器件数量的需求,有效降低试验成本。

3.5 盲元可以用于优化其检测和补偿算法

目前,红外焦平面器件的盲元通常采用出厂时标点,盲元的替换或补偿算法都是基于出厂数据设置,而在器件使用或应力加速试验过程中产生的失效像元会降低红外成像的温度分辨率,在图像中出现大量的亮点或暗点,系统的成像质量严重下降。

常用的盲元检测方法分为定标法和基于场景检测法两类^[4]。定标法是基于盲元和正常单元在响应率、偏差系数、噪声统计量等性能指标上的区别来判定盲元,属于出厂前标定,仅适用于检测初始盲元,无法处理实际应用过程中出现的使用盲元;而基于场景的检测方法则能进一步对使用盲元进行检测和补偿^[5],受到研究者越来越多的重视。因此,深入系统研究红外焦平面器件的像元失效规律和分布特征,可以用于优化盲元检测方法,提高盲元检测精度,避免盲元的漏判或误判。

4 结论

在红外焦平面器件的评价中,仅有盲元率作为它的一项主要性能指标,而盲元的类型、特点、位置和分布等特征并没有得到充分利用,而现有工艺水平下消除器件潜在缺陷是不现实的,因此将盲元作

为红外焦平面器件可靠性的评价手段有其它方法不可比拟的优势,也日益引起研发单位的关注。文中从器件结构的角度总结了像元的损伤机理,并依据现有研究成果分析了盲元作为失效分析和可靠性评价手段的可行性。另外,由于损伤机理、失效位置及环境应力的复杂性,盲元作为红外焦平面器件可靠性评价需要大量的实验数据和系统性的研究,后续将展开相关方面的工作。

参考文献:

- [1] Hao Lichao, Ding Ruijun, Zhang Junling, et al. A high-performance readout circuit (ROIC) for VLWIR FPAs with novel current mode background suppression [C]//IEEE ICMIC, 2012: 869-873.
- [2] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese)
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145-3153.
- [3] Lai Canxiong, Yang Shaohua, Lu Guoguang. Failure analysis of integrated detector Dewar cryocooler assembly [C]//2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), 2013: 935-938.
- [4] Su Yuhui, Gong Xiaoxia, Lei Shengqiong, et al. Discussion of reliability evaluation on infrared photovoltaic detector by noise [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(9): 509-512. (in Chinese)
苏玉辉, 龚晓霞, 雷胜琼, 等. 噪声作为红外探测器可靠性评价的探讨 [J]. 红外技术, 2009, 31(9): 509-512.
- [5] Norton P. HgCdTe infrared detector [J]. *Opto-Electronics Review*, 2002, 10(3): 159-174.
- [6] Chen Baoguo, Fan Yangyu, Wang Wei. Research on relations among defective element criteria of IRFPA [J]. *Laser and 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.
- [7] Chen Xing, He Kai, Wang Jianxin, et al. Thermal cycling reliability of linear HgCdTe infrared detectors [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(4): 369-374. (in Chinese)
陈星, 何凯, 王建新, 等. 碲镉汞线列红外探测器模块温度循环的可靠性 [J]. 红外与毫米波, 2014, 33(4): 369-374.
- [8] Li Xue, Shao Xiumei, Tang Hengjing, et al. Inoperable pixels of 256×1 element linear InGaAs near-infrared focal plane arrays [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2011, 30(5): 409-411. (in Chinese)
李雪, 邵秀梅, 唐恒敬, 等. 近红外 256×1 元 InGaAs 焦平面探测器无效像元研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(5): 409-411.
- [9] Zhang Liwen, Shao Ming, Zhang Xiaoling, et al. Three-dimensional modeling and simulation of large-format hybrid indium antimonide detector arrays [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 103110-1-103110-7.
- [10] Wang Wei, Fan Yangyu, Si Junjie, et al. Types and determination of bad pixels in IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2261-2264. (in Chinese)
王巍, 樊养余, 司俊杰, 等. 红外焦平面阵列盲元类型与判别 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2261-2264.
- [11] Chen Xing. Research on the related technology of HgCdTe infrared focal plane detector reliability [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 48-86. (in Chinese)
陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 48-86.
- [12] Rogalski A. Material considerations for third generation infrared photon detectors [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, 50: 240-252.
- [13] Stephen P Tobin. Thermal cycling-induced changes in excess dark current in very long-wavelength HgCdTe photodiodes at low temperature [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35: 1411-1415.
- [14] Huang Xi, Zhang Jianqi, Liu Delian. Algorithm of blind pixels adaptive detection and compensation for infrared image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 370-376. (in Chinese)
黄曦, 张建奇, 刘德连. 红外图像盲元自适应检测及补偿算法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 370-376.
- [15] Dierickx B, Meynants G. Missing pixel correction algorithm for image sensors [C]//SPIE, 1998, 3410: 200-203.