

面阵探测器相连缺陷元识别定位

侯治锦^{1,2,3*}, 傅莉¹, 司俊杰^{2,3}, 王巍^{2,3}, 吕衍秋^{2,3}, 鲁正雄^{2,3}, 王锦春^{2,3}

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471099;

3. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471099)

摘要:面阵探测器相连缺陷元的光电信号与正常元基本相同,因此采用现有面阵测试方法无法识别相连缺陷元.针对相连缺陷元的特点,提出了借助改变面阵探测器光电响应的方法来实现相连缺陷元的识别定位.实验结果表明,该方法使面阵探测器分为两个不同透过率探测单元,多元相连缺陷元响应电压是相对应的两个不同透过率探测单元响应电压之和的平均值.采用MATLAB软件对测试数据进行分析处理,分析结果清晰给出缺陷元诸如个数、形状和位置等详细信息.采用本方法面阵探测器相连缺陷元可以被显著识别定位.研究结果为今后的面阵探测器评测与可靠性提高提供了参考.

关键词:面阵探测器;相连缺陷元识别;缺陷元定位;缺陷;红外

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Identification and orientation of connected defective elements in FPA

HOU Zhi-Jin^{1,2,3*}, FU Li¹, SI Jun-Jie^{2,3}, WANG Wei^{2,3},
LV Yan-Qiu^{2,3}, LU Zheng-Xiong^{2,3}, WANG Jin-Chun^{2,3}

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China;

3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471099, China)

Abstract: It is difficult to identify connected defective elements by FPA test-bench because the response voltage of connected defective elements is basically the same as that of normal pixels. In this paper identification and orientation of connected defective elements in focal plane array (FPA) are presented. According to the characteristics of connected defective elements, we proposed a novel method which realizes the identification and orientation of connected defective elements by measuring the response voltage of detectors. Results show that the response voltage of detector can be divided into two sections by using the proposed method. The response voltage of connected defective elements is average of corresponding response voltage of the two sections. The test data is analyzed by MATLAB software and the particular information of connected defective elements such as number, shape and location is shown. The connected defective elements are identified and orientated markedly by the technique. Our study presents a crucial step for testing and evaluating FPA.

Key words: focal plane array, connected defective elements identification, defective elements orientation defective, infrared

PACS: 95.55.Aq

引言

红外焦平面探测器具有灵敏度高、环境适应性

好、抗干扰性强等优点,被广泛应用于国防、红外遥感和气象环境等军民应用领域^[1-2]. 响应波段在1~5.5 μm的碲化铟(InSb)^[3-4]面阵探测器具有灵敏度

收稿日期:2016-07-01,修回日期:2016-12-13

Received date: 2016-07-01, revised date: 2016-12-13

基金项目:航空创新基金(2011D01406)

Foundation items: Supported by the Aviation Innovation Foundation of China (2011D01406)

作者简介(Biography): 侯治锦(1982-),男,山西孝义人,博士研究生,从事红外焦平面探测器研究.

* 通讯作者(Corresponding author): changhui090504@126.com

高(相对于铂硅(PtSi)),在批量生产中具有工艺成熟度高(相对于碲镉汞(MCT)^[5-6])等优点,目前已在凝视成像和空空导弹制导领域占据主导地位,如英国的新一代空空导弹 ASRAAM 采用的就是 128×128 元 InSb 红外面阵探测器^[7-10].

当被探测目标距离空空导弹红外导引头较远时,被探测目标在红外导引头中的影像呈点状分布,此时空空导弹的工作模式为点源跟踪模式.在此工作模式下,红外导引头对红外面阵探测器中缺陷元数量、分布提出了苛刻要求.红外系统对红外面阵探测器中缺陷元的要求同样苛刻.在批量生产中,受到材料和诸多工艺限制,封装后的红外面阵探测器中的缺陷元无法完全避免.为此,迫切需要明确缺陷元在面阵探测器中的位置分布,以便能够利用补偿法对缺陷元所在处的目标信息进行补偿,最终使得含缺陷元的红外面阵探测器能够满足系统应用要求.

受到材料缺陷、制作工艺水平的影响,在大规模小像元面阵探测器的研制中,缺陷元无法避免^[11-13].依据生成原因的不同,缺陷元可分为缺失缺陷元、相连缺陷元等.缺失缺陷元是由光刻、腐蚀工艺等引起的钢柱缺失或电极缺失造成;相连缺陷元是由光刻腐蚀或光刻剥离工艺等引起的台面相连、电极相连或钢相连造成.

对材料表面缺陷和工艺引起的缺陷元,在研制工序的例行检验中,可借助高倍光学显微镜检出缺陷元,也可采用焦平面阵列测试系统对封装后的面阵探测器进行测试,基于测试数据判断出缺陷元的位置及数量.例如,对于单元缺陷元而言,可借助高倍光学显微镜检出单元缺陷元,也可采用焦平面阵列测试系统基于光电信号等测试数据判断出单元缺陷元信息.但对于由材料内部缺陷或细小钢渣等造成的相连缺陷元,借助高倍光学显微镜无法识别.由于相连缺陷元的光电信号与正常元的光电信号基本相同,借助焦平面测试系统测试时亦无法检出.尽管理论上可借助面阵探测器串音测试方法对相连缺陷元进行识别,但在实际应用中,借助串音测试方法来识别相连缺陷元也是很难实现的.这是因为:串音测试主要针对正常光敏元中某一光敏元对其相邻光敏元的串扰.若使用串音测试方法来识别相连缺陷元,则需对面阵探测器中各探测单元都进行测试,不仅测试数量多,工作量大,而且测试和计算分析的复杂度也会随着面阵探测器的增大而大幅增加.综上所述,现有面阵探测器缺陷元检测方法无法识别相连缺陷元.当该面阵探测器应用于新一代空空导弹时,

若目标成像落在相连缺陷元区域内,可能会造成目标丢失,产生误判与错判,严重影响着新一代空空导弹的命中率;当该面阵探测器应用于红外系统时,若目标成像落在该相连缺陷元区域内,可能会造成图像失真,严重影响着图像质量和红外系统的性能.相连缺陷元评测的缺失,制约着面阵探测器的性能提升,严重影响着系统性能,特别是新一代空空导弹的命中率.

为此,本文提出了借助改变面阵探测器光电响应的方法来实现相连缺陷元的识别定位,旨在完善面阵探测器缺陷评测方法,为面阵探测器中缺陷元信号的补偿提供依据,以期提高探测器的综合性能,满足系统应用要求,尤其是空空导弹的实战需求.

1 研究方法

1.1 网孔图形设计及分析

该方法是在基片上制作两种不同透过率薄膜的网孔图形的方法.用于识别相别相连缺陷元的网孔图形如图 1 所示,两种不同透过率薄膜形成的网孔图形形成对交错出现且紧密排列.

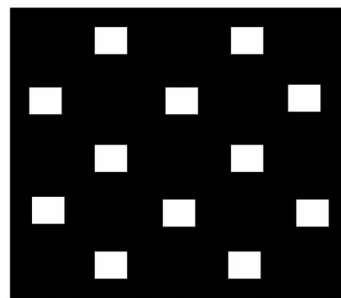


图 1 用于识别相连缺陷元的网孔图形
Fig. 1 Pattern of meshwork applied in connected defective elements identification

因两种薄膜透过率不同,当应用于面阵探测器时,面阵探测单元被分为两个不同透过率的探测单元,从而可以借助改变响应电压来达到识别定位相连缺陷元的目的.

文中对面阵探测器相连缺陷元的分析和识别定位是重点,因此,为了更好地说明该方法的功能,这里对透过率的选取采用了边界法,即选取了全透过(透过率为 100%)和全截止(透过率为 0)两个边界值.理论情况下,这样选取得到的两个不同透过率探测单元在全透过时响应电压为最大,在全截止时响应电压为 0.这样既可以简化设计制作工艺,又可以清晰对比测试结果.图 1 中黑色表示全截止,白色表

示全透过.

1.2 网孔图形制作

由于本文选取一种薄膜透过率为 100%, 只需考虑选取红外透过率高的基片材料即可, 无需考虑在基片表面制作薄膜; 另一种薄膜透过率为 0, 可以采用生长金薄膜遮挡辐射来实现全截止.

网孔薄膜基片的制作可采用腐蚀或剥离的方法. 制作工艺包括基片的选取和预处理、金薄膜生长和网孔图形的制作.

基片采用宝石片, 采用标准方法清洗. 在基片表面采用超真空磁控溅射设备进行金膜生长, 厚度为 0.1 μm.

1.3 方法应用

该方法应用于面阵探测器相连缺陷元识别, 步骤如下:

(1) 按前述方法制作网孔薄膜基片;

(2) 将制作好的基片安装在面阵探测器前面, 各网孔单元与面阵探测器各光敏元对准, 对准结构如图 2 所示;

(3) 用焦平面测试系统进行测试, 其中面黑体温度为 305 K 和 300 K, 面黑体距离探测器距离为 300 mm, 积分时间为 40 μs, 得到采用该方法后的面阵探测器的测试数据;

(4) 利用响应电压对面阵探测器相连缺陷元进行分析识别.

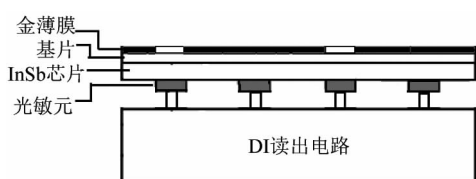


图 2 对准结构示意图
Fig. 2 Pixel alignment configuration

2 理论分析

2.1 相连缺陷元理论分析

多元相连缺陷元的响应电压与正常元响应电压基本相等, 无法采用现有焦平面阵列测试方法识别.

图 3 为面阵探测器正常单元电路原理图, 图 4 为面阵探测器多元相连缺陷元电路原理图.

由图 3 可知, 面阵探测器的正常探测单元响应电压可以表示为:

$$V_s = I_s t / C \quad (1)$$

其中, I_s 是正常探测单元的光电流, C 为读出电路单

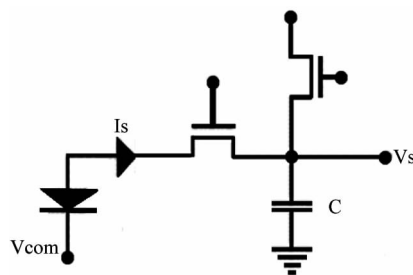


图 3 面阵探测器正常单元电路原理图
Fig. 3 Pixel configuration for IRFPA

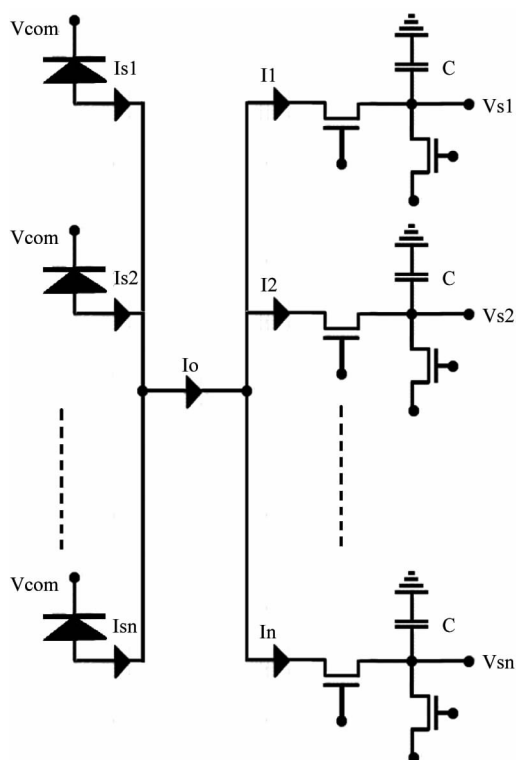


图 4 面阵探测器多元相连缺陷元电路原理图
Fig. 4 The circuit of FPA detector owing to pixels contacting

元的积分电容, t 为积分时间.

由图 4 可知, 对面阵探测器的多元相连缺陷元而言, 有:

$$V_{si} = I_i t / C \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中, I_i 是多元相连缺陷元流入读出电路的电流, V_{si} 分别是多元相连缺陷元的输出电压.

多元相连缺陷元的光电流可以表示为:

$$\sum_{i=1}^n I_i = I_o = \sum_{i=1}^n I_{si} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中, I_{si} 分别是各正常探测单元的光电流, n 为相连缺陷元个数.

理想情况下, 假定读出电路工艺水平相同,

CMOS 管间以及 CMOS 电容间无差异,则有:

$$I_i = I_o/n \quad . \quad (4)$$

将式(4)带入式(2~3),得到

$$V_{si} = \sum_{i=1}^n I_{si}t/nC \quad . \quad (5)$$

当未采用本方法时,同一测试条件下,面阵探测器各单元响应光电流相等,即:

$$I_{s1} = I_{s2} = \dots = I_{sn} = I_s \quad . \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),可以得到:

$$V_{s1} = V_{s2} = \dots = V_{sn} = V_s = I_s t/C \quad . \quad (7)$$

由式(7)可以看出,理想情况下,由于面阵探测器各探测单元响应光电流相等,所以多元相连缺陷元的响应电压与正常元响应电压相等.

读出电路工作在亚阈值区,CMOS 工艺差异性带来的非均匀性会使响应电压产生波动.

对于适宜的硅 CMOS 工艺,因器件工艺水平限制,带来了由管子尺寸等误差引起的 CMOS 管间的匹配问题和 CMOS 电容间的匹配问题.

本实验利用现有工艺水平制作的读出电路相同,且靠的很近的两只管子的匹配精度为 1%,MOS 电容匹配精度为 0.05%.

由此推断,多元相连时相邻两 MOS 器件间的最大失配值仅为 2.1%,相邻四个 MOS 器件间的最大失配值也仅为 4.2%,远小于通过焦平面阵列测试系统得到的面阵探测器正常的响应非均匀性,在面阵探测器响应电压正常波动范围内.

上述分析表明,多元相连缺陷元的响应电压与正常元响应电压基本相等,相连缺陷元无法采用现有焦平面阵列测试方法进行识别.

2.2 识别相连缺陷元理论分析

当网孔图形应用于面阵探测器时,面阵探测单元被分为两个不同透过率探测单元.面阵各探测单元因网孔中薄膜透过率不同,导致响应电压不同,从而相连缺陷元响应电压与两个不同透过率探测单元的响应电压三者均显著不同,以此来达到识别定位相连缺陷元的目的.理论分析如下:

为了更好地说明问题,以下解释为理想情况,未考虑读出电路工艺水平导致的 CMOS 管间以及 CMOS 电容间差异.

当采用本方法时,同一测试条件下,面阵探测器两个不同透过率正常探测单元的响应电压可以表示为:

$$V'_{sa} = I'_{sa}t/C \quad , \quad (8)$$

$$V'_{sb} = I'_{sb}t/C \quad , \quad (9)$$

其中, I'_{sa} 和 I'_{sb} 分别是面阵探测器两个不同透过率探测单元的响应光电流.

采用本方法后面阵探测器多元相连缺陷元的响应电压为:

$$V'_{s1} = V'_{s2} = \dots = V'_{sn} (xI'_{sa} + yI'_{sb})t/nC \quad , \quad (10)$$

其中, n 为面阵探测器多元相连缺陷元包含的总探测单元个数, x 和 y 分别是面阵探测器多元相连缺陷元包含的两个不同透过率探测单元的个数, x 与 y 之和等于 n .

由于采用本方法后面阵探测器两个不同透过率探测单元的响应光电流不相等,即:

$$I'_{sa} \neq I'_{sb} \quad , \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),可以得到

$$V'_{s1} = V'_{s2} \neq V'_{sa} \neq V'_{sb} \quad . \quad (12)$$

由式(12)可以看出,面阵探测器多元相连缺陷元的响应电压是相对应的面阵探测器两个不同透过率探测单元的响应电压之和的平均值,三者呈阶梯型,只要保证读出电路工艺水平导致的非均匀性波动值远小于三者中相邻两者差值,相连缺陷元可被明显识别.因此采用本方法可以显著识别面阵探测器相连缺陷元.

3 测试结果与验证

文中采用的 InSb 面阵探测器是通过倒装焊技术借助钢柱阵列将研制好的 InSb 阵列芯片和读出电路阵列互连混成的.

依据红外焦平面阵列特性参数测试技术规范,利用焦平面阵列测试系统对面阵探测器性能进行测试.不失一般性,本文重点对四元及以下相连缺陷元进行了研究.

为了便于结果比较,给出相连缺陷元均在某行上的测试结果,如图 5 所示.

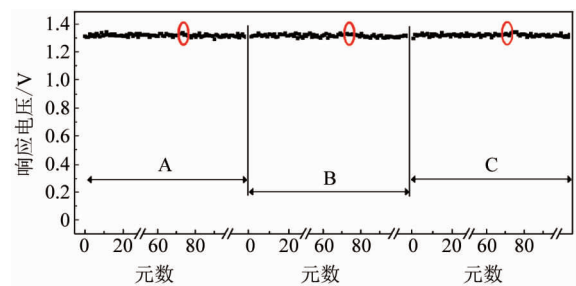


图 5 面阵探测器光电信号
Fig. 5 Response Voltage of FPA

图 5 中 A、B、C 区域分别为隐含了二元、三元、

四元相连缺陷元的区域,其中,环形标记为相连缺陷元位置.由图 5 的 A、B、C 区域可以看出,未发现异常元.经计算,面阵探测器响应电压平均值为 1.332 V,响应非均匀性为 10%.

表 1 为利用本方法识别出的面阵探测器相连缺陷元光电信号实验数据.

表 1 面阵探测器相连缺陷元光电信号

Table 1 Parameters of connected defective elements in FPA detector

相连缺陷元	响应电压/V			
两元相连	1.330	1.335		
三元相连	1.327	1.329	1.334	
四元相连	1.331	1.327	1.330	1.336

从表 1 可以看出,多元相连缺陷元的响应电压最大波动为 0.4%,远小于 InSb 面阵探测器响应非均匀性 10%,在面阵探测器响应电压正常波动范围内,无法得到识别,这与前面相连缺陷元理论分析相吻合.

采用本方法后面阵探测器测试结果如图 6 所示.

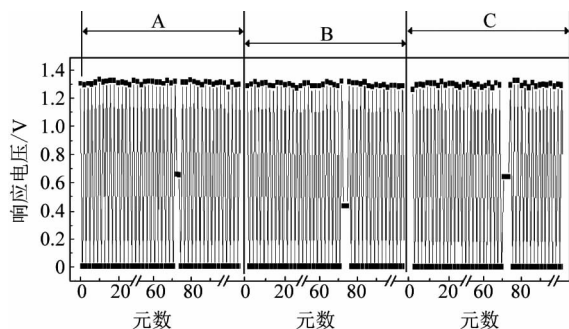


图 6 采用本方法后面阵探测器光电信号

Fig. 6 Response voltage of FPA by this method

相对应于表 1 中相连缺陷元位置,表 2 实验数据为图 6 对应的采用本方法后的面阵探测器该相连缺陷元光电信号的实验数据.

表 2 采用本方法后面阵探测器该相连缺陷元光电信号

Table 2 Response voltage of connected defective elements in FPA by this method

	两个不同透 过率探测单元	两元相连 缺陷元	三元相连 缺陷元	四元相连 缺陷元
理论响应 电压/V	1.330	0	0.665	0.444
实际响应 电压/V	1.322	0.023	0.662	0.439

从图 6 和表 2 可以看出,采用本方法后,多元相

连缺陷元响应电压和正常元平均响应电压之间存在一定的比值,相连缺陷元响应电压明显不同于两个不同透过率探测单元的响应电压,缺陷元得以被显著识别.表 2 测试数据经计算可得,两元相连缺陷元和正常元响应电压之比约为 1/2,三元之比约为 1/3,四元之比约为 1/2.该结果和以下分析相吻合:由于不同透过率探测单元全截止时响应电压为 0,即 $I'_{sb} = 0$,将此代入式(10),可得:

两元相连时,即 $n = 2$,只有一种情况, $x = 1, y = 1$,此时 $V'_{s1} = V'_{s2} = I'_{sa}t/2C$,即两元相连缺陷元响应电压值是正常元平均响应电压值的 1/2,图 6 和表 2 中显示与此情况相符.

三元相连时,即 $n = 3$,有两种情况,当 $x = 1, y = 2$ 时, $V'_{s1} = V'_{s2} = 2I'_{sa}t/3C$;当 $x = 2, y = 1$ 时, $V'_{s1} = V'_{s2} = I'_{sa}t/3C$,即三元相连缺陷元响应电压值是正常元平均响应电压值的 2/3 或 1/3.当三元相连缺陷元形状为直线型时,可能会出现上述两种情况中的任意一种,图 6 和表 2 中显示正好为第二种情况.

四元相连时,即 $n = 4$,有三种情况,当 $x = 1, y = 3$ 时, $V'_{s1} = V'_{s2} = I'_{sa}t/4C$;当 $x = 2, y = 2$ 时, $V'_{s1} = V'_{s2} = I'_{sa}t/2C$;当 $x = 3, y = 1$ 时, $V'_{s1} = V'_{s2} = 3I'_{sa}t/4C$,即四元相连缺陷元响应电压值是正常元平均响应电压值的 1/4 或 1/2 或 3/4.当四元相连缺陷元形状为直线型时,只会出现第二种情况,图 6 和表 2 中显示与此情况相符.

图 6 只给出了相连缺陷元恰好在面阵探测器行输出的结果.但事实上,相连缺陷元的形状和位置均不相同.根据缺陷元的个数,缺陷元形状可分为:二元相连为直线型,三元相连为直线型、L 型,四元相连为直线型、L 型和 T 型等.

为了能清晰的给出相连缺陷元详细信息,进一步显示该方法功能,对面阵探测器测试数据利用 MATLAB 软件进行分析处理,得到的相连缺陷元识别定位图,如图 7 所示.图 7 给出了典型三元相连缺陷元的形状和位置.由图 7 可以看出,左上方三元相连缺陷元形状为直线型,中心点坐标为(24,30);右下方三元相连缺陷元形状为 L 型,拐角点坐标为(95,74).

从图 7 中可以看出,此方法识别定位效果较好,相连缺陷元均可被清晰的检测识别,而且可进一步得到缺陷元的形状和位置特征.由此可见,借助改变面阵探测器光电响应,可以达到显著识别定位相连缺陷元的目的.

由表 2 还可以看出,两个不同透过率探测单元

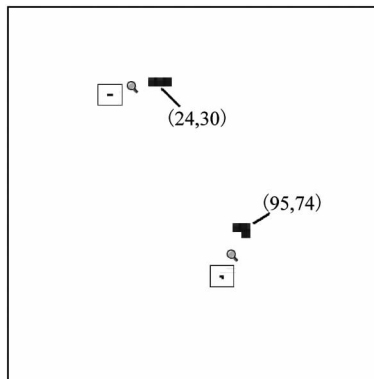


图7 采用该方法得到的相连缺陷元识别定位图
Fig.7 Image of connected defective elements identification and orientation by using the proposed method

的实际响应电压与理论值存在偏差. 理论分析认为, 理想情况下, 全截止时探测器无响应, 响应电压应该为 0 V. 测试结果显示, 实际响应电压为 0.023 V, 这与理论分析中理想情况不符. 进一步研究发现, 即使将探测器该探测单元全部遮挡, 该探测单元仍存在响应电压. 经分析认为, 这种现象是由于探测器各探测单元之间存在串扰造成的. 由于相邻探测单元存在响应, 因此相邻探测单元的载流子会扩散到该探测单元形成电压. 但从实验数据来看, 这并不影响该方法的有效性.

4 结论

针对采用现有面阵测试方法无法识别相连缺陷元的特点, 提出了借助改变面阵探测器光电响应的方法来实现相连缺陷元的识别定位. 研究表明, 本方法使面阵探测器分为两个不同透过率探测单元, 多元相连缺陷元响应电压是相对应的两个不同透过率探测单元响应电压之和的平均值, 采用 MATLAB 软件进行分析处理可以得到相连缺陷元图的详细信息. 采用本方法可以显著识别定位面阵探测器相连缺陷元, 避免了红外系统图像失真, 特别是避免了新一代空空导弹目标丢失, 对新一代空空导弹的命中率提升具有重大意义.

References

- [1] HU Wei-Da, LIANG Jian, YUE Fang-Yv, *et al.* Recent progress of subwavelength photo trapping HgCdTe infrared detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡伟达, 梁健, 越方禹, 等. 新型亚波长陷光结构 HgCdTe 红外探测器研究进展. *红外与毫米波学报*) 2016, **35**(1): 25 - 36.
- [2] Qiu W C, Hu W D. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction characterization of infrared photodetectors[J]. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(2): 027001.
- [3] Rogalski A. *Infrared detectors* [M]. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2011.
- [4] Photodetectors based on the cadmium-mercury-tellurium epitaxial system, edited by A. L. Aseev (SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 2012).
- [5] Qiu W, Hu W, Lin C, *et al.* Surface leakage current in 12.5 μm long-wavelength HgCdTe infrared photodiode arrays[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**: 828 - 831.
- [6] Hu W, Ye Z, Liao L, *et al.* A 128 \times 128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultra-low spectral crosstalk[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**: 5130 - 5133.
- [7] Bowden N, Brittain S, Evans A G, *et al.* Spontaneous formation of ordered structures in thin films of metals supported on an elastomeric polymer[J]. *Nature*, 1998, **393**(14): 146 - 149.
- [8] Genzer J, Groenewold J. Soft matter with hard skin: from skin wrinkles to templating and material characterization [J]. *Soft Matter*, 2006, **2**: 310 - 323.
- [9] Huck W, Bowden N, Onck P, *et al.* Ordering of spontaneously formed buckles on planar surfaces [J]. *Langmuir*, 2000, **16**(7): 3497 - 3501.
- [10] MENG Qing-Duan, LV Yan-Qiu, LU Zheng-Xiong, *et al.* Stress in InSb infrared focal plane array detector analyzed with ansys[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孟庆端, 吕衍秋, 鲁正雄, 等. InSb 红外焦平面探测器结构应力的 ANSYS 分析, *红外毫米波学报*), 2010, **29**(6): 431 - 434.
- [11] Littler C. Characterization of impurities and defects in InSb and HgCdTe using novel magneto-optical techniques [J]. *Proc. of SPIE*, 1993, **2021**: 184 - 201.
- [12] Davis M, Greiner M. Indium antimonide large-format detector arrays [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(6): 061016.
- [13] Rawe R, Martin C, Garter M, *et al.* Novel high fill-factor, small pitch, reticulated InSb IR FPA design [J]. *Proc. of SPIE*, 2005: 5783.