

## InSb 面阵探测器铟柱缺陷成因与特征研究

侯治锦<sup>1,2,3\*</sup>, 傅莉<sup>1</sup>, 鲁正雄<sup>2,3</sup>, 司俊杰<sup>2,3</sup>, 王巍<sup>2,3</sup>, 吕衍秋<sup>2,3</sup>

(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:** 通过基于正性光刻胶的不同像元尺寸铟柱阵列及器件制备, 研究 InSb 面阵探测器铟柱缺陷成因与特征. 分别研制了像元尺寸为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  的面阵探测器的铟柱阵列, 并制备出 InSb 面阵探测器. 利用高倍光学显微镜和焦平面测试系统对制备的芯片表面形貌、器件连通性及性能进行了检测与分析. 研究结果表明: 当像元尺寸为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  时, 芯片表面形貌和器件连通性测试结果较好; 随着像元尺寸减小, 芯片表面会出现铟柱相连或铟柱缺失缺陷, 器件连通性测试结果与表面形貌相吻合. 铟柱相连缺陷是由光刻剥离时残留铟渣引起的铟相连造成; 铟柱缺失缺陷是由光刻时残留光刻胶底膜引起的铟柱缺失造成. 器件相连缺陷元的响应电压与正常元基本相同, 缺失缺陷元的响应电压基本为 0, 其周围最相邻探测单元响应电压相比正常元增加了约 25%. 器件缺陷元的研究结果, 对通过优化探测器制作水平提升其性能具有重要参考意义.

**关键词:** 面阵探测器; 铟柱缺陷; 铟柱阵列; 缺陷

中图分类号: TN215 文献标识码: A

## Causes and characteristics of indium bump defects in InSb focal plane array

HOU Zhi-Jin<sup>1,2,3\*</sup>, FU Li<sup>1</sup>, LU Zheng-Xiong<sup>2,3</sup>, SI Jun-Jie<sup>2,3</sup>, WANG Wei<sup>2,3</sup>, LV Yan-Qiu<sup>2,3</sup>

(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:** In order to study the causes and characteristics of indium bump defects in infrared focal plane arrays (IRFPA), during the fabrication of InSb IRFPAs, indium bumps of different pixel sizes were studied using positive photoresist. Then, the surface morphology of the chip, the connectivity of the detector, and the performance of the detector were characterized using an optical microscope and an FPA test stand, respectively. The results show that the chip surface and detector connectivity of the  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  pixel size sample is better than other chips. Due to the small pixel size, the surface topography of the chip is connected or missing to the defective indium bump. The connectivity test results are consistent with the test results of the indium raised surface topography. The connected defects are due to the surface of the indium bumps caused by indium remnants during lithography and stripping. The missing defects are due to the lack of elemental indium bumps caused by positive photoresist residual during photolithography. The response voltage of the connected faulty component is basically the same as the response voltage of the normal component. The response voltage of the defect defective element is zero, and the response voltage of the nearest neighbor element is increased by about 25% compared with the normal element. The result has important reference significance for improving the performance of the FPA detectors by optimizing the production process.

收稿日期: 2017-11-17, 修回日期: 2018-01-20

Received date: 2017-11-17, revised date: 2018-01-20

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, 主要从事红外焦平面探测器研究.

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: changhui090504@126.com

**Key words:** focal plane array , indium bump defects , indium bump arrays , defective

**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,被广泛应用于国防武器、红外遥感和气象环境等军民两用领域<sup>[1-5]</sup>。响应波段在 $1 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 的碲化铟(InSb)<sup>[6-43]</sup>面阵探测器具有灵敏度高(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<sup>[14-16]</sup>)等优点,目前已在中波凝视成像和空空导弹制导领域占据主导地位<sup>[17-20]</sup>。

InSb面阵探测器铟柱阵列通常被用于将研制好的InSb阵列芯片和读出电路阵列互连混成InSb面阵探测器。铟柱主要有两个方面的作用:一是连通面阵探测器InSb阵列芯片和读出电路,使两者良好导通;二是提高面阵探测器用InSb材料和Si材料之间的匹配性,减少两者间应力分布的不均匀性。

受到材料缺陷、制作工艺水平的影响,面阵探测器不可避免地存在着缺陷元。随着面阵探测器规模越来越大,芯片像元尺寸却大幅减小,铟柱的尺寸也随之减小,密度随之大幅增加,这无疑增加了铟柱的制备难度,器件工艺影响越发显著,铟柱缺陷出现的几率也大幅提高<sup>[21-23]</sup>。铟柱缺陷会对器件性能及后续应用产生严重的影响。例如铟柱缺失可能会形成盲元及盲元簇,而新一代空空导弹或红外系统对盲元及盲元簇的要求尤其严格,这也导致了大量含缺失缺陷的面阵探测器无法满足应用要求。而且当缺失缺陷增大到一定程度时,将影响器件整体的应力分布,进而影响器件的可靠性,甚至器件会产生裂纹而报废。同样,当含有铟柱相连缺陷的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。

在面阵探测器研制及后续批量生产中,一方面需对面阵探测器缺陷元成因进行研究;另一方面需对面阵探测器进行测试分析,研究面阵探测器缺陷元特征。目前的缺陷元研究多集中在缺陷元的检测原理、检测方法和补偿算法等方面<sup>[24]</sup>,但鲜见对器件缺陷元的相关报道。缺陷元研究的缺失制约着面

阵探测器的性能提升,严重影响着系统性能。为此,本文通过基于正性光刻胶的不同像元尺寸铟柱阵列及器件制备,研究面阵探测器铟柱缺陷成因与特征,旨在完善面阵探测器缺陷元的研究,为提高面阵探测器制作水平减少缺陷元提供依据,以期提高探测器的综合性能,满足系统应用需要。

## 1 实验

实验样品InSb阵列芯片先作如下处理:采用n型InSb衬底,通过扩散Cd得到P型层,利用光刻、腐蚀得到台面;台面钝化后蒸镀铬金层,再利用光刻、腐蚀工艺得到电极。

器件制备时,将研制出的InSb阵列芯片和读出电路阵列同时光刻出铟柱窗口、蒸镀铟膜,通过剥离工艺得到铟柱阵列,再通过倒装焊实现互连。

实验设计了3种像元尺寸( $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ )的InSb阵列芯片的铟柱正性光刻胶版图,InSb阵列芯片尺寸和涂胶厚度相同。

InSb阵列芯片铟柱阵列制备中除显影根据芯片表面形貌调整外,其他条件相同,具体处理如下:

(1)光刻:包括涂胶、曝光显影等工序。根据探测器整体结构要求,铟柱高度确定为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,经综合考虑,实验中正性光刻胶采用AZ4620,光刻胶制作厚度约为铟柱高度的2倍。主要处理参数为:旋涂转速为1200转/min,时间为60s。

(2)铟膜生长:将制作好铟柱窗口的芯片放入镀膜机中铟膜生长,铟膜的厚度通过控制铟量和蒸发时间的方法来控制。

(3)铟柱剥离:将镀好铟膜的芯片置于丙酮溶液中将光刻胶彻底溶解,必要时可加热来辅助剥离。浸泡的时间取决于所镀金属薄膜的厚度。最后依次放入乙醇溶液和去离子水中清洗,用来去除残余的试剂。

在倒焊互连前,首先采用型号为NTY-MV-4000A高倍光学显微镜对InSb阵列芯片和读出电路阵列进行检测,标记缺陷;然后器件进行倒焊互连、装配封装,封装好的器件采用红外焦平面探测器连通性测试系统进行连通性测试。

倒焊互连好的器件经底部填胶、减薄抛光和蒸镀减反膜后进行装配封装,封装好的焦平面探测器

采用型号为 OPTDET 的红外焦平面探测器响应测试系统对焦平面探测器钨柱缺陷元进行测试.

红外焦平面探测器响应测试系统采用面黑体, 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  $\mu$ s.

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌

在面阵探测器倒焊互连前, 采用高倍光学显微镜对 InSb 阵列芯片和读出电路阵列进行检测发现:

当像元尺寸为 50  $\mu$ m  $\times$  50  $\mu$ m 时, 钨柱阵列表面形貌较好; 当像元尺寸为 30  $\mu$ m  $\times$  30  $\mu$ m 时, 钨柱阵列表面形貌变差: 出现钨柱相连缺陷, 图 1(a) 所示为钨柱相连缺陷显微镜图; 当像元尺寸为 15  $\mu$ m  $\times$  15  $\mu$ m 时, 钨柱阵列表面形貌明显更差, 除了刚才缺陷外, 出现钨柱缺失缺陷, 图 1(b) 所示为钨柱缺失缺陷显微镜图. 标记钨柱缺陷.

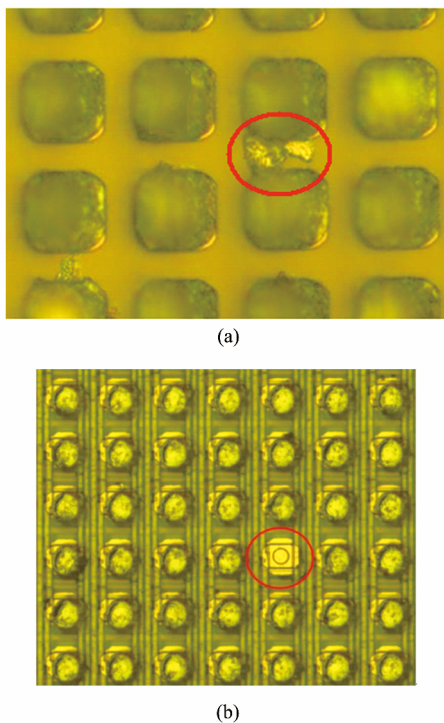


图 1 钨柱缺陷显微镜图 (a) 钨柱相连缺陷 (b) 钨柱缺失缺陷  
Fig. 1 The microscope images of defective indium bump (a) Connecting defective elements, (b) Missing defective elements

图 2 是像元尺寸为 30  $\mu$ m  $\times$  30  $\mu$ m 的面阵探测器正性光刻胶显影后的 SEM 图. 表 1 为面阵探测器不同显影时间下的正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  值. 如图 2 和表 1 所示, 当像元尺寸为 50  $\mu$ m  $\times$  50  $\mu$ m

时, 显影时间为 75 s, 正性光刻胶与基底间夹角约为 93.2°; 当像元尺寸为 30  $\mu$ m  $\times$  30  $\mu$ m 时, 显影时间为 85 s, 正性光刻胶与基底间夹角约为 105.3°; 当像元尺寸为 15  $\mu$ m  $\times$  15  $\mu$ m 时, 显影时间为 93 s, 正性光刻胶与基底间夹角约为 113.6°. 随着显影时间的增长, 正性光刻胶与基底间夹角逐渐增大.

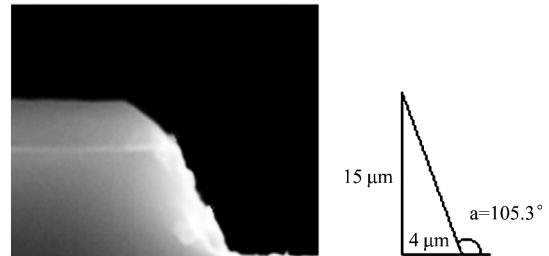


图 2 像元尺寸为 30  $\mu$ m  $\times$  30  $\mu$ m 的面阵探测器正性光刻胶显影后的 SEM 图

Fig. 2 The SEM of positive photoresist development in FPA detector with the size of 30  $\mu$ m  $\times$  30  $\mu$ m

表 1 面阵探测器不同显影时间下的正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  值

Table 1 The angle  $\alpha$  between the positive photoresist and the substrate during different time of photoresist development in FPA detector

像元尺寸	50 $\mu$ m $\times$ 50 $\mu$ m	30 $\mu$ m $\times$ 30 $\mu$ m	15 $\mu$ m $\times$ 15 $\mu$ m
显影时间	75 s	85 s	93 s
正性光刻胶与基底间夹角 $\alpha$	93.2°	105.3°	113.6°

基于正性光刻胶得到的钨柱剥离示意图如图 3 所示.

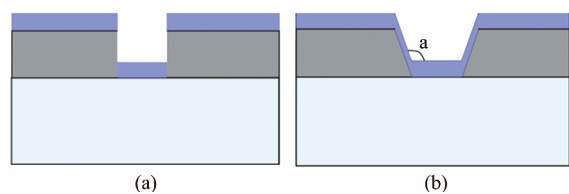


图 3 (a) 理想 (b) 实际钨柱剥离示意图

Fig. 3 (a) Ideal (b) Real image of indium bump by lift-off process

如图 3 所示, 理想正性光刻胶窗口的剖面呈“直角”形; 但实际正性光刻胶窗口的剖面呈“倒八字”形, 即光刻胶侧壁图形上宽下窄, 此时图形侧壁上存在一层非常薄的金属膜. 正性光刻胶与基底之间的夹角为  $\alpha$ . 同一设备在相同的曝光参数下, 曝光对正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  影响相同, 因此本文不考虑曝光因素影响. 影响正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  的主要因素有基底尺寸、像元尺寸、涂胶厚度和

显影时间. 显影时间直接影响正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$ . 当基底尺寸、像元尺寸和涂胶厚度一定时, 正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  随着显影时间的增长而变大. 基底尺寸、像元尺寸和涂胶厚度间接影响正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$ . 当基底尺寸和涂胶厚度一定时, 为了得到较好的芯片表面形貌, 显影时间会随着像元尺寸的减小而增长, 此时正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  也会随着显影时间的增长而变大. 同理, 当像元尺寸和涂胶厚度一定时, 为了得到较好的芯片表面形貌, 显影时间会随着基底尺寸的增大而增长, 此时正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  同样会变大. 当正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  变大时, 一方面会影响剥离液渗透溶解光刻胶, 另一方面影响淀积在光刻胶侧壁上的金属随着光刻胶的溶解一起脱落, 这最终会影响剥离效果.

文中钨柱缺陷现象与上述理论分析相吻合:

当像元尺寸为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  时, 钨柱阵列表面形貌较好. 这是因为此时像元尺寸较大, 正性光刻胶显影正常, 正性光刻胶侧壁图形较陡, 正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  为  $93.2^\circ$ , 近似于直角, 侧壁图形接近于理想的光刻胶图形, 有利于剥离;

当像元尺寸为  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  或  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  时, 为了得到较好的芯片表面形貌, 实验中会通过增加显影时间的方法来保证整个芯片显影干净, 此时过度显影, 这会造成正性光刻胶与基底间夹角  $\alpha$  增大, 分别为  $105.3^\circ$  和  $113.6^\circ$ . 剥离液渗透溶解光刻胶困难, 在钨柱制备时, 图形侧壁上存在较厚的金属膜, 在剥离时留存在芯片表面, 这正与前面理论分析相吻合. 图 1(a) 中芯片表面的钨柱相连缺陷正是由于光刻胶过度显影, 造成钨柱剥离时芯片表面钨渣残留, 导致了钨柱相连缺陷的形成.

当像元尺寸为  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  时, 随着像元尺寸更小、像元间距更小, 显影会更加困难. 通过增加显影时间的方法也无法保证整个芯片显影干净, 芯片局部很小的区域存在着光刻胶显影未干净的现象, 导致芯片表面存在薄薄一层底膜. 在钨柱剥离时, 底膜上面的钨柱会一起去掉, 导致钨柱缺失, 这也解释了像元尺寸为  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  时探测器芯片表面出现的钨柱缺失缺陷的原因. 图 1(b) 中芯片表面存在钨柱缺失缺陷正是由于光刻胶未显影干净、仍存在薄薄一层底膜造成的.

可见, 在实际更大规模的面阵探测器研制中, 随着面阵探测器规模更大、像元尺寸更小, 芯片表面将会出现钨柱相连或钨柱缺失缺陷.

## 2.2 连通性测试

依据红外焦平面阵列特性参数测试技术规范, 选取了具有典型表面形貌的面阵探测器进行连通性测试, 结果见表 2.

表 2 典型表面形貌的面阵探测器连通性测试结果

Table 2 The test results of connectivity corresponding to typical surface topography in FPA detector

器件号	像元尺寸	倒焊互连	测试结果	芯片表面形貌
1	$50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$	正常	整帧平, 无坏元	好
2	$30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$	正常	整帧平, 无坏元	存在少量钨柱相连
3	$15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$	正常	波形异常, 局部未连通	存在少量钨柱缺失钨柱相连

从表 2 可以看出, 器件 1 芯片表面形貌好的器件倒焊互连和测试结果正常. 器件 2 中芯片表面有明显的钨残留导致钨柱相连的器件在倒焊互连中显示正常, 无法进行识别, 只能在后续器件性能测试中检测. 器件连通性测试结果与芯片表面形貌相吻合. 器件 3 中倒焊互连显示正常, 除出现器件 2 情况外, 测试结果显示局部有未连通元, 这与前面表面形貌分析中出现的无钨柱现象相吻合, 由于没有钨柱, 所以器件测试时显示无信号输出, 存在未连通元.

由此可知, 面阵探测器钨柱缺陷主要有两种状态, 第 I 类, InSb 阵列芯片或读出电路表面存在钨柱缺失缺陷; 第 II 类, InSb 阵列芯片或读出电路存在钨柱相连缺陷. 图 4 所示为面阵探测器钨柱缺陷结构示意图, 其中 a 处为钨柱缺失缺陷, b 处为钨柱相连缺陷.



图 4 面阵探测器钨柱缺陷结构示意图

Fig. 4 The defective indium bump configuration in FPA detector

由于无论哪种像元尺寸的面阵探测器, 钨柱缺陷结构示意图均相同, 因此选取了具有典型特征的像元尺寸为  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  的面阵探测器进行响应电压测试.

## 2.3 响应电压

依据红外焦平面阵列特性参数测试技术规范,

采用红外焦平面响应测试系统对像元尺寸为  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  的面阵探测器缺陷元进行测试. 表 3 为计算得到的面阵探测器光电信号实验数据.

表 3 面阵探测器光电信号

Table 3 Parameter of FPA detector with the size of  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$

像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的面阵探测器	响应电压 平均值/V	响应非 均匀性/%
测试结果	1.169	12.1

### 2.3.1 相连缺陷元响应电压

面阵探测器钨柱相连缺陷元测试结果放大图见图 5 所示.

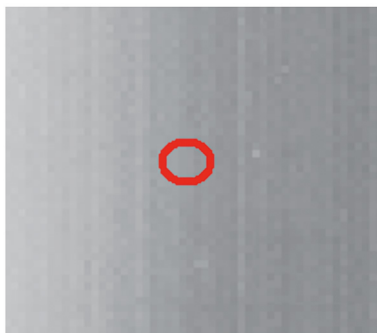


图 5 面阵探测器钨柱相连缺陷元测试结果放大图

Fig. 5 The zoom of test result of indium bump connected defective elements in FPA detector

从图 5 可以看出,采用面阵探测器响应测试系统进行测试时,标记的钨柱相连缺陷元灰度图与正常元灰度图相同.

经测试得到钨柱相连缺陷元的响应电压分别为  $1.167\ \text{V}$  和  $1.175\ \text{V}$ . 相比面阵探测器响应电压平均值  $1.169\ \text{V}$ , 最大波动值为  $0.5\%$ . 该波动主要来自以下两个方面:一是面阵探测器存在响应非均匀性;二是探测单元之间存在串扰. 该波动远小于 InSb 面阵探测器响应非均匀性  $12.1\%$ , 在面阵探测器响应电压正常波动范围内. 测试结果表明,钨柱相连缺陷元的响应电压与正常元响应电压基本相等,这可以用下列相连缺陷理论公式<sup>[25]</sup>解释:

$$V_{s1} = V_{s2} = V_s = I_s t / C \quad (1)$$

其中:  $V_{s1}$  和  $V_{s2}$  分别是相连缺陷元的输出电压;  $V_s$  是正常探测单元响应电压;  $I_s$  是正常探测单元的光电流,  $C$  为读出电路单元的积分电容,  $t$  为积分时间.

由式(1)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,所以相连缺陷元的响应电压与正常元响应电压相等,这与测试结果相

吻合.

### 2.3.2 缺失缺陷元响应电压

面阵探测器钨柱缺失缺陷元测试结果放大图见图 6 所示.

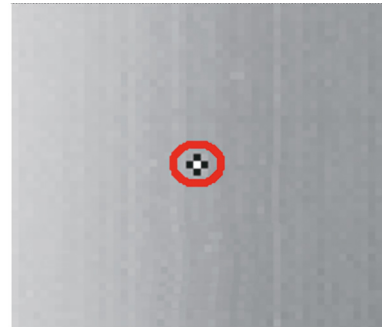


图 6 面阵探测器钨柱缺失缺陷元测试结果放大图

Fig. 6 The zoom of test result of indium bump missing defective elements in FPA detector

从图 6 可以看出,钨柱缺失缺陷元的灰度图显示为白色,其周围探测单元灰度图显示为黑色. 图 6 显示,采用焦平面探测器响应测试系统进行测试时,缺失缺陷元及其周围探测单元的响应电压与正常元均明显不同.

表 4 为面阵探测器钨柱缺失缺陷元及其周围探测单元的光电信号实验数据.

表 4 面阵探测器钨柱缺失缺陷元及其周围探测单元光电信号

Table 4 Parameter of indium bump missing defective elements and adjacent elements in FPA detector

缺失缺陷元及其周围探测单元	响应电压/V		
	1.172	1.404	1.161
测试结果	1.476	0.055	1.501
	1.168	1.396	1.169

由表 4 可以看出,钨柱缺失缺陷元的响应电压为  $0.055$ ; 相比于正常探测单元响应电压平均值  $1.169\ \text{V}$ , 钨柱缺失缺陷元周围最相邻探测单元的平均响应电压为  $1.444\ \text{V}$ , 计算可知,钨柱缺失缺陷元周围最相邻探测单元的平均响应电压是正常探测单元响应电压的  $1.235$  倍.

图 7 为面阵探测器钨柱缺失缺陷元结构及电路原理图.

如图 7 所示,对面阵探测器缺失缺陷元周围某探测单元而言,有:

$$V_s' = I_s' t / C \quad (2)$$

其中  $I_s'$  是流入缺失缺陷元周围某探测单元读出电路积分电容上的电流,  $V_s'$  是缺失缺陷元周围某探测

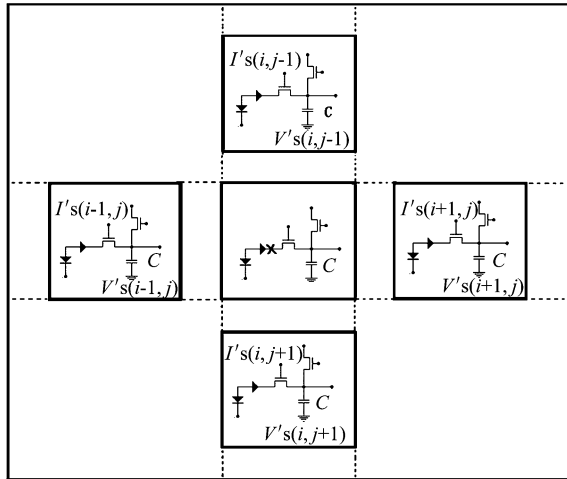


图7 面阵探测器钨柱缺失缺陷元结构及电路原理图  
Fig.7 The configuration and circuit of indium bump missing defective elements in FPA detector

单元的输出电压.

理想情况下,缺失缺陷元周围某探测单元的光电流相等,可以表示为:

$$I_s' = I_s + I_q \quad (3)$$

其中  $I_q$  是缺失缺陷元流入其周围探测单元的光电流.

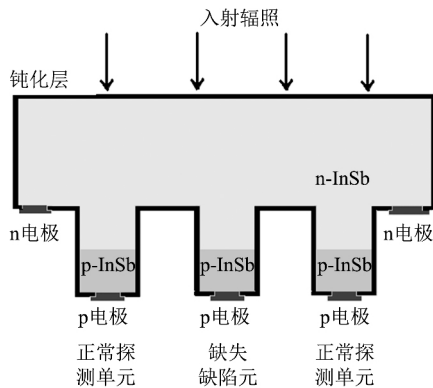


图8 InSb 阵列沿缺失缺陷元中心水平方向剖面图  
Fig.8 The InSb array along the center of missing defective element horizontal cross-sectional view

图8所示为 InSb 阵列沿缺失缺陷元中心水平方向剖面图. 如图8所示,对于正常的背入射 InSb 面阵探测器,每个 p 型台面均与 n 型 InSb 形成 pn 结. 光照后,有源区产生的光生空穴和光生电子扩散到相应像元 pn 结处,空穴在 pn 结电场的作用下漂移至 p 电极,被 p 电极抽取,而电子被 n 电极收集. 探测器存在缺失缺陷元时,即当探测单元的钨柱缺失时,漂移至该缺失缺陷元 p 型台面的空穴无法被

及时抽取,浓度不断增加,导致该处电势不断增大,使得 pn 结内建电场不断减小,最终 p 型台面和 n 型 InSb 之间所形成的电场与 pn 结内建电场大小相等但方向相反. 此后,缺失缺陷元的 p 型台面区电势不再变化. 但由于光照一直进行,后续产生的光生空穴不能被缺失缺陷元所收集,本应被缺失缺陷元收集的空穴堆积在缺失缺陷元 pn 结 n 型一侧,使得该处与最相邻的四个探测单元之间均存在较大的空穴浓度梯度. 因此,缺失缺陷元处堆积的空穴会扩散至这最相邻的四个探测单元的 pn 结附近,并被它们的 pn 结电场扫至相应的 p 型台面区,最终被各 p 电极所收集. 由于与缺失缺陷元最相邻的四个探测单元,关于缺失缺陷元具有中心对称性,因此,缺失缺陷元有源区产生的光生载流子被最相邻的四个探测单元等分,导致各探测单元响应电压均增加了约 25%. 因此可以得到:

$$I_q \approx I_s/4 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得:

$$I_s' \approx 5I_s/4 \quad (5)$$

分别将式(3)、(4)、(5)代入式(2)可得:

$$V_s' = V_s + V_q \quad (6)$$

$$V_q \approx V_s/4 \quad (7)$$

$$V_s' \approx 5V_s/4 \quad (8)$$

由式(5)、(8)可以看出,周围最相邻探测单元光电流增加了约 1/4,即缺失缺陷元周围最相邻探测单元光电流相比正常探测单元增加了约 25%. 因此,理想情况下,缺失缺陷元的响应电压为 0,其周围最相邻探测单元响应电压相比正常元增加了约 25%.

由图7可得钨柱缺失缺陷元周围最相邻探测单元的平均响应电压公式为:

$$V_s' = [V_s'(i-1, j) + V_s'(i+1, j) + V_s'(i, j-1) + V_s'(i, j+1)]/4 \quad (9)$$

将表4中数据代入式(9),可得  $V_s' \approx 1.444$

计算得到的钨柱缺失缺陷元周围最相邻探测单元的平均响应电压值 1.444 V 是正常探测单元响应电压平均值 1.169 V 的 1.235 倍,与 5/4 相当接近,该结果验证了上述理论分析. 表4中实验数据与理论值存在偏差,这是由于一方面缺失缺陷元周围某探测单元的光电流不相等,另一方面各相邻探测单元之间均存在串音.

从表4还可以看出,相比正常探测单元,测试结果中周围探测单元的响应电压最小波动值为 19.4%,最大波动值达到 28.4%,远远超出了面阵

探测器响应非均匀性 12.1% ,这表明钨柱缺失不仅会形成盲元及盲元簇 ,而且对器件非均匀性及后续应用均产生非常不利的影响。

### 3 结论

面阵探测器钨柱缺陷成因与特征研究具有非常高的理论价值和实际应用意义。针对近些年来国内鲜见对器件缺陷元的相关研究报道 ,本文通过基于正性光刻胶的不同像元尺寸钨柱阵列及器件制备 ,研究了面阵探测器钨柱缺陷成因与特征。主要结论如下:

(1) 当像元尺寸为  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  时 ,芯片表面形貌和器件连通性测试结果较好。

(2) 随着像元尺寸减小 ,芯片表面会出现钨柱相连或钨柱缺失缺陷 ,器件连通性测试结果与表面形貌相吻合。

(3) 钨柱相连缺陷是由光刻剥离时残留钨渣引起的钨相连造成;钨柱缺失缺陷是由光刻时残留光刻胶底膜引起的钨柱缺失造成。

(4) 器件相连缺陷元的响应电压与正常元基本相同 ,缺失缺陷元的响应电压基本为 0 ,其周围最相邻探测单元响应电压相比正常元增加了约 25% 。

研究结果对通过提高面阵探测器制作水平减少缺陷元 ,进而提升探测器性能具有重要参考意义。

致谢

感谢西安电子科技大学杨翠老师对缺失缺陷元响应理论方面的指导!

### References

- [1] Lei W , Antoszewski J , Faraone L. Progress , challenges , and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors [J]. *Appl. Phys. Rev* , 2015 , **2**: 041303.
- [2] Hu W D , Liang J , Yue F Y , et al. Recent progress of sub-wavelength 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.
- [3] Rogalski A , Antoszewski J , Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *J. Appl. Phys.* 2009 , **105**: 091101.
- [4] Wang J , Fang H , Wang X , et al. Recent Progress on Localized Field Enhanced Two-dimensional Material Photodetectors from Ultraviolet [J]. *Visible to Infrared , Small* , 2017 , **13**(35) : 1700894.
- [5] Qiu W , Hu W. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction characterization of infrared photodetectors [J]. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy* , 2015 , **58**(2) : 027001.
- [6] Rogalski A. Infrared Detectors [M]. New York , CRC Press , 2011.
- [7] Aseev A L. Photodetectors Based on the Cadmium-Mercury-Tellurium Epitaxial System [M]. SB RAS Publishing House , Novosibirsk , 2012.
- [8] Algarni H , Al-Hagan O A , Bouarissa N , et al. Dependence on pressure of the elastic parameters and microhardness of InSb [J]. *Infrared Physics & Technology* , 2017 , **86**: 176-180.
- [9] Zhang Li-Wen , Meng Qing-Duan , Zhang Xiao-Ling , et al. Thermal bucking analysis in InSb focal plane arrays detector [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology* , 2013 , **27**(6) : 1809-1813.
- [10] Meng Qing-duan , Zhang Xiao-ling , Lv Yan-qiu , et al. Local delamination of InSb IRFPAs in liquid nitrogen shock tests , [J]. *Infrared Physics & Technology* , 2017 , **86**: 207-211.
- [11] Zhang Xiao-Ling , Meng Qing-Duan , Zhang Li-Wen , et al. Negative electrode structure design in InSb focal plane arrays detector for deformation reduction [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology* , 2014 , **28**(6) : 2281-2285.
- [12] Melik Yazici , Omer Ceylan , Atia Shafique , et al. Digital readout integrated circuit ( DROIC ) implementing time delay and integration ( TDI ) for scanning type infrared focal plane arrays ( IRFPAs ) [J]. *Infrared Physics & Technology* , 2016 , **79**: 101-112.
- [13] Omer Ceylan , Atia Shafique , Abdurrahman Burak , et al. A new high dynamic range ROIC with smart light intensity control unit [J]. *Infrared Physics & Technology* , 2017 , **82**: 161-169.
- [14] Sun C H , Zhang P , Zhang T N , et al. ZnS Thin Films Grown by Atomic Layer Deposition on GaAs and HgCdTe Substrates at Very Low Temperature [J]. *Infrared Physics & Technology* , 2017 , **85**: 280-286.
- [15] Qiu W , Hu W , Lin C , et al. Surface Leakage Current in 12.5  $\mu\text{m}$  Long-wavelength HgCdTe Infrared Photodiode Arrays [J]. *Optics Letters* , 2016 , **41**: 828-831.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Genzer J and Groenewold J. Soft matter with hard skin: from skin wrinkles to templating and material characterization [J]. *Soft Matter* , 2006 , **2**: 310-323.
- [19] Huck W , Bowden N , Onck P , et al. Ordering of spontaneously formed buckles on planar surfaces [J]. *Langmuir* , 2000 , **16**(7) : 3497-3501.
- [20] 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.
- [21] Chris Littler. Characterization of Impurities and Defects in InSb and HgCdTe using Novel Magneto-Optical Techniques [J] , *Proc. of SPIE* , 1993 , **2021**: 184-201.
- [22] Mike Davis , Mark Greiner. Indium antimonide large-format detector Arrays [J]. *Optical Engineering* , 2011 , **50**(6) : 061016.

(下转第 350 页)

太阳能电池的性能。(2)  $\text{Li}^+$  离子掺杂提升  $\text{Er}^{3+}$  离子猝灭浓度机理是否还有进一步深入研究的空间,如果用其他离子来取代  $\text{Li}^+$ ,是否也会提升  $\text{Er}^{3+}$  离子猝灭浓度。(3) 在  $\text{NaYF}_4:\text{Yb},\text{Er}$  上转换发光与金属纳米颗粒表面等离子体协同工作的研究中,目前的研究还集中在金属纳米颗粒掺杂浓度以及  $\text{SiO}_2$  壳层厚度的调控上,而忽略了金属纳米颗粒尺寸及形状对钙钛矿太阳能电池性能影响。(4) 引入重掺杂半导体材料  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  是为了解决镧系元素氧化物对照射激光强度要求高的问题,是否还有其他重掺杂半导体材料,能够很好的解决这个问题的同时提升太阳能电池的性能;或者能否用镧系元素的其他化合物替代镧系元素氧化物来提升发光性能。

## References

- [1] Kojima, A, Teshima, K, Shirai, Y *et al.*, Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells [J]. *Journal of the American Chemical Society* 2009, **131**: 6050-6051.
- [2] Lee, M M, Teuscher, J, Miyasaka, T *et al.*, Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites [J]. *Science* 2012, **338**: 643-647.
- [3] Wang J, Wang N, Jin Y, *et al.*, Interfacial Control Toward Efficient and Low-Voltage Perovskite Light-Emitting Diodes [J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**( 14 ): 2311-2316.
- [4] Yang M, Zhang T, Philip S, *et al.*, Facile fabrication of large-grain  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$  films for high-efficiency solar cells via  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Br}$ -selective Ostwald ripening [J]. *Nature Communications* 2016, **7**: 12305.
- [5] Pang S, Hu H, Zhang J, *et al.*,  $\text{NH}_2\text{CH}_3\text{-NH}_2\text{PbI}_3$ : An Alternative Organolead Iodide Perovskite Sensitizer for Mesoscopic Solar Cells [J]. *Chemistry of Materials* 2014, **26**: 1485-1491.
- [6] Zhou Z, Wang Z, Zhou Y, *et al.*, Methylamine Materials itizer for Mesoscopic Solar Cellsolar Cellsr Mesoscopic Solar Cellsia  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{B}$  [J]. *Angewandte Chemie International Edition* 2015 **54**: 9705-9709.
- [7] Shi J, Dong J, Lv, S T, *et al.* Hole-conductor-free perovskite organic lead iodide heterojunction thin-film solar cells: High efficiency and junction property [J]. *Applied Physics Letters* 2014 **104**: 063901.
- [8] Wei J, Zhao Y, Li H, *et al.* Hysteresis Analysis Based on the Ferroelectric Effect in Hybrid Perovskite Solar Cells [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2014, **5** ( 21 ): 3937-3945.
- [9] Hu Q, Wu J, Jiang C, *et al.* Engineering of Electron-Selective Contact for Perovskite Solar Cells with Efficiency Exceeding 15% [J]. *ACS Nano* 2014 **8**: 10161-10167.
- [10] Ding Y, Yao X, Zhang X, *et al.*, Surfactant enhanced surface coverage of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  perovskite for highly efficient mesoscopic solar cells [J]. *Journal of Power Sources* 2014 **272**: 351-355.
- [11] Shockley W, Queisser H J, Detailed balance limit of efficiency p-n junction solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, **32**: 510-519.
- [12] Koh T M, Fu K, Fang Y, *et al.*, Formamidinium-containing metal-halide: An alternative material for near-IR absorption perovskite solar cells [J]. *J. Phys. Chem. C* 2014, **118**: 16458-16462.
- [13] Hao F, Stoumpos C C, Chang R P H, *et al.*, Anomalous Band Gap Behavior in Mixed Sn and Pb Perovskites Enables Broadening of Absorption Spectrum in Solar Cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.* 2014, **136**( 22 ): 8094.
- [14] He M, Pang X, Liu X, *et al.*, Monodisperse Dual-Functional Upconversion Nanoparticles Enabled Near-Infrared Organolead Halide Perovskite Solar Cells [J]. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2016, **55**: 4280-4284.
- [15] Roh J, Yu H and Jang J, Hexagonal Cellsolar CellsEr ( $3^+$ ) Nanoprism-Incorporated Upconverting Layer in Perovskite Solar Cells for Near-Infrared Sunlight Harvesting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, **8**: 19847-19852.
- [16] Zhou D, Liu D, Jin J, *et al.*, Semiconductor plasmon-sensitized broadband upconversion and its enhancement effect on the power conversion efficiency of perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017 **5**: 16559-16567.
- [17] Ding Y, Qiao H, Yang T, *et al.*, Upconversion luminescence co-enhanced by  $\text{Li}^+$  ions doping and localized surface plasmon resonance for perovskite solar cells [J]. *Optical Materials*, 2017, **73**: 617-622.

(上接第 331 页)

- [23] 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**: 899-906.
- [24] Leng Han-bing, Gong Zhen-dong, Xie Qing-sheng, *et al.* Adaptive blind pixel detection and compensation for IRFPA based on fuzzy median filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*(冷寒冰, 宫振东, 谢庆胜, 等. 基于模糊中值的 IRFPA 自适应盲元检测与补偿. 红外与激光工程) 2015, **44**( 3 ): 821-826.
- [25] HOU Zhi-jin, FU Li, SI Jun-jie, *et al.* Study on Identification and Orientation of Connected Defective Elements in FPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(侯治锦, 傅莉, 司俊杰, 等. 面阵探测器相连缺陷元识别定位. 红外与毫米波学报) 2017, **36**( 2 ): 208-213.